

**POLITECHNIKA OPOLSKA**

**PRACE DOKTORANTŮW  
ČLÁNKY DOKTORANDŮ**



OPOLE Październik 2013



EVROPSKÁ UNIE / UNIA EUROPEJSKA  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ / EUROPEJSKI FUNDUSZ ROZWOJU REGIONALNEGO  
PŘEKRAČUJEME HRANICE / PRZEKRACZAMY GRANICE

Redakcja:  
Michał PODPORA Krzysztof GÓRECKI

© Praca zbiorowa, 2013

ISBN 978-83-64461-00-2

**Druk:**  
Drukarnia Cyfrowa V8  
e-mail: [biuro@v8.com.pl](mailto:biuro@v8.com.pl)  
[www.v8.com.pl](http://www.v8.com.pl)

**SPIS TREŚCI  
OBSAH**

1. Krzysztof GÓRECKI – Przedmowa .....	5
2. Artur ADAMOWICZ – Ocena poprawności odpowiedzi dielektrycznej schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej za pomocą metody napięcia powrotnego .....	7
3. Marcin GAŁEK – Charakterystyki czasowe układów dynamicznych opisanych równaniem różniczkowym niecałkowitego rzędu .....	13
4. Rafał GASZ – Identyfikacja elementów linii elektroenergetycznej na podstawie zdjęć .....	19
5. Rafał GASZ – Wyznaczanie pozycji aparatu na podstawie zdjęć .....	23
6. Piotr GRACA – Obliczanie siły w aktywnym osiowym łożysku magnetycznym dla różnych materiałów magnetycznych .....	29
7. Marek HORINEK – Power analyzer for frequency converter testing based on national instruments CRIO platform .....	35
8. Michał KRAWIEC – Wybrane metody wykrywania prostych krawędzi w obrazach cyfrowych .....	41
9. Paweł MAJEWSKI – Perfekcyjna rekonstrukcja sygnału z wykorzystaniem rachunku wielomianowo-macierzowego .....	45
10. Jakub MAŇAS, Petr BILÍK - The Application for Hybrid Power System Data Evaluation .....	49
11. Paweł MICHALSKI – Point cloud primitive objects extraction using ransac algorithm .....	55
12. Piotr MYNAREK – Analiza strat w żelazie w silniku synchronicznym małej mocy z magnesami trwałymi .....	59
13. Artur PALA – Analiza efektywności algorytmu rozwiązywania układów równań różniczkowych zwyczajnych dla platformy Nvidia CUDA .....	65
14. Artur PALA – Analiza możliwości zastosowania technologii Nvidia CUDA do rozwiązywania układów równań różniczkowych zwyczajnych .....	73
15. Petr PĚTVALDSKÝ, Petr BILÍK - Testing gapless measurement of PQA according to IEC 62586-2 .....	77
16. Sandra PRZEWOŹNIK – Wpływ postępu technicznego i technologicznego na efektywność krajowej gospodarki energetycznej .....	85

17. Sandra PRZEWOŹNIK – Zarządzanie popytem na rynku energii elektrycznej .....	89
18. Tomasz PRZYBYŁA – Modelowanie propagacji zanieczyszczeń w architekturze wielordzeniowej na potrzeby diagnostyki jakości powietrza .....	97
19. Tomasz PYKA – Poprawa sterowania z użyciem algorytmów typu predyktor-korektor .....	101
20. Piotr SCHNEIDER – Wydajność asynchronicznych algorytmów szyfrowania danych w systemie operacyjnym linux .....	105
21. Agnieszka TISZBIEREK – Porównanie modeli trójwymiarowych wykonanych przy pomocy dwóch metod skanowania obrazu .....	111



**ARTUR ADAMOWICZ**

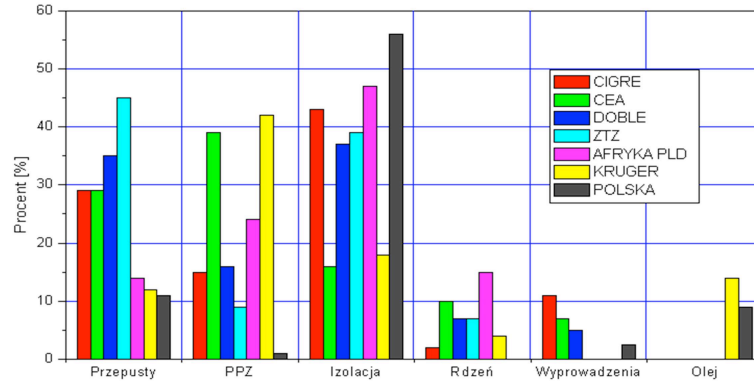
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej

## **OCENA POPRAWNOŚCI ODPOWIEDZI DIELEKTRYCZNEJ SCHEMATÓW ZASTĘPCZYCH PRÓBEK IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWEJ ZA POMOCĄ METODY NAPIĘCIA POWROTNEGO**

**Streszczenie:** W artykule opisano możliwość oceny odpowiedzi dielektrycznej schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej za pomocą metody napięcia powrotnego. Przedstawiono sposób opracowania schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej w oparciu o wartości parametrów modelu Cole-Cole ( $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_\infty$ ,  $\alpha$ ,  $\tau$ ). Parametry modelu Cole-Cole obliczono na podstawie jednej z metod wykorzystywanych w diagnostyce izolacji celulozowo-olejowej, tzn. spektroskopii częstotliwościową dielektryków (FDS).

### 1. WSTĘP

Jednym z podstawowych elementów systemu energetycznego są transformatory energetyczne. Nowoczesne metody diagnostyczne pozwalają prawidłowo ocenić stan techniczny transformatora, co zapewnia bezpieczeństwo dostaw energii elektrycznej jak również ogranicza możliwe zagrożenie zanieczyszczenia środowiska [1]. Przedstawione na rysunku 1 wyniki analizy przyczyn awarii transformatorów pokazują, iż najczęstszym elementem transformatora ulegającym uszkodzeniu jest układ izolacyjny [2]. Izolacja celulozowo-olejowa jest najstarszym i najpopularniejszym układem izolacyjnym w transformatorach. Wzrost zawartości wody w celulozie oraz starzenie celulozy powoduje uszkodzenie układu izolacyjnego. Poprawnie wykonana diagnostyka transformatora energetycznego powinna dotyczyć przede wszystkim układu izolacyjnego. Jedną z metod wykorzystywanych w diagnostyce izolacji celulozowo-olejowej jest spektroskopia częstotliwościowa (FDS) [3].



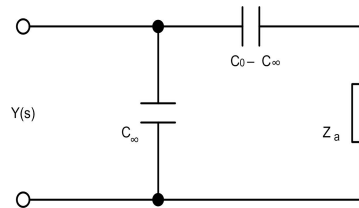
Rys.1. Główne przyczyny awarii transformatorów.

## 2. SCHEMAT ZASTĘPCZY PRÓBEK IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWEJ

Schemat zastępczy próbek izolacji celulozowo-olejowej można opracować w oparciu o model Cole-Cole, którego empiryczne równanie zapisano w postaci [4]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (1)$$

Analizę parametrów modelu Cole-Cole  $(\varepsilon_s, \varepsilon_{\infty}, \alpha, \tau)$ , w postaci elektrycznego schematu zastępczego dielektryka przedstawia rysunek 2. Relaksacyjnym właściwością materiału odpowiada impedancja charakterystyczna  $Z_a$ , której wartość zależy od współczynnika  $\alpha$  oraz czasu relaksacji  $\tau$ .



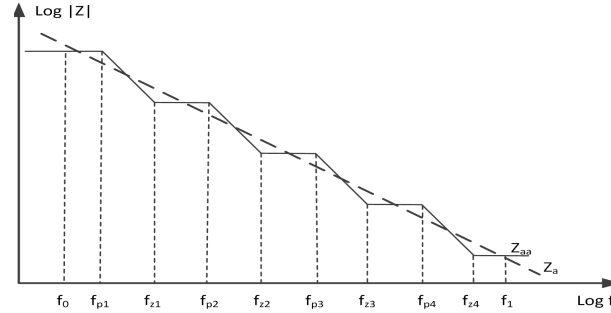
Rys.2. Elektryczny schemat zastępczy dielektryka

Wzór na impedancję charakterystyczną  $Z_a$  ma postać:

$$Z_a(s) = \frac{\tau}{(C_0 + C_{\infty})(s\tau)^{\alpha}} \quad (2)$$

Do określenia wartości czasu relaksacji  $\tau$  oraz parametru  $\alpha$  wykorzystuje się charakterystykę Cole-Cole zespolonej przenikalności  $(\varepsilon' - \varepsilon'')$ , metoda FDS [3].

Ponieważ operator  $s$  impedancji charakterystycznej  $Z_a(s)$  jest przeważnie w potęgę niecałkowitej ( $0 < \alpha < 1$ ), wyznaczenie wartości elementów schematu zastępczego impedancji  $Z_a$  możliwe jest np. przy pomocy aproksymacji ziarnistej. Na rysunku 3 pokazano w sposób poglądowy ideę metody aproksymacji. W wyniku przeprowadzonej aproksymacji otrzymano nową operatorową impedancję charakterystyczną  $Z_{aa}(s)$  (3), którą w łatwy sposób da się przedstawić w postaci schematu szeregowo-równoległego RC (wzory (4), (5), (6) oraz rysunek 4).



Rys. 3. Metoda aproksymacji ziarnistej impedancji  $Z_{aa}$   
 $f_0$  – częstotliwość początkowa,  $f_1$  – częstotliwość końcowa,  $f_p$  – częstotliwość wystąpienia bieguna impedancji  $Z_{aa}$ , częstotliwość wystąpienia zera impedancji  $Z_{aa}$

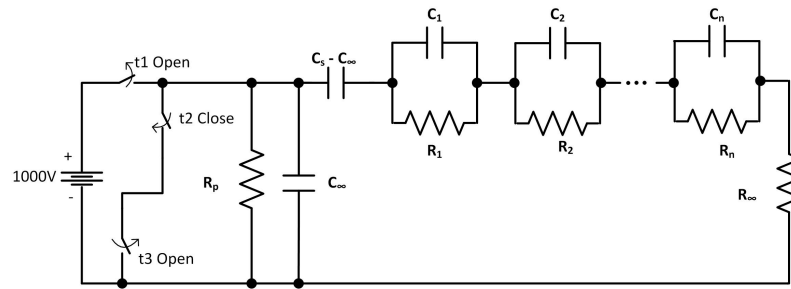
$$Z_{aa}(s) = |Z_a(f_0)| \prod_{i=1}^n \frac{\frac{s}{\omega_{zi}} - 1}{\omega_{pi}} \quad (3)$$

$$Z_{aa}(s) = R_\infty + \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{\frac{s}{\omega_{pi}} - 1} \quad (4)$$

$$R_\infty = |Z_a(f_0)| \prod_{i=1}^n \frac{\omega_{pi}}{\omega_{zi}} \quad (5)$$

$$R_i = Z_{aa}(s) \left( \frac{s}{\omega_{pi}} - 1 \right) \Big|_{s=-\omega_{pi}}, \quad C_i = \frac{1}{\omega_{pi} R_i} \quad (6)$$

gdzie:  $\omega_p$  – pulsacja wystąpienia bieguna impedancji  $Z_{aa}$ ,  $\omega_z$  – pulsacja wystąpienia zera impedancji  $Z_{aa}$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, n$



Rys.4. Szeregowo-równoległy schemat zastępczy izolacji papierowo-olejowej opracowany w oparciu o model Cole-Cole

### 3. PRÓBKI IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWEJ.

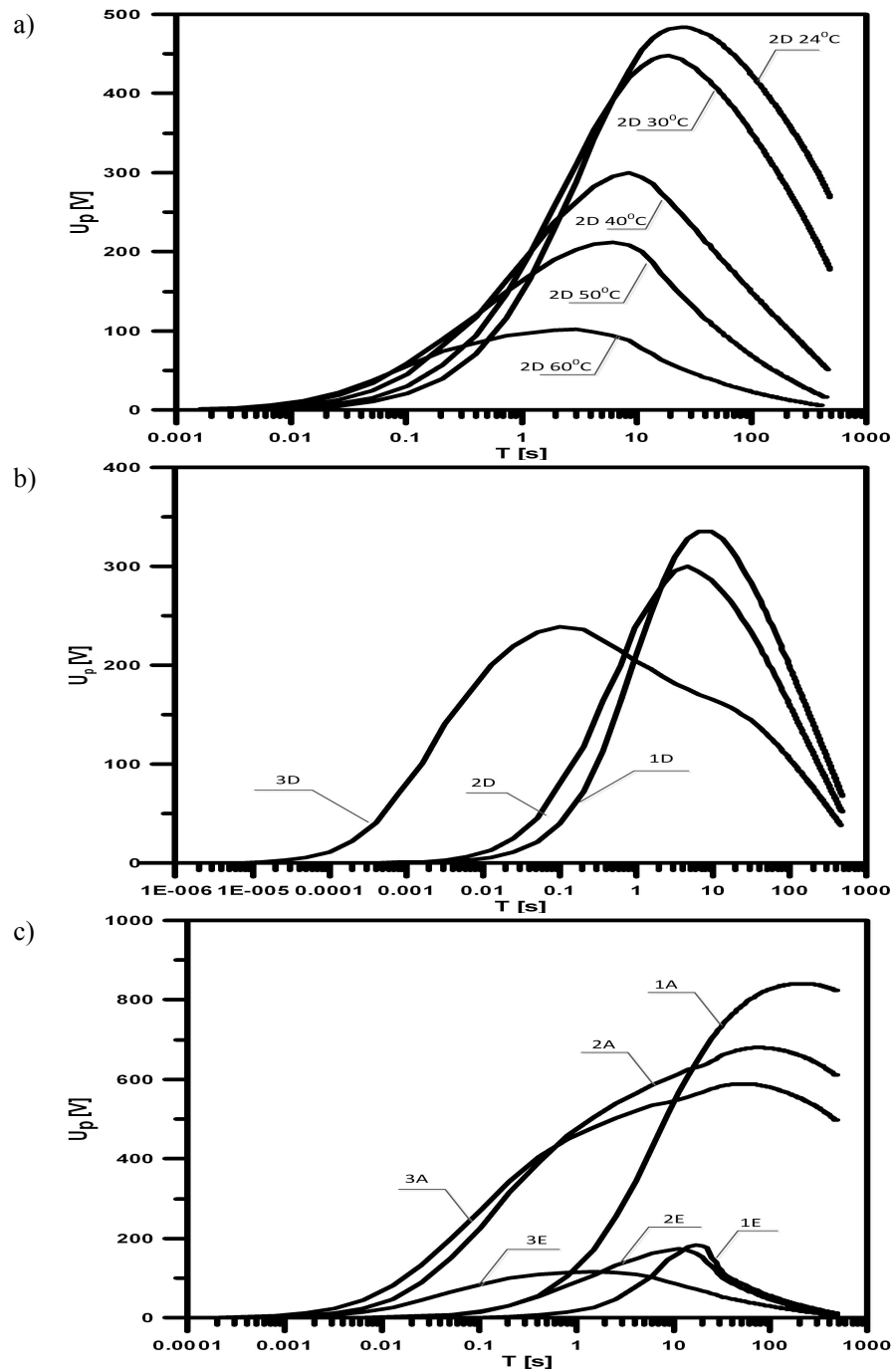
Tabela 1 przedstawia cykl przygotowania próbek izolacji celulozowo-olejowej.

Tabela 1. Cykl przygotowania próbek izolacji celulozowo-olejowej

1A	1B	1C	1D	1E
2A	2B	2C	2D	2E
3A	3B	3C	3D	3E
A – zawilgocenie początkowe (po osuszeniu papieru) B – zawilgocenie początkowe plus wzrost wagi papieru o 1% C – zawilgocenie początkowe plus wzrost wagi papieru o 2% D – zawilgocenie początkowe plus wzrost wagi papieru o 3% E – zawilgocenie początkowe plus wzrost wagi papieru o 4% 1 – suszenie papieru (120°C pod próżnią) 2 – termiczne starzenie papieru w 150°C przez 25 h plus suszenie 3 – termiczne starzenie papieru w 170°C przez 25 h plus suszenie				

### 4. WYNIKI BADAŃ

Celem badań była ocena poprawności odpowiedzi dielektrycznej schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej za pomocą metody napięcia powrotnego [5]. Analizę przeprowadzono na drodze symulacji komputerowej. Wartości poszczególnych elementów schematów zastępczych dla próbek izolacji o zróżnicowanym stopniu zawilgocenia, starzenia i temperaturze wyznaczono w sposób podany w rozdziale 2. Czasowe charakterystyki napięcia powrotnego dla przykładowo dobranej czasu ładowania wynoszącego 10 s oraz czasu zwarcia 5 s, przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Przykładowe charakterystyki napięcia powrotnego  $U_p$  w funkcji temperatury (a), starzenia (b) oraz zawilgocenia i starzenia izolacji

Analizując charakterystyki napięcia powrotnego z rysunków 5a, 5b oraz 5c można zauważyć przesuwanie się maksimum charakterystyk w stronę czasów krótszych w miarę wzrostu temperatury próbek (rys. 5a), starzenia (rys. 5b) oraz w miarę wzrostu zawilgocenia i starzenia izolacji (rys. 5c). Przyczyną tego jest skracanie się czasów relaksacji dipolowych oraz wzrost przewodności skośnej próbek izolacji celulozowo-olejowej. Obserwacje te potwierdzają poprawności odpowiedzi dielektrycznej schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej za pomocą metody napięcia powrotnego.

## 5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania eksperymentalne oraz obliczenia pozwoliły na opracowanie schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej. Opracowane schematy zastępcze wykazały przydatność do oceny wpływu temperatury, stopnia zawilgocenia i starzenia izolacji. Szeregowo-równoległy schemat zastępczy próbki izolacji celulozowo-olejowej wyznaczony z modelu Cole-Cole, zdaniem autora może być wykorzystywany do diagnostyki transformatora energetycznego.

## **LITERATURA**

- [1] SAHA T. K.: Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, V.10 No 5, 903-917, October 2003
- [2] SZROT M., PŁOWUCHA J., SUBOCZ J.: Planowanie eksploatacji transformatorów z wykorzystaniem systemu TrafoGrade. PAK 2008 nr 11, s. 780-782.
- [3] WOLNY S.: Diagnostyka stanu izolacji papierowo-olejowej z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych. OW Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie, z. 222, Opole, 2008.
- [4] BISHAY S.T.: Numerical methods for the Calculation of Cole-Cole parameters. Egyptian Journal of Solids, vol. 23, no. 2, 2000, pp. 179-188.
- [5] WOLNY S., ZDANOWSKI M.: Analysis of Recovery Voltages Parameters of Paper-Oil Insulation Obtained from Simulation Investigations Using the Cole-Cole Model. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, No. 6, 1676-1680, December 2009.

**MARCIN GALEK**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Instytut Automatyki i Informatyki

## **CHARAKTERYSTYKI CZASOWE UKŁADÓW DYNAMICZNYCH OPISANYCH RÓWNANIEM RÓŻNICZKOWYM NIECAŁKOWITEGO RZĘDU**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono charakterystyki czasowe układów dynamicznych opisanych równaniem różniczkowym niecałkowitego rzędu. Przedstawiono charakterystyki dla różnej wartości pochodnej frakcyjnej w przedziale  $\alpha \in (0,1)$ .

### 1. WPROWADZENIE

Rachunek różniczkowy ułamkowego rzędu zdobywa coraz większą popularność. Zainteresowanie to jest spowodowane obserwacjami, że wiele zjawisk/procesów można lepiej opisać przy użyciu tego rachunku. Ponadto intensywny rozwój technologii komputerowej mający miejsce w ostatnich latach pozwolił na efektywną implementację narzędzi obliczeniowych opartych na rachunku różniczkowym niecałkowitego rzędu, który jest znacznie bardziej złożony obliczeniowo. Rachunek różniczkowy niecałkowitego rzędu wykorzystywany jest w bardzo wielu obszarach nauki obejmujących chemię, fizykę, elektrotechnikę, elektronikę, medycynę i wiele innych. Równania różniczkowe niecałkowitego rzędu wpływają na szereg własności układu dynamicznego takie jak: charakterystyki częstotliwościowe, charakterystyki czasowe, kryteria stabilności, minimalnofazowości itp.. W ramach pracy [1] przedstawiono analizę częstotliwościową układów zawierających pochodną niecałkowitego rzędu. Niniejsza praca prezentuje analizę w dziedzinie czasu takich układów.

### 2. OPIS ROZPATRYWANEGO SYSTEMU

W pracy rozważany jest układ dynamiczny który opisany jest za pomocą równania różniczkowego  $\alpha$ -tego rzędu

$$\frac{d^\alpha y(t)}{dt^\alpha} + ay(t) = bu(t), \quad (1)$$

gdzie:  $y(t)$  jest wyjściem układu,  $u(t)$  jest jego wejściem, parametry  $a$  i  $b$  określają własności dynamiczne układu oraz  $a$  jest rzędem pochodnej. W ramach pracy przyjęto  $a \in (0,1)$ . Równanie (1) jest w pewnym sensie uogólnieniem układu inercyjnego I rzędu, jednakże wprowadzenie pochodnej niecałkowitego rzędu skutkować będzie zmianami właściwości zarówno

w dziedzinie częstotliwości jak i czasu. Rozpatrywane system (1) jest powszechnie stosowany do modelowania szeregu zjawisk/procesów: czwórnika z superkondensatorem [1, 5], proces transportu lub dyfuzji ciepła, zachowanie się materiałów lepkosprężystych.

### 3. ANALIZA UKŁADU W DZIEDZINIE CZASU

Rozważmy dwie różne definicje pochodnej niecałkowitego rzędu Reimann-Liouville (RL) oraz Grünwald-Letnikov (GL). Definicja pochodnej niecałkowitego rzędu RL oparta jest na kombinacji pochodnej całkowitego rzędu oraz całki niecałkowitego rzędu

$$D^\alpha y(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \left[ \int_0^t \frac{y(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \right], \quad (2)$$

gdzie:  $\Gamma$  to funkcja gamma Eulera,  $n=[\alpha]+1$  jest całkowitą częścią współczynnika  $\alpha$ . Definicja GL oparta jest na rozwinięciu dwumianu Newtona

$$D^\alpha y(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \binom{\alpha}{j} y(t-jh), \quad (3)$$

gdzie:  $\binom{\alpha}{j}$ ,  $j=0,1,\dots$ , jest dwumianem Newtona, a  $h$  jest odstępem czasu pomiędzy kolejnymi próbkami.

Najprostszą metodą wyznaczenia charakterystyk czasowych jest dyskretyzacja sygnału ciągłego ze stałym czasem próbkowania. Otrzymywana jest wówczas różnica i równanie różnicowe niecałkowitego rzędu. Do otrzymania różnicy niecałkowitego rzędu użyto dyskretyzatora zero-order hold (ZOH) z czasem próbkowania  $h$

$$\Delta^\alpha y(t) = \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{t/h} (-1)^j \binom{\alpha}{j} y(t-jh). \quad (4)$$

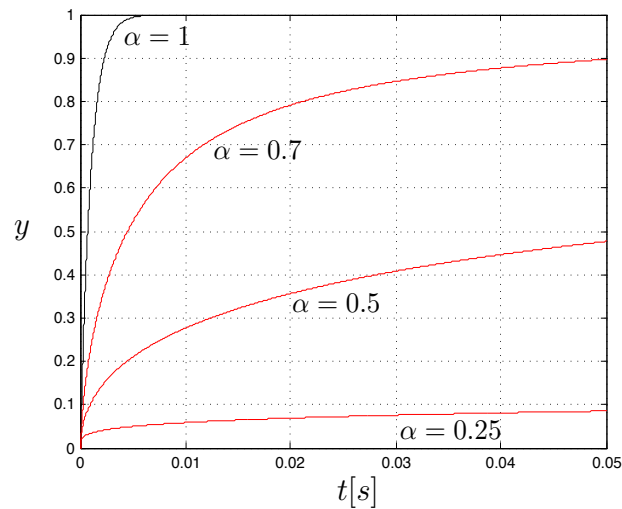
Równanie (4) może być otrzymane w wyniku dyskretyzacji zarówno równania różniczkowego GL jak i RL [4].

Ostatecznie, równanie różnicowe całego zdyskretyzowanego systemu (1) jest następujące

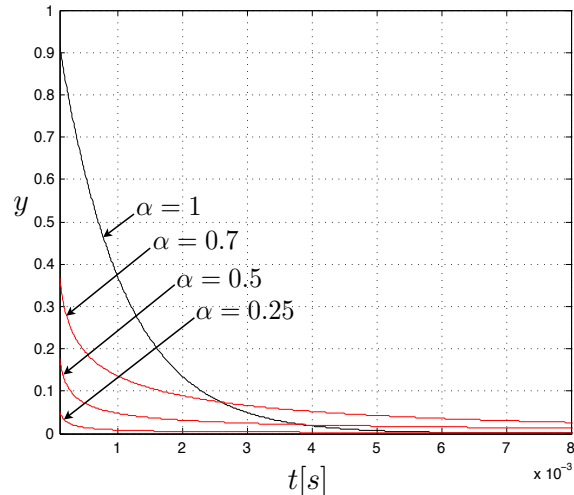


$$y(t+h) = (-ah^\alpha + \alpha)y(t) - \sum_{j=2}^{\frac{t}{h}+1} (-1)^j \binom{\alpha}{j} y(t+(1-j)h) + h^\alpha bu(t). \quad (5)$$

Na podstawie implementacji równania (5) możliwe jest wyznaczenie charakterystyk czasowych układu dynamicznego niecałkowitego rzędu. Podstawowymi charakterystykami czasowymi rozpatrywanymi w analizie układów dynamicznych są odpowiedzi skokowe oraz impulsowe tych układów. Zostały one przedstawione odpowiednio na rys. 1 oraz rys. 2, dla czasu próbkowania  $h=0.01$ , wzmocnienia  $k=1$ , stałej czasowej  $T=0.0001$  oraz różnych wartości rzędu różnicy frakcyjnej  $\alpha$ .



Rys. 1. Charakterystyki czasowe równania (1), w odpowiedzi na skok jednostkowy dla różnych wartości  $\alpha \in (0,1)$ .



Rys. 2. Charakterystyki czasowe równania (1), w odpowiedzi na impuls dla różnych wartości  $\alpha \in (0,1)$ .

Jak można zaobserwować na rys. 1 i rys. 2 rząd różnicy frakcyjnej istotnie wpływa na charakterystyki czasowe układu dynamicznego. Mniejsze wartości współczynnika  $\alpha$  istotnie „spowalniają” własności dynamiczne układu. Można odnieść wrażenie że zmiana współczynnika  $\alpha$  zmienia stałą czasową układu, jednakże przedstawione charakterystyki wykonane zostały dla jednakowej wartości  $T$ .

#### 4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono wyniki analizy w dziedzinie czasu układu opisanego równaniem różniczkowym niecałkowitego rzędu. W celu wyznaczenia charakterystyk czasowych zastosowano dyskretyzację ze stałym czasem próbkowania i ekstrapolatorem zerowego rzędu (ZOH). Otrzymany opis układu w dziedzinie czasu jest dyskretną wersją zarówno równania GL jak również RL. Ostatecznie przedstawiono charakterystyki impulsowe oraz skokowe układu dynamicznego. Na przedstawionych charakterystykach widoczny jest wpływ rzędu pochodnej na przebieg charakterystyk czasowych.

#### LITERATURA

- [1] GALEK M., STANISŁAWSKI R., LATAWIEC K.J., ŁUKANISZYN M. „Frequency domain characteristics of selected RC networks modeled by fractional-order equations” XXXVI IC-SPETO, Ustroń, 2013, pp. 41-42.
- [2] KACZOREK T., DZIELIŃSKI A., ŁOPATKA R., DĄBROWSKI W. „Podstawy teorii sterowania” WNT, Warszawa, 2009.
- [3] OLDHAM K., SPANIER J. „The fractional calculus.” Academic Press, FL, 1974.

- [4] OSTALCZYK P. „Equivalent descriptions of a discrete-time fractional-order linear system and its stability domains” *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2012, Vol 22, No 3, pp 533-538.
- [5] SIEROCIUK D., DZIELIŃSKI A. „New method of fractional order integrator analog modeling for orders 0.5 and 0.25” *16th MMAR Conference, Miedzyzdroje*, 2011, pp. 137–141.



**RAFAL GASZ**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Diagnostyki

## **IDENTYFIKACJA ELEMENTÓW LINII ELEKTROENERGETYCZNEJ NA PODSTAWIE ZDJĘĆ**

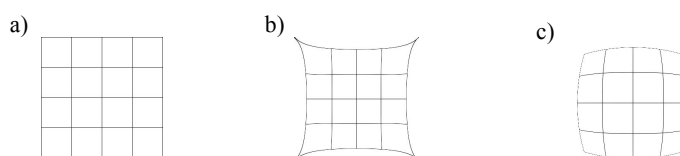
**Abstract:** In this paper presents an automatic method to perform diagnostics supporting structures of high voltage with using the metric images. Diagnosis of the line is an important point of their actions. Diagnostic and determine which parts of the structure in need of repair or replacement is time consuming and expensive.

### 1. WSTĘP

Starzejąca się infrastruktura linii elektroenergetycznych wymusza ciągły monitoring ich stanu. Prawidłowa ocena stanu poszczególnych elementów jak np. – konstrukcji wsporczych, izolatorów lub przewodów jest podstawą zachowania ciągłej i niezawodnej pracy sieci. Diagnostyka w trakcie normalnej pracy ma za zadanie przewidywanie potencjalnej awarii, oraz wczesne jej zapobieganie. W okresie poawaryjnym należy natomiast w jak najszybszym czasie zlokalizować uszkodzenie oraz zaproponować możliwie szybki sposób naprawy. Słupy energetyczne i izolatory, w szczególności linii WN, mogą ulegać różnego rodzaju uszkodzeniom, od mechanicznych, do tych spowodowanych korozją. Planowe oględziny poszczególnych elementów linii są czasochłonne i kosztowne. Sposobem obniżenia kosztów i przyspieszenia diagnostyki mogłaby być wstępna ocena stanu wykonana w sposób zautomatyzowany. Najlepszym sposobem jest wykorzystanie w tym celu zdjęć fotograficznych. Na zdjęciach można zauważyć braki w konstrukcji lub zmiany barwy, świadczące o występującej korozji. Wystąpienie tego typu sytuacji powoduje, że obiekt należy poddać dokładniejszym oględzinom. Wynikiem czego może być podjęcie decyzji dotyczących naprawy bądź konserwacji.

### 2. ANALIZA ZDJĘĆ

Na podstawie fotografii można zidentyfikować znajdujące się na zdjęciu elementy konstrukcji oraz ich stan. Wykonane zdjęcia posiadają jednak wady, które są wynikiem zniekształceń optycznych obiektywów. Największe zniekształcenia, które mają duży wpływ na jakość zdjęć wykorzystywanych do pomiarów ma dystorsja. Wyróżniane są jej dwa typy: dystorsja beczkowata i poduszkowata (rys. 1).



Rys. 1. Obraz: prawidłowy (a), dystorsja poduszkowata (b), dystorsja beczkowata (c) [3]

Dystorsja jest wadą optyczną, która polega na różnym stopniu powiększenia obrazu w zależności od odległości od osi optycznej soczewki [2, 3]. Prowadzi do zachwiania proporcji i zniekształcenia kształtów na obrazie. Dystorsja występuje zazwyczaj na zdjęciach wykonanych obiektywami zmiennoogniskowymi. Dystorsja beczkowata objawia się zaokrągleniem obrazu do zewnątrz, co tworzy charakterystyczny kształt. Wada ta występuje w obiektywach szerokokątnych, o krótkich ogniskowych. Zaokrąglenie obrazu do środka kadru, przypominające poduszkę – nazywane jest dystorsją poduszkowatą. Występuje w teleobiektywach [2, 3].

Inną często występującą wadą jest aberracja. Najczęściej spotykane są aberracje – sferyczne i chromatyczne. Wpływa ona w mniejszym lub większym stopniu na czytelność zdjęcia przez zmianę ostrości pewnych fragmentów obrazu [2, 3]. W wyniku tego identyczne punkty znajdujące się na dwóch różnych zdjęciach nie mogą zostać skorelowane.

Aberracja sferyczna polega na tym, że obiektywy ogniskują promienie świetlne w zależności od ich położenia między środkiem a brzegiem układu optycznego. Wynikiem jest zdjęcie o małej czytelności, zawierające wiele szumów, które w konsekwencji mogą utrudniać identyfikację poszczególnych elementów. Innym rodzajem jest aberracja chromatyczna, która polega na różnym ogniskowaniu wpadających promieni, w zależności od długości fali świetlnej. Aberracja chromatyczna objawia się na zdjęciach w postaci kolorowej obwódki wokół kontrastowych elementów obrazu, na przykład konstrukcji słupa na jasnym tle nieba. W celu otrzymania zdjęć, które będą mogły być wykorzystane do analizy diagnostycznej, należy pamiętać o odpowiednim skalibrowaniu sprzętu pomiarowego, lub wykonaniu korekty otrzymanych zdjęć.

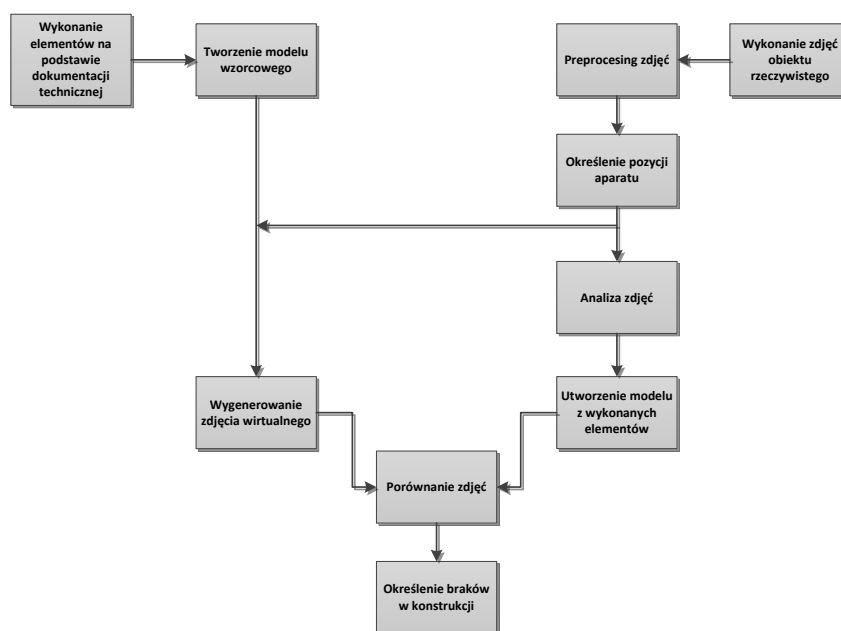
Żeby wykonane zdjęcia można było poddać analizom pomiarowym, należy znać dokładną orientację zdjęcia w przestrzeni i pozycję aparatu, z jakiej je wykonywano. Elementy orientacji zdjęcia dzielą się na: orientację wewnętrzną i zewnętrzną. Na orientację wewnętrzną zdjęcia składają się: odległość obrazu, zwana inaczej stałą kamery. Jest to odległość środka rzutów od płaszczyzny rzutów. W przypadku kamer niemetrycznych wielkość ta jest tożsama z ogniskową aparatu. Jest to rzut prostokątny środka rzutów na płaszczyznę zdjęcia. Położenie punktu głównego definiuje się w lokalnym układzie współrzędnych zdjęcia, zwanym układem współrzędnych tłowych. Pozioma oś układu oznaczana jest jako  $x$ , pionowa natomiast –  $z$ , a współrzędne punktu głównego definiowane są jako  $x_0, z_0$ . Położenie punktu głównego zdjęcia wyznacza się podczas kalibracji kamery.

Elementami orientacji zewnętrznej są natomiast: przestrzenne współrzędne środka rzutów – usytuowanie środka rzutów w terenowym (globalnym) układzie współrzędnych –  $X, Y, Z$  oraz trzy kąty określające położenie osi kamery i płaszczyzny rzutów w przestrzeni terenowej - kąt nachylenia  $\omega$ , zwrotu  $\varphi$  oraz skręcenia  $\kappa$ . Żeby móc podać identyfikacji zdjęcie,

należy znać dokładne położenie aparatu, a uściślając środek matrycy. W tym celu można zaimplementować metodę zdjęć normalnych.

### 3. OPIS ZAPROPONOWANEJ METODY

Wykonanie przez specjalistę analizy kilkunastu zdjęć jednego słupa i jego osprzętu zajmuje dużo czasu. Problem pojawia, gdy należy poddać analizie kilka tysięcy zdjęć. Aby to zadanie ułatwić i przyspieszyć zaproponowano rozwiązanie umożliwiające zautomatyzowanie procesu wykonywania wstępnej analizy zdjęć.



Rys. 2. Algorytm opisujący zasadę działania zaproponowanej metody

Wszystkie elementy składowe konstrukcji są znane i opisane w dokumentacji technicznej, dzięki czemu można ją zamodelować w środowisku CAD. Konstrukcje składają się z powtarzalnych elementów, z których modelować można różne typy słupów, nadając im unikatowe oznaczenia. Taki model stanowi wzorzec, dla którego tworzone są serie wirtualnych zdjęć, z którymi będą porównywane rzeczywiste zdjęcia metryczne. Zaproponowana metoda może być stosowana do różnego rodzaju konstrukcji, o ile dysponować się będzie ich szczegółową dokumentacją techniczną.

Na zdjęciach metrycznych dobrze są widoczne uszkodzenia i braki w konstrukcji. Należy odpowiednio zinterpretować takie zdjęcie, aby algorytm był w stanie stwierdzić istniejące braki. Pierwszym etapem, jaki jest wykonywany w procesie analizy jest ustalenie pozycji aparatu, z której zostały wykonane zdjęcia. Następnie dokonuje się ich analizy. Identyfikowane są

poszczególne elementy składające się na konstrukcję słupa. Posiadając dwa modele – jeden wzorowy, a drugi obiektu badanego, można dokonać porównania ich budowy. Dzięki analizie porównawczej zastosowanej w tej metodzie możliwe jest określenie, które elementy są uszkodzone, a których brakuje w konstrukcji.

#### 4. WNIOSKI

Zaproponowana metoda ma za zadanie ułatwić i przyspieszyć proces wykrywania uszkodzeń w elementach linii elektroenergetycznej. Dzięki ich szybkiej identyfikacji możliwe będzie podjęcie dalszych decyzji remontowych. Metodę można zaimplementować do analizy materiału już zgromadzonego, jak także dzięki urządzeniom mobilnym możliwe będzie prowadzenie diagnozowania podczas wykonywania zdjęć w czasie rzeczywistym.

#### LITERATURA

- [1] BRZEŚCIŃSKA W.: Fotogrametria, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2005
- [2] LINSNBARTH A.: Fotogrametria naziemna i specjalna, Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa 1974
- [3] OBERLAN L.: Fotografia cyfrowa, Helion, Gliwice 2003
- [4] SAWICKI P.: Fotogrametryczne systemy do pomiaru punktów w bliskim zasięgu, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 12b, 2002

*Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadrę naukową województwa opolskiego.*  
Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY





**RAFAL GASZ**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Diagnostyki

## WYZNACZANIE POZYCJI APARATU NA PODSTAWIE ZDJĘĆ

**Abstract:** In this paper presents an automatic method to determine the position of the camera. This method is part of the diagnostic method developed parts of the power line. The use of photogrammetric resection and collinearity equations is easy but intricate mathematical method for calculating the position of the camera. Developed by the author of the program is a good tool for determining position of the camera, especially images of standard objects such as crates power poles.

### 1. WSTĘP

Dziedziną nauki zajmującą się odtwarzaniem rozmiarów, kształtów i wzajemnego położenia obiektów w przestrzeni na podstawie zdjęć jest fotogrametria. Znajduje ona zastosowanie w różnych dziedzinach, jednak najczęściej jest używana w geodezji i kartografii, przy tworzeniu map topograficznych, modeli trójwymiarowych i numerycznych. Pojęcie fotogrametrii można również spotkać w architekturze, inżynierii i w budownictwie do tworzenia modeli przestrzennych, pomiarów obiektów wielkogabarytowych. W medycynie dziedzina ta służy do pomiaru kształtu ciała [1, 2].

Metody fotogrametryczne, w odróżnieniu od geodezyjnych, nie są wykonywane bezpośrednio na mierzonym obiekcie, a pośrednio, tj. na odpowiednio wykonanych jego zdjęciach (fotogramach), co jest atutem pomiarów fotogrametrycznych [3].

Jednym z podstawowych zadań fotogrametrii jest wyznaczenie elementów orientacji zewnętrznej aparatu fotograficznego, czyli wartości opisujących jego przestrzenne usytuowanie. Elementy orientacji zewnętrznej mogą być wyznaczone automatycznie za pomocą specjalnych urządzeń wykorzystujących technologię GPS, jednak w przypadku fotogrametrii naziemnej bardziej odpowiednim sposobem jest użycie oprogramowania, które wyznacza wartości elementów orientacji zewnętrznej na podstawie znanych punktów kontrolnych.

Elementy orientacji aparatu można podzielić na dwie kategorie: elementy orientacji wewnętrznej oraz elementy orientacji zewnętrznej. Elementy orientacji wewnętrznej to:

- ogniskowa ( $f$ ), zwana inaczej odległością obrazową czy stałą kamery jest to odległość środka rzutów od płaszczyzny rzutów, decyduje o kącie widzenia obiektywu.
- punkt główny zdjęcia ( $x_0, y_0$ ) - jest to rzut prostokątny środka rzutów  $O$  na obszar zdjęcia, położenie punktu głównego definiuje się w lokalnym

układzie współrzędnych zdjęcia, zwanym inaczej układem współrzędnych tłowych.

Elementy orientacji wewnętrznej zdjęcia wyznacza się podczas kalibracji aparatu fotograficznego.

Na elementy orientacji zewnętrznej składają się [3, 4]:

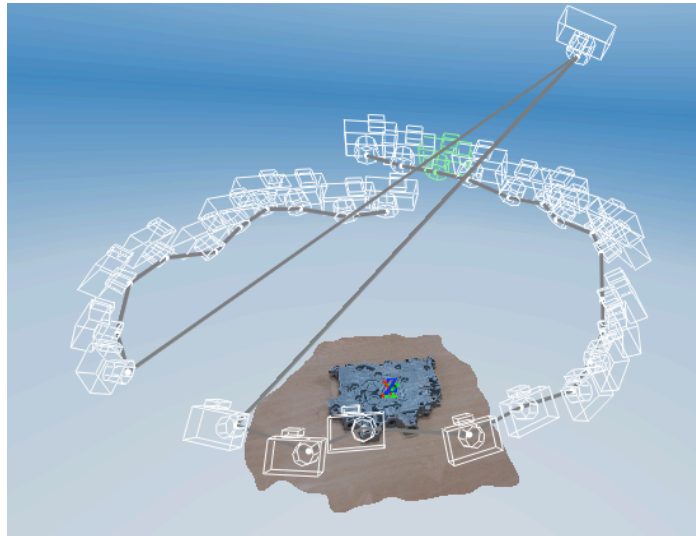
- kąty  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$  określające wychylenia osi kamery względem płaszczyzny rzutów:
  - $\omega$  - kąt nachylenia (wokół osi X)
  - $\varphi$  - kąt zwrotu (wokół osi Y);
  - $\kappa$  - kąt skręcenia (wokół osi Z).
- współrzędne terenowe środka rzutów -  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  określające punkt skupienia wiązki promieni rzutujących, czyli pozycję kamery.

## 2. WYZNACZANIE POZYCJI APARATU

Istnieje na rynku wiele programów do automatycznego generowania modeli 3D na podstawie zdjęć. W artykule użyto program 123D Catch firmy Autodesk. Pierwszym etapem automatycznej generacji modelu jest wgranie odpowiedniej liczby zdjęć obiektu. W badanym przypadku wykonano 28 zdjęć. Przykładowe zdjęcia przedstawia rys. 1. Po wgraniu zdjęć następuje korekcja zniekształceń geometrycznych, wyznaczenie pozycji aparatu oraz generowanie modelu.



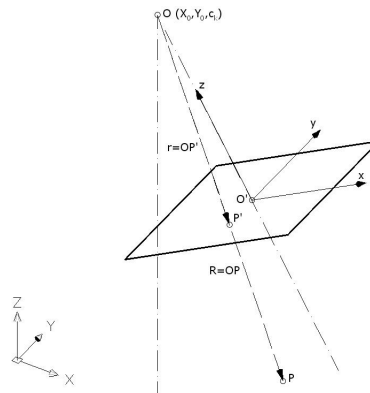
Rys. 1. Przykładowe zdjęcia



Rys. 2. Uzyskany model 3D obiektu wraz z umiejscowionymi pozycjami aparatu

Jak można zauważyć na rys. 2 znajduje się 28 ikonek aparatu. Oznacza to że program obliczył pozycję aparatu na każdym ze zdjęć.

Najprostszym i jednocześnie najszybszym sposobem obliczenia pozycji jest użycie zasady wcięcia wstecz i równań kolinearności.



Rys. 3. Schemat metody równań kolinearności

Współrzędne wektora  $r$  w układzie tłowym można zapisać następująco:

$$r = \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ 0 - f \end{bmatrix} \quad \text{czyli} \quad r = \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

$x, y$  – współrzędne tłowe punktu,  
 $x_0, y_0$  – położenie punktu głównego kamery,  
 $f$  – odległość ogniskowa.

Wektor  $R$  ma zaś współrzędne w układzie terenowym:

$$R = \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

$X, Y, Z$  – współrzędne terenowe punktu,  
 $X_0, Y_0, Z_0$  – współrzędne środka rzutów.

Wykonując operacje macierzowe można uzyskać wzory na wyznaczenie punktu w przestrzeni

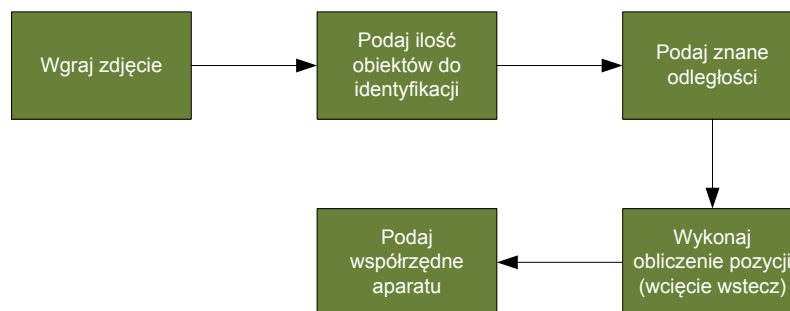
$$x - x_0 = \frac{1}{\lambda} * \{a_{11} * (X - X_0) + a_{21} * (Y - Y_0) + a_{31} * (Z - Z_0)\} \quad (3)$$

$$y - y_0 = \frac{1}{\lambda} * \{a_{12} * (X - X_0) + a_{22} * (Y - Y_0) + a_{32} * (Z - Z_0)\} \quad (4)$$

$$-f = \frac{1}{\lambda} * \{a_{13} * (X - X_0) + a_{23} * (Y - Y_0) + a_{33} * (Z - Z_0)\} \quad (5)$$

W celu umożliwienia wyznaczania poszczególnych pozycji aparatu autor artykułu wykonał oprogramowanie do rozwiązania tego zadania. Program bazuje na podstawowych zagadnieniach z zakresu fotogrametrii. Nowatorskim rozwiązaniem w wykonanej aplikacji jest możliwość wyznaczenia pozycji aparatu na podstawie informacji o odległości pomiędzy określonymi punktami obiektu rzeczywistego, które program sam identyfikuje.

Podstawowym zadaniem oprogramowania, którego algorytm przedstawiono na rys. 4, jest wyliczenie pozycji aparatu, z jakiej zostało wykonane zdjęcie kratownicy konstrukcji wsporczej linii elektroenergetycznej przedstawionej na rys. 5. Wszystkie elementy kratownicy są znormalizowane i opisane w dokumentacji technicznej. Opracowany program wykorzystuje detekcję krawędzi w celu identyfikacji śrub mocujących kolejne elementy. Odległości pomiędzy śrubami są znane, dzięki czemu posiadając zidentyfikowane dwie kolejne śruby możliwe jest wykonanie obliczeń. W pierwszym etapie algorytm przelicza odległość wyrażoną w mm, pomiędzy śrubami (wyrażoną w pikselach). Następnie wykonuje cykl obliczeń zgodnie z (3–5), w celu wyliczenia pozycji aparatu.



Rys. 4. Algorytm działania programu



Rys. 5. Zdjęcie kratownicy

Wykonanie obliczeń pozycji na podstawie dwóch znanych odległości, może być w niektórych przypadkach niewystarczające, w związku z czym istnieje możliwość zdefiniowania liczby znanych w przestrzeni rzeczywistej odległości pomiędzy kolejnymi śrubami.

### 3. WNIOSKI

Wykorzystanie fotogrametrycznego wycięcia wstecz oraz równań kolinearności stanowi prosty sposób wyliczenia pozycji aparatu. Opracowany przez autora program stanowi dobre narzędzie do wyznaczania pozycji aparatu, szczególnie na podstawie zdjęć obiektów znormalizowanych, jak np. kratownice słupów elektroenergetycznych.

### LITERATURA

- [1] SOJECKI A.: Optyka. WSiP, Warszawa, 1977
- [2] LINSNBARTH A.: Fotogrametria naziemna i specjalna. Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa 1974
- [3] OBERLAN Ł.: Fotografia cyfrowa. Helion, Gliwice 2003
- [4] Sawicki P.: Fotogrametryczne systemy do pomiaru punktów w bliskim zasięgu. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 12b 2002
- [5] SITEK Z.: Elementy fotogrametrii i fotografii technicznej. Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1984

*Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadre naukową województwa opolskiego.*  
Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY





**PIOTR GRACA**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Diagnostyki

## **OBLICZANIE SIŁY W AKTYWNYM OSIOWYM ŁOŻYSKU MAGNETYCZNYM DLA RÓŻNYCH MATERIAŁÓW MAGNETYCZNYCH**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowych rozkładu pola magnetycznego w badanym modelu osiowego aktywnego łożyska magnetycznego. Zbadano również wpływ właściwości magnetycznych materiału, z którego wykonano elementy konstrukcyjne łożyska, na siłę generowaną przez to łożysko. Otrzymane rezultaty stanowią podstawę do dalszych badań nad zawieszeniem magnetycznych w tego typu aktuatorach.

### 1. WSTĘP

Aktywne łożyska magnetyczne (*ang. Active Magnetics Bearings – AMB*) stanowią integralną część nowoczesnych i wysokoobrotowych maszyn elektrycznych. Składają się z zespołu elektromagnesów, układu zasilania wraz z końcówkami mocy (mostek H), bezdotykowych czujników położenia oraz systemu sterującego, odpowiedzialnego za regulowanie położenia lewitującego wału [1][2]. W związku z zaletami takimi, jak bezdotykowa praca (brak tarcia), duża prędkość obrotowa oraz łatwość rekonfigurowania systemu, łożyska magnetyczne znalazły swoje zastosowanie w takich maszynach jak pompy próżniowe, turbiny gazowe, generatory i elektrowrzeciona [1][2].

Aktywne łożyska magnetyczne są dzielone na dwie podstawowe grupy – radialne i osiowe. Radialne łożyska magnetyczne zazwyczaj sterują położeniem lewitującego wału w osiach  $x$  i  $y$  lokalnego układu współrzędnych maszyny elektrycznej. Z kolei osiowe łożyska magnetyczne odpowiedzialne są za pozycję wału wzdłuż osi  $z$  maszyny [2].

Większość nowoczesnych systemów łożyskowania magnetycznego posiada obydwie grupy aktywnych łożysk pracujących w dowolnych konfiguracjach. Niniejszy artykuł skupia się jedynie na badaniu aktywnego osiowego łożyska magnetycznego, które jest głównym obiektem badań w ramach studiów doktoranckich autora.

### 2. NUMERYCZNY MODEL OSIOWEGO AKTYWNEGO ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

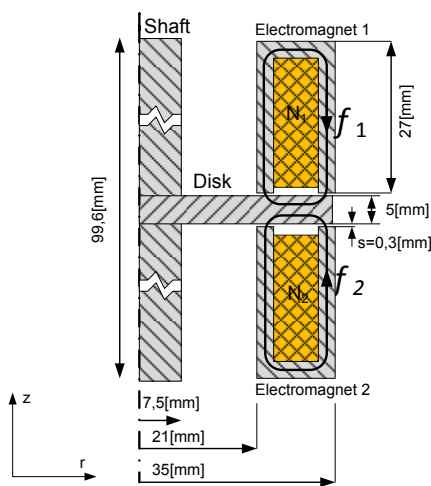
Model symulacyjny osiowego aktywnego łożyska magnetycznego został zbudowany na płaszczyźnie dwuwymiarowej w programie FEMM [3] zgodnie z przekrojem pokazanym na Rys.1. Następnie, do obliczeń rozkładu pola magnetycznego w łożysku, wykorzystano Metodę Elementów Skończonych (MES). Dla uproszczenia obliczeń wpływ temperatury na rezystancję uzwojeń,

zjawisko przepływu prądów wirowych oraz histereza magnetyczna materiału zostały pominięte. W obszarze obliczeniowym rozwiązano następujące cząstkowe równanie różniczkowe:

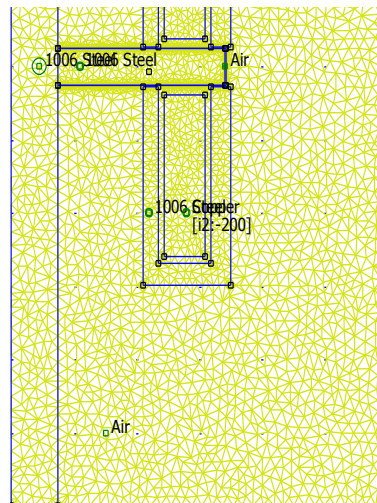
$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}, \quad (1)$$

gdzie  $\mu(B)$  - przenikalność magnetyczna,  $\vec{A}$  - magnetyczny potencjał wektorowy,  $\vec{J}$  - gęstość prądu.

Cały obszar obliczeniowy został pokryty trójkątną siatką dyskretyzacyjną o łącznej liczbie węzłów 9211 (Rys. 2). W celu zwiększenia dokładności obliczeń zagęszczone siatkę w szczelinie powietrznej  $s$  pomiędzy tarczą a elektromagnesami łożyska. Na wszystkich czterech bokach obszaru obliczeniowego zadano zerowy warunek Dirichleta  $\vec{A} = 0$ . Ze względu na to, że osiowe łożysko magnetyczne jest symetryczne wzdłuż osi symetrii  $z$ , obliczenia zostały wykonane tylko dla przedstawionej połówki modelu (Rys. 1) w układzie cylindrycznym.



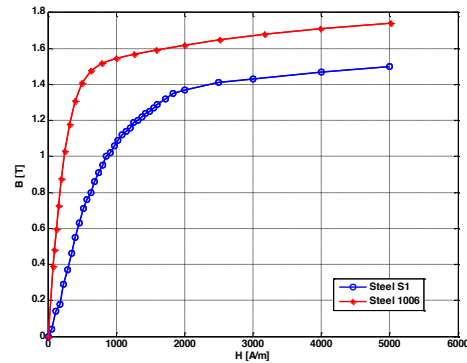
Rys. 1. Przekrój osiowo-symetryczny aktywnego osiowego łożyska magnetycznego



Rys. 2. Fragment siatki dyskretyzacyjnej obliczanego obszaru

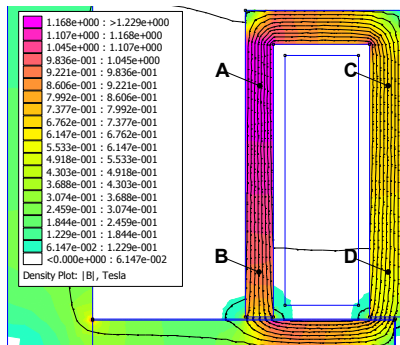
Obliczenia wykonano dla dwóch materiałów ferromagnetycznych (stal 1006, stal S1) o różnych charakterystykach magnesowania (Rys. 3.) Krzywa magnesowania stali 1006 została pobrana z biblioteki programu FEMM. Z kolei charakterystyka stali o oznaczeniu S1 została otrzymana w wyniku pomiarów prób materiału z wykorzystaniem tzw. metody balistycznej [5].





Rys. 3. Krzywe magnesowania wybranych materiałów ferromagnetycznych

Następnie w wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano rozkład pola magnetycznego w łożysku magnetycznym (Rys. 4.). Dla jednakowych wartości prądu 1,5 A w górnym i dolnym elektromagnesie łożyska wykonanego ze stali 1006 uzyskano większą wartość indukcji magnetycznej niż w przypadku stali S1. Wartości indukcji w wyznaczonych punktach pomiarowych zestawiono w tabeli 1.



Rys. 4. Rozkład indukcji magnetycznej w łożysku wykonanym ze stali 1006

Tabela 1. Wartość indukcji magnetycznej w wybranych punktach pomiarowych

Punkt pomiarowy	Stal 1006 B [T]	Stal S1 B [T]
A	1,168	1,052
B	0,922	0,830
C	0,676	0,608
D	0,614	0,553

### 3. OBLICZENIA SIŁY W ŁOŻYSKU MAGNETYCZNYM

Aktywne łożyska magnetyczne należą do grupy aktuatorów gdzie siła magnetyczna może być obliczana i reprezentowana przez tzw. siłę reluktancyjną. Siła reluktancyjna jest otrzymywana z zależności na pracę wirtualną:

$$f = \frac{\partial W}{\partial s} [N] \quad (2)$$

gdzie  $W$  oznacza energię pola magnetycznego, a  $s$  szczelinę powietrzną pomiędzy elektromagnesem a tarczą łożyska [2][4]. Jeśli siłę  $f$  wyprowadzi się

jako funkcję prądu  $I$  w elektromagnesie i szczeliny powietrznej  $s$  to równanie (2) może przyjąć postać:

$$f = \frac{B^2 A_{Fe}}{\mu_0} [N] \quad (3)$$

gdzie:

$$B = \mu_0 \frac{N \cdot I}{\left( \frac{l_{Fe}}{\mu_r} + 2s \right)} [T] \quad (4)$$

w których:  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni,  $\mu_r$  – przenikalność magnetyczna stali,  $N$  – liczba zwoi elektromagnesu,  $l_{Fe}$  – średnia długość obwodu magnetycznego,  $A_{Fe}$  – przekrój poprzeczny rdzenia elektromagnesu [4]. Zazwyczaj dwa elektromagnesy w łożysku magnetycznym pracują w konfiguracji różnicowej w związku z czym siła wypadkowa opisana jest za pomocą wyrażenia:

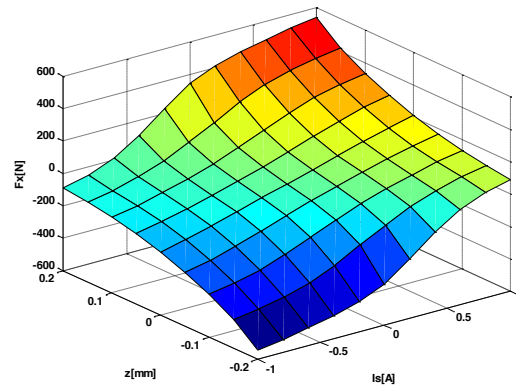
$$F_x = f_1 - f_2 [N] \quad (5)$$

Siła  $F_x$  może być również wyznaczona za pomocą całki, z tensora naprężeń Maxwella  $\overset{\curvearrowright}{T}$  po powierzchni rotora  $\Gamma$ , a mianowicie:

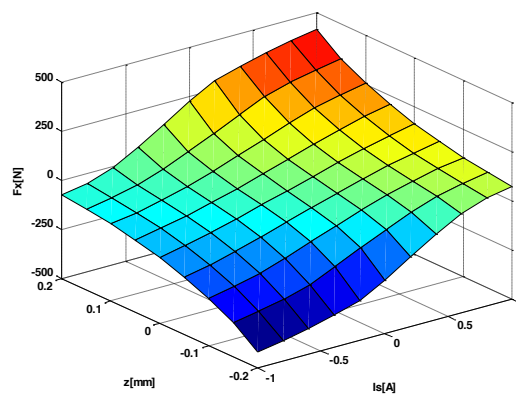
$$\overset{\curvearrowright}{F}_x = \oint_{\Gamma} \overset{\curvearrowright}{T} \cdot d\Gamma [N] \quad (6)$$

Podejście pokazane we wzorze (6) jest wykorzystywane w programie FEMM gdzie siła  $F_x$  jest obliczana za pomocą ważonego wektora naprężeń (postać całkowa wektora naprężeń Maxwella).

Siła reluktancji w zaproponowanym modelu łożyska magnetycznego została policzona w FEMM dla dwóch różnych materiałów, których charakterystyki pokazano na Rys. 3. Ponadto zbadano wpływ położenia tarczy łożyska w osi  $z$  względem elektromagnesu oraz wpływ wartości prądu płynącego w uzwojeniach elektromagnesów na obliczaną siłę. Pozycja tarczy zmieniała się w granicach  $\pm 0,2$  mm natomiast prąd  $I_s$  w granicach  $\pm 1$  A (wokół prądu bazowego równego również 1A) [4]. Wyniki symulacji pokazano na Rys. 5 i Rys. 6.



Rys. 5. Siła obliczona w łożysku ze stali 1006



Rys. 6. Siła obliczona w łożysku ze stali S1

Porównując otrzymane wyniki dla różnych materiałów magnetycznych potwierdza się, że im większa jest przenikalność magnetyczna stali, tym większa jest siła generowana w łożysku. Dla stali S1 uzyskano maksymalnie 419 N natomiast dla stali 1006 aż 543 N.

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w niniejszym opracowaniu wyniki badań pokazują jak ważny jest dobór materiału oraz znajomość jego charakterystyki magnesowania, przy projektowaniu tego typu łożysk magnetycznych. Przyjmując do symulacji charakterystykę magnesowania stali odbiegającą od charakterystyki rzeczywistej materiału (brak informacji na temat materiału lub błędna nota katalogowa) otrzymujemy dużą niezgodność wyników symulacyjnych oraz obliczeń m.in. siły (w tym przypadku różnica wynosi ok.

20%). Powinno to być brane pod uwagę podczas weryfikacji pomiarowej projektowanego łożyska, a w szczególności, gdy występują duże rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarów a wynikami symulacji. W przypadku wątpliwości, czy przyjęta do obliczeń krzywa magnesowania jest poprawna, należy samemu dokonać weryfikacji tej krzywej wykorzystując tzw. metodę balistyczną.

## LITERATURA

- [1] CHIBA A., FUKAO T., ICHIKAWA O., OSHIMA M., TAKEMOTO M., DORRELL D.G.: *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*, Elsevier, Great Britain, 2005.
- [2] SCHWEITZER G., MASLEN E.H.: *Magnetic Bearings. Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [3] MEEKER D.: *Finite Element Method Magnetics Version 4.2, User's Manual*, University of Virginia, USA, 2009.
- [4] GRACA P., MROZEK K.: Influence of Magnetization Curve on the Force Generated in Axial Active Magnetic Bearing, *IEEE International Symposium on Electrodynamics and Mechatronic Systems - (SELM 2013)*, Zawiercie 2013, pp. 89-90.
- [5] GRACA P.: Measurement Of Magnetization Curve In A Steel Probe, *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Seria: Elektryka z.69, nr 350/2013, str.:27-28*.

*Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadre naukową województwa opolskiego.*  
Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



**PAWEŁ MAJEWSKI**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Instytut Automatyki i Informatyki

## **PERFEKCYJNA REKONSTRUKCJA SYGNAŁU Z WYKORZYSTANIEM RACHUNKU WIELOMIANOWO-MACIERZOWEGO**

Streszczenie: W artykule przedstawiono rezultaty prac dotyczących perfekcyjnej rekonstrukcji sygnału spotykanej w transmisji bezprzewodowej, implementującej nierówną liczbę wejść/anten i wyjść/anten. W tym celu wykorzystano rachunek wielomianowo-macierzowy, w szczególności bazującą na faktoryzacji Smitha tzw. *S-inwersję* wielomianową. Przeprowadzone w środowisku *Matlab*<sup>®</sup> badania symulacyjne wskazały na możliwość poprawy przepustowości wspomnianych łączy wielowymiarowych, w kontekście użycia teorii tzw. 'zer sterowniczych'.

### 1. WSTĘP

Bezprzewodowe systemy transmisyjne oparte na układach wieloantenowych są obecnie przedmiotem intensywnych badań w związku z uzyskiwaniem większych przepustowości w stosunku do układów implementujących jedną antenę/wejście i jedną antenę/wyjście [6]. Zastosowanie wielowymiarowości wiąże się jednak z pewnymi problemami. Do głównych należą sprzężenia międzysymbolowe (ISI, *ang.* Inter-Symbol Interference) i sprzężenia międzykanałowe (ICI, *ang.* Inter-Channel Interference) [1,6]. Jednym ze sposobów eliminacji ICI jest zastosowanie faktoryzacji SVD (*ang.* Singular Value Decomposition) dla macierzy opisanych nad ciałem liczbowym [2,3]. Występująca w formie SVD macierz diagonalna usuwa typowe dla problematyki transmisji bezprzewodowej sprzężenia między poszczególnymi kanałami. Można spotkać także rozwiązania oparte na faktoryzacji PSVD (*ang.* Polynomial-SVD) - stosuje się je wykorzystując rachunek wielomianowo-macierzowy [1,2,3]. W niniejszym artykule przeprowadzono zadania perfekcyjnej rekonstrukcji sygnału używając podejścia wielomianowo-macierzowego angażującego *S* - inwersję oraz  $\sigma$  - inwersję wielomianową.

### 2. REPREZENTACJA SYSTEMU

W pracy rozważano układy o  $N_T$ -antenach nadawczych i  $N_R$ -antenach odbiorczych opisanych za pomocą zależności czasowych

$$\mathbf{c}[n] = \begin{bmatrix} c_{1,1}[n] & \cdots & c_{1,N_T}[n] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N_R,1}[n] & \cdots & c_{N_R,N_T}[n] \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

gdzie  $c_{i,k}[n]$  oznaczają relacje pomiędzy  $k$ -tym nadajnikiem oraz  $i$ -tym odbiornikiem. Po zastosowaniu  $Z$ -transformaty analizowany układ można zapisać za pomocą

$$\mathbf{C}(z) = \sum_{n=0}^{L_c-1} \mathbf{c}_n z^{-n} \quad (2.2)$$

gdzie  $(L_c-1)$  jest rzędem wielomianu w formie FIR (*ang.* Finite Impulse Response).

### 3. NOWE PODEJŚCIE DO PROCESU REKONSTRUKCJI SYGNAŁU

W zadaniach perfekcyjnej rekonstrukcji sygnałów zachodzi

$$\mathbf{R} = \mathbf{C} \mathbf{S}, \quad (3.1)$$

gdzie  $\mathbf{R}^{N_R \times 1}$  to wektor sygnałów odebranych,  $\mathbf{S}^{N_R \times 1}$  jest wektorem sygnałów wysłanych, a  $\mathbf{C}_{N_R \times N_T}$  jest macierzą wielomianową charakteryzującą właściwości dynamiczne środowiska. Zakładając  $N_R \geq N_T$  oraz przy znajomości sygnału odebranego  $\mathbf{R}$  otrzymujemy

$$\mathbf{S} = \mathbf{C}^L \mathbf{R}, \quad (3.2)$$

gdzie ' $L$ ' oznacza niejednoznacznie lewostronną inwersję wielomianową. W pracy zaproponowano nowe podejście oparte na  $S$ -inwersji wielomianowej, implementującej nieskończoną liczbę stopni swobody i stwarzającej potencjalnie możliwości poprawy przepustowości bezprzewodowych łączy komunikacyjnych.

Stosując faktoryzację Smitha dla macierzy wielomianowej  $\mathbf{C}$  otrzymujemy [4]

$$\mathbf{C} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}, \quad (3.3)$$

i w konsekwencji

$$\mathbf{C}^L = \mathbf{V}^{-1} \mathbf{\Sigma}^L \mathbf{U}^{-1}. \quad (3.4)$$

Ostatecznie

$$\mathbf{S} = (\mathbf{V}^{-1} \mathbf{\Sigma}^L \mathbf{U}^{-1}) \mathbf{R}, \quad (3.5)$$

gdzie  $\mathbf{V}$  i  $\mathbf{U}$  to wielomianowe macierze unimodularne, a implementująca stopnie swobody macierz  $\mathbf{\Sigma}^L$  jest postaci

$$\mathbf{\Sigma}^L = [\mathbf{D}_{N_T \times N_T} \quad \mathbf{L}_{N_T \times (N_R - N_T)}], \quad (3.6)$$

gdzie  $\mathbf{D} = \mathbf{I}_{N_T}$  w przypadku, gdy układ nie zawiera zer transmisyjnych [4, 5]. Przy zmianie stopni swobody macierzy  $\mathbf{L}$  potencjalnie możemy wpływać na zmianę przepustowości bezprzewodowych łączy komunikacyjnych. Alternatywnie, w celu wyznaczenia  $\mathbf{\Sigma}^L$ , możemy użyć  $\sigma$ -inwersji wielomianowej [4]

$$\mathbf{C}^L = (\mathbf{I}_{N_T} + \mathbf{\beta}_0^L (\mathbf{C} - \mathbf{\beta}))^{-1} \mathbf{\beta}_0^L, \quad (3.7)$$

gdzie  $\beta_0^L = (\beta^T \beta)^{-1} \beta^T$ , a  $\beta$  oznacza stopień swobody.

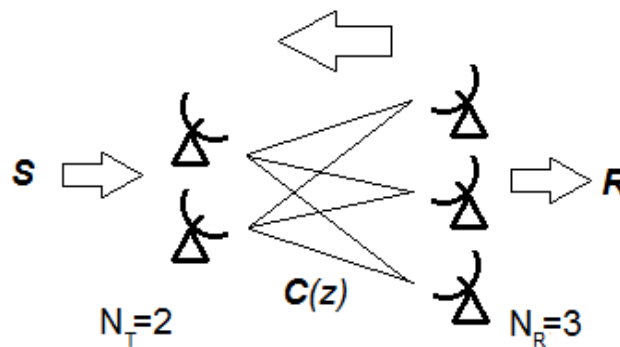
Przy założeniu że  $C(q^{-1})$  jest pełnego normalnego rzędu i  $\beta(q^{-1}) = C(q^{-1})$ ,  $\sigma$ -inwersja sprowadza się do szczególnego przypadku pseudo-inwersji Moore'a-Penrose'a, tj. lewostronnej inwersji minimalnokwadratowej

$$C^L = (C^T C)^{-1} C^T. \quad (3.8)$$

#### 4. PRZYKŁAD SYMULACYJNY

Założmy, że  $C(z)_{N_R=3, N_T=2} = \begin{bmatrix} z - 0.3 & 1.8 \\ 1 & 2z - 0.8 \\ z + 0.7 & 2z + 1 \end{bmatrix}$  [4]. Proces

perfekcyjnej rekonstrukcji sygnału przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Perfekcyjna rekonstrukcja sygnału

Dla  $L = [0 \ 0]$  mamy  $S = [3 \ 4]^T$ , natomiast dla  $L = [1 \ z-3]$  mamy także  $S = [3 \ 4]^T$ . Pomimo różnych wartości macierzy  $L$  w obydwóch przypadkach wystąpiła perfekcyjna rekonstrukcja sygnału. Potencjalnie, stopnie swobody wpływają na przepustowość i energię procesu wspomnianej rekonstrukcji. Zagadnienie to będzie eksplorowane w przyszłych badaniach prowadzonych w ramach pracy doktorskiej.

#### LITERATURA

- [1] AKHLAGHI I.A., KHOSHBIN H.: A Novel Method for Singular Value Decomposition of Polynomial Matrices and ICI Cancellation in a Frequency-Selective MIMO Channel, International Journal of Tomography & Statistics, vol. 11, No. S09, pp. 83, 2009.
- [2] FOSTER J.A., MCWHIRTER J.G.: An Algorithm for Calculating the QR and Singular Value Decompositions of Polynomial Matrices, IEEE Transactions on Signal Modeling, vol. 58, No. 3, pp. 1263-1264, 2010.

- [3] FOSTER J.A.: Algorithms and Techniques for Polynomial Matrix Decompositions, Ph.D Thesis, Cardiff University, 2008.
- [4] HUNEK W. P.: Towards a General Theory of Control Zeros for LTI MIMO Systems, Opole University of Technology Press, Opole, Poland, 2011.
- [5] LATAWIEC K.J.: The Power of Inverse Systems in Linear and Nonlinear Modeling and Control, Opole University of Technology Press, Opole 2004.
- [6] MORET N., TONELLO A., WEISS S.: MIMO Precoding for Filter Bank Modulation Systems Based on PSVD, Proc. of the 73rd IEEE, Vehicular Technology Conference, 2011.



**ARTUR PALA**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Instytut Automatyki i Informatyki

## **ANALIZA EFEKTYWNOŚCI ALGORYTMU ROZWIĄZYWANIA UKŁADÓW RÓWNAŃ RÓŻNICZKOWYCH ZWYCZAJNYCH DLA PLATFORMY NVIDIA CUDA**

**Streszczenie:** Artykuł prezentuje sposób realizacji, oraz ocenę wydajności równoległego rozwiązywania układów równań różniczkowych zwyczajnych na platformie Nvidia CUDA. Opracowano algorytm uwzględniający heterogeniczny model przetwarzania danych w technologii Nvidia CUDA, oraz jej masowo-równoległą architekturę. Algorytm wykorzystuje założenia koncepcji podziału układu równań na poszczególne równania lub grupy równań w zależności od ilości dostępnych rdzeni. Przeprowadzono badania wydajności algorytmu. Uzyskane tą drogą wyniki pomiarów, oraz ich analiza zostały zawarte w niniejszym artykule.

### 1. WPROWADZENIE

Wydajność obliczeniowa współczesnych procesorów CPU (ang. *Central Processing Unit*) zależy głównie od ilości rdzeni, która determinuje możliwy do osiągnięcia stopień zrównoleglenia algorytmów. Dlatego też producenci CPU podążają śladem firm projektujących układy graficzne GPU (ang. *Graphics Processing Unit*), które z założenia są układami wielordzeniowymi. Niemniej jednak rozwiązywanie dużych układów równań różniczkowych zwyczajnych (ODE - *Ordinary Differential Equations*) stanowi nadal spore wyzwanie dla najnowszych układów CPU, których architektura zakłada przetwarzanie równoległe, lecz nadal na niewielką skalę. Różnice pomiędzy architekturami obu układów najlepiej przedstawić jako porównanie jednego z czołowych procesorów firmy Intel, z kartą obliczeniową firmy Nvidia opartą na architekturze Kepler. Podczas gdy procesor Intel Core i7 3970X oferuje 6 rdzeni [4], karta obliczeniowa Tesla K10 oparta na dwóch GPU oferuje aż 3072 rdzenie obliczeniowe [6]. Chcąc jednak zastosować architekturę masowo-równoległą do rozwiązywania układów ODE należy opracować algorytmy zupełnie odmienne od tych, które dobrze sprawdzały się w przetwarzaniu sekwencyjnym. Według przedstawionych w literaturze koncepcji, układy ODE można rozwiązywać stosując równoległą organizację obliczeń, jednocześnie bazując na istniejących już sekwencyjnych metodach numerycznych [1][8][2].

### 2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Przeznaczeniem prezentowanego w niniejszym artykule algorytmu równoległego jest numeryczne rozwiązywanie układów ODE. Rozpatrywać

zatem będziemy rozwiązywanie zagadnienia Cauchy'ego (zagadnienia początkowego) dla układu równań w postaci danej wzorem (1) [5].

$$\begin{aligned}x'_i(t) &= f_i(t, x_1, \dots, x_n), i = 1, 2, \dots, n \\x_i(t_0) &= x_{i0}\end{aligned}\quad (1)$$

gdzie:

$x_i(t_0)$  – warunek początkowy

$R \ni t$  – zmienna niezależna

$x_1, \dots, x_n$  – szukane funkcje rzeczywiste (lub zespolone)

$f_i: R^{n+1} \rightarrow R$  ( $i = 1, \dots, n$ ) – zadane funkcje.

Numeryczne rozwiązywanie tego typu równań z warunkiem początkowym polega na cyklicznym wyznaczaniu wartości szukanych funkcji w kolejnych chwilach czasu należących do przedziału  $\langle t_0, t_N \rangle$  zwanego przedziałem całkowania, gdzie  $(t_0, x_{i0})$  jest punktem startowym.

Istnieje wiele dobrze znanych sekwencyjnych metod numerycznych rozwiązywania ODE. W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną jednak tylko te spośród nich, które uwzględnione zostały w pomiarach wydajności opracowanego algorytmu równoległego.

Jedną z najprostszych jest metoda Eulera, która jednocześnie jest obciążona dużym błędem całkowania, co czyni ją również najmniej dokładną. Niemniej jednak zaletą tej metody jest prostota jej implementacji. Algorytm metody Eulera wyrażony został wzorem (2) [3].

$$x_{i+1} = x_i + h \cdot f(x_i, t_i) \quad (2)$$

gdzie :

$i$  - licznik iteracji,  $i = 1, 2, \dots, N$

$N$  - przyjęta liczba kroków całkowania

$h$  - krok całkowania,  $h = \frac{(t_N - t_0)}{N}$

$f(x_i, t_i)$  - funkcja prawej strony równania

Przyjęte powyżej oznaczenia są właściwe również dla pozostałych metod prezentowanych w niniejszym rozdziale.

Kolejną, dobrze znaną sekwencyjną metodą numeryczną rozwiązywania ODE, jest metoda Rungego-Kutty II rzędu. W rzeczywistości jednak istnieje cała klasa tego typu metod, z których najczęściej spotykane to: metoda punktu pośredniego, oraz metoda Huena, której algorytm wyrażony został wzorem (3) [3].

$$x_{i+1} = x_i + \frac{1}{2} (k_1 + k_2) \quad (3)$$

gdzie:

$$k_1 = h \cdot f(x_i, t_i)$$

$$k_2 = h \cdot f(x_i + k_1, t_i + h)$$

Najbardziej znaną oraz najczęściej stosowaną z rodziny metod Rungego-Kutty jest metoda rzędu IV. Metoda ta zapewnia dobrą dokładność obliczeń przy stosunkowo dużej wartości kroku całkowania. Za wadę tej metody można uznać konieczność czterokrotnego obliczania funkcji prawej strony równania różniczkowego w czasie każdego kroku całkowania. Ponadto wartości te nie są już wykorzystywane w żadnych dalszych obliczeniach. Algorytm metody wyrażony został wzorem (4) [3].

$$x_{i+1} = x_i + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (4)$$

gdzie:

$$k_1 = h \cdot f(x_i, t_i)$$

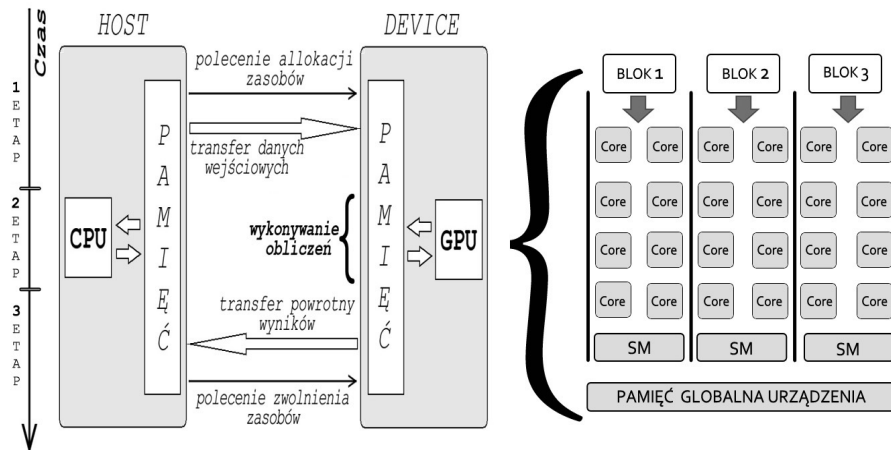
$$k_2 = h \cdot f(x_i + k_1/2, t_i + h/2)$$

$$k_3 = h \cdot f(x_i + k_2/2, t_i + h/2)$$

$$k_4 = h \cdot f(x_i + k_3, t_i + h)$$

### 3. OPIS REALIZACJI ALGORYTMU

Opracowano algorytm rozwiązywania układów ODE przy wykorzystaniu technologii Nvidia CUDA. Algorytm wykorzystuje założenia koncepcji podziału układu równań na poszczególne równania bądź grupy równań w zależności od ilości dostępnych rdzeni. Pracę algorytmu można podzielić na trzy etapy (Rys. 1). Pierwszy etap realizowany jest po stronie hosta i obejmuje między innymi, alokację pamięci urządzenia CUDA, kopiowanie danych do pamięci urządzenia, oraz podział układu równań na równania lub grupy równań. Etap drugi realizowany jest po stronie urządzenia CUDA i obejmuje równoległą realizację obliczeń oraz operacje synchronizacji i komunikacji między poszczególnymi wątkami obliczeniowymi w każdym kroku całkowania.

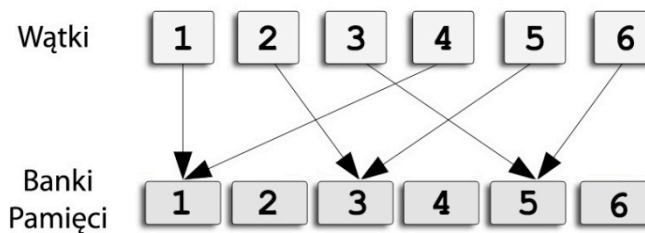


Rys. 1. Heterogeniczny model pracy algorytmu rozwiązywania układów ODE, na platformie Nvidia CUDA (opracowanie własne)

Każdy z wątków realizuje obliczenia wykorzystując jedną ze znanych sekwencyjnych metod numerycznych. Etap trzeci realizowany jest po stronie hosta i obejmuje kopiowanie wyników z pamięci urządzenia CUDA do pamięci hosta, oraz zwalnianie zasobów urządzenia CUDA.

#### 4. OGRANICZENIA SPRZĘTOWE ORAZ KONCEPCYJNE

Poszczególnym grupom równań odpowiadają grupy wątków, zwane blokami. Wszystkie dostępne rdzenie GPU również podzielone są na grupy, zwane multiprocessorami. Poszczególne bloki wątków pracują na odrębnych multiprocessorach, a komunikacja między nimi jest ograniczona, i musi odbywać się za pośrednictwem pamięci globalnej urządzenia CUDA. Pamięć globalna charakteryzuje się jednak stosunkowo długim czasem dostępu do danych. Oprócz pamięci globalnej urządzenie CUDA posiada również bardzo szybką pamięć współdzieloną, która umieszczona jest fizycznie wewnątrz układu GPU. Pamięć współdzielona oznaczona została jako SM (Rys. 1.) Pamięć ta dostępna jest jednak tylko dla wątków pracujących w tym samym bloku, a więc w obrębie jednego multiprocessora. Ponadto dostęp do poszczególnych banków pamięci współdzielonej odbywa się na specjalnych zasadach, ze względu na możliwość wystąpienia konfliktów pomiędzy wątkami [7]. Ze względu na założenia koncepcji podziału na poszczególne równania oraz równoległe ich rozwiązywanie, operacje synchronizacji i komunikacji między wątkami obliczeniowymi występują wielokrotnie w każdym kroku całkowania, generując wiele konfliktów dostępu. Typowy konflikt pojawia się wówczas gdy wątki dublują swoje żądania dostępu do wartości zmiennych obliczonych przez inne wątki (Rys. 2.). Ogranicza to w znacznym stopniu możliwość wykorzystania pamięci współdzielonej.



Rys. 2. Konflikty pomiędzy wątkami dublującymi żądania dostępu do banków pamięci współdzielonej (opracowanie własne na podstawie [7])

Mimo istniejącego ograniczenia algorytm wykorzystuje częściowo pamięć współdzieloną, przechowując w niej odpowiadające poszczególnym wątkom wiersze macierzy współczynników. Ogranicza to w dużym stopniu liczbę odwołań do pamięci globalnej urządzenia CUDA, podczas obliczania wartości funkcji prawej strony równania w kolejnych krokach całkowania.

## 5. POMIARY CZASU PRACY ALGORYTMU

### *5.1. Sposób realizacji pomiarów*

W celu oceny wydajności algorytmu napisane zostało oprogramowanie generujące równania, oraz wykonujące obliczenia. Obliczenia realizowane są zarówno przy użyciu sekwencyjnych metod numerycznych na procesorze CPU, oraz przy użyciu algorytmów równoległych na urządzeniu CUDA. Przeprowadzono pomiary czasu pracy algorytmów sekwencyjnych oznaczonych literą S, algorytmów równoległych oznaczonych literą R, oraz algorytmów równoległych wykorzystujących szybką pamięć współdzieloną, oznaczonych literami RSM (Tab. 1). Wyniki pomiarów przedstawiono w ujęciu trzech przypadków, z których każdy opierał się na wykorzystaniu metod numerycznych Eulera, Rungego-Kutty II rzędu, oraz Rungego-Kutty IV rzędu. Platformę pomiarową stanowił komputer: CPU: AMD 64 X3 3,3GHz, ilość pamięci operacyjnej 4 GB, Urządzenie CUDA: GeForce 650 GTX Ti, system operacyjny Windows 7 (wersja systemu 64 bit).

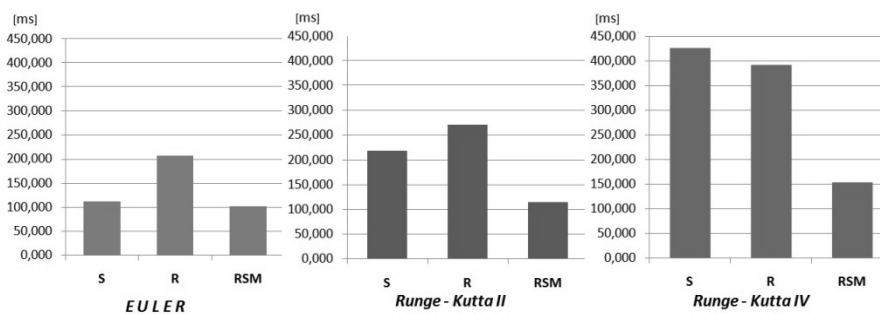
### *5.2. Wybrane wyniki pomiarów*

Wszystkie wartości czasu uzyskane z pomiarów podane zostały w milisekundach. Dokładne zestawienie wartości czasów wszystkich prezentowanych pomiarów, w ujęciu trzech przypadków zawiera tabela 1.

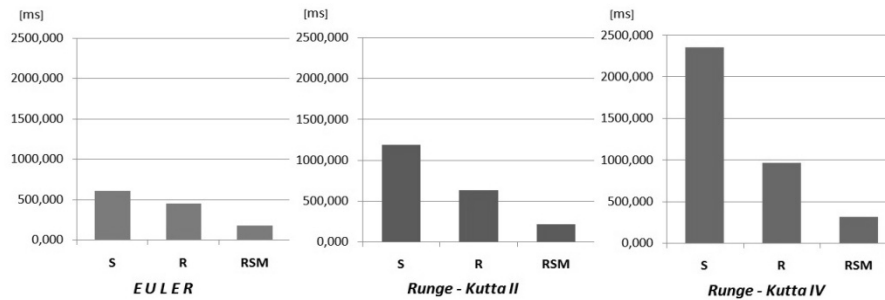
*Tabela 1 - szczegółowe zestawienie wyników pomiarów czasu w milisekundach*

Przypadek	Rodzaj Algorytmu	Ilość Wątków / Równań	Zastosowana sekwencyjna metoda numeryczna		
			Eulera	Rungego-Kutty II	Rungego-Kutty IV
1	S	1 / 120	111,996	219,104	425,268
	R	120 / 120	208,041	272,026	391,762
	RSM	120 / 120	101,938	114,935	152,755
2	S	1 / 300	608,769	1189,509	2356,308
	R	300 / 300	450,227	627,876	965,058
	RSM	300 / 300	183,231	215,200	311,949
3	S	1 / 50	32,227	51,996	86,111
	R	50 / 50	90,130	113,960	138,729
	RSM	50 / 50	75,047	79,087	88,192

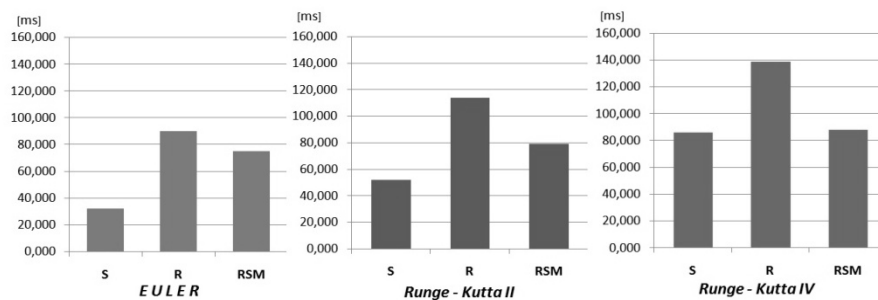
Dla wszystkich przypadków liczba kroków całkowania wynosiła 1000. Przeprowadzono również pomiary uwzględniające zmianę liczby kroków całkowania dla wszystkich przypadków. Nie wpłynęło to jednak znacząco na proporcje pomiędzy czasami pracy poszczególnych algorytmów. Znotowano jedynie zmieniający się rząd wielkości uzyskiwanych wyników. W przypadku pierwszym (Rys. 3) algorytm równoległy (R) uzyskuje przewagę nad sekwencyjnym (S) jedynie dla metody Rungego-Kutty IV rzędu, będąc szybszym o około 7%. Algorytm równoległy wykorzystujący pamięć współdzieloną (RSM) był szybszy od sekwencyjnego (S) dla wszystkich metod numerycznych. Ponadto dla metody Rungego-Kutty IV rzędu (RSM) był szybszy od (R) o około 61%. W przypadku 2 natomiast (Rys. 4), algorytm równoległy (R) pracował szybciej od sekwencyjnego (S) dla każdej z zastosowanych metod numerycznych. Ponadto dla metody Rungego-Kutty IV rzędu (R) był szybszy od (S) o około 41%, natomiast (RSM) był szybszy od (R) o około 68%. Przypadek trzeci (Rys. 5) przedstawia sytuację niekorzystną z punktu widzenia efektywności algorytmu równoległego. Dla wszystkich metod numerycznych algorytmy (R) oraz (RSM) pracują dłużej od swoich sekwencyjnych odpowiedników (S).



Rys. 3. Zestawienie czasów podanych w milisekundach dla układu 120 równań



Rys. 4. Zestawienie czasów podanych w milisekundach dla układu 300 równań



Rys. 5. Zestawienie czasów podanych w milisekundach dla układu 50 równań

## 6. WNIOSKI

Wyniki pomiarów (tab. 1) wskazują iż opracowany algorytm równoległego rozwiązywania układów ODE, przynosi wymierne korzyści w postaci znacznego przyspieszenia obliczeń względem algorytmów sekwencyjnych gdy spełnione są określone kryteria. Pierwszym z nich jest zastosowanie metody numerycznej o odpowiednio dużej złożoności obliczeniowej. Dobrze ilustruje to rysunek 3, gdzie zaobserwować można, iż opłacalność równoległej realizacji obliczeń pojawiła się dopiero w przypadku zastosowania metody Rungego-Kutty IV rzędu. Opłacalność jest tym większa im większa jest złożoność obliczeniowa zastosowanej metody numerycznej. Drugi aspekt mający wpływ na przyspieszenie obliczeń to stopień zrównoleglenia determinowany wprost przez ilość równań w układzie. Zrównoleglenie na poziomie 300 wątków (Rys. 4), powoduje iż algorytm równoległy pracuje szybciej od sekwencyjnego dla każdej z rozpatrywanych metod numerycznych. Kolejnym aspektem mającym wpływ na wydajność pracy algorytmu jest umiejętne wykorzystanie potencjału pamięci współdzielonej, pozwalającej znacznie skrócić czas dostępu do danych. Pozostaje jednak przypadek 3 (Rys. 5), który ukazuje słabe strony algorytmu. Zbyt małe zrównoleglenie obliczeń powoduje iż algorytm nie jest w stanie wykorzystać równoległego potencjału technologii Nvidia CUDA. Przypadek 3 wskazuje

zatem na konieczność opracowania alternatywnego algorytmu opartego na innej koncepcji zrównoleglenia obliczeń.

#### LITERATURA

- [1] BURRAGE K.: Parallel and Sequential Methods for Ordinary Differential Equations. Clarendon Press, Oxford, 1995
- [2] GEAR C.W.: Massive Parallelism Across Space in ODEs. Applied Numerical Mathematics 11, 1993
- [3] HAPRA S.C., CANALE R.P.: Numerical Methods for Engineers, The McGraw-Hill Companies 2011
- [4] INTEL CORPORATION: Intel Core i7 Extreme Edition Desktop Processor Comparison Chart, Intel Corporation 2012
- [5] NIEDOBA J., NIEDOBA W.: Równania różniczkowe zwyczajne i cząstkowe, Wydawnictwa AGH, Kraków 2001
- [6] NVIDIA CORPORATION: Nvidia Tesla Kepler GPU Computing Accelerators, Nvidia Corporation 2012
- [7] NVIDIA CORPORATION: Nvidia CUDA Programming Guide, Nvidia Corporation 2012
- [8] PETCU D.: Parallelism in Solving Ordinary Differential Equations. Mathematical Monographs 64, Timisoara University Press, 1998

#### EFFICIENCY ANALYSIS OF THE ALGORITHM FOR SOLVING SYSTEMS OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS FOR NVIDIA CUDA PLATFORM

Abstract: This paper presents the method of implementation, and evaluation of performance parallel algorithm for solving systems of ordinary differential equations for the NVIDIA CUDA platform. The algorithm was developed taking into account the heterogeneous data model in Nvidia CUDA technology, and its massively parallel architecture. The algorithm uses the concept of division of the system of equations for each group of equations or equations based on the number of available cores. Algorithm performance was measured. Obtained in this way the measurement results and their analysis are included in this paper.



**ARTUR PALA**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Instytut Automatyki i Informatyki

## **ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA TECHNOLOGII NVIDIA CUDA DO ROZWIĄZYWANIA UKŁADÓW RÓWNAŃ RÓŻNICZKOWYCH ZWYCZAJNYCH**

**Streszczenie:** Artykuł zawiera analizę wybranych koncepcji dotyczących równoległego rozwiązywania układów równań różniczkowych zwyczajnych, w kontekście badań nad opracowaniem odpowiednich algorytmów dla technologii obliczeń masowo równoległych Nvidia CUDA. Przeprowadzono wstępną implementację jednej z omawianych koncepcji na wielordzeniowym procesorze CPU (ang. Central Processing Unit). Uzyskane tą drogą wyniki pomiarów czasu obliczeń, oraz ich dokładna analiza zostały zawarte w niniejszym artykule.

### 1. WPROWADZENIE

Technologia obliczeniowa Nvidia CUDA bazuje na układach graficznych GPU (ang. *Graphics Processing Unit*) o masowo równoległej architekturze, w której zaimplementowano mechanizm lekkich wątków. Dzięki wymienionym cechom technologia umożliwia osiągnięcie bardzo dużych wydajności obliczeniowych. Według materiałów promocyjnych Nvidia wydajności produkowanych obecnie GPU sięgają nawet do 2288 Gigaflopsów dla pojedynczego układu zbudowanego z 1536 rdzeni wykonawczych. Dla pojedynczej karty obliczeniowej Tesla K10 zawierającej aż dwa takie układy GPU oparte na architekturze Kepler, całkowita wydajność szczytowa w obliczeniach pojedynczej precyzji wynosi zatem 4,58 Teraflopsa [1]. Nvidia podaje iż zastosowanie GPU przynosi realny wzrost wydajności systemu w zadaniach obliczeniowych średnio od 10 do 100 razy [2]. Charakter procesów obliczeniowych realizowanych w obrębie technologii Nvidia CUDA powoduje iż nadaje się ona do implementacji bardzo specyficznej grupy algorytmów charakteryzujących się dużym stopniem zrównoleglenia, dużą złożonością obliczeniową oraz operowaniem na relatywnie dużych zbiorach danych. Cechami wspólnymi istniejących metod numerycznych rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych – ODE (ang. Ordinary Differential Equations) są sekwencyjna natura oraz wynikający z niej relatywnie duży koszt obliczeniowy. Poprawę wydajności obliczeniowej w tego typu zadaniach można uzyskać jedynie stosując systemy o architekturze równoległej [3]. Nietrywialnym problemem jest wówczas konieczność opracowania algorytmów uwzględniających nierzadko skomplikowany model przetwarzania danych, wynikający z architektury docelowego systemu równoległego. Prezentowane w literaturze [4][5][6] wyniki badań nad możliwościami równoległego rozwiązywania układów ODE pozwoliły na dokonanie analizy tego problemu w kontekście technologii Nvidia CUDA.

## 2. WYBRANE KONCEPCJE RÓWNOLEGŁEGO ROZWIĄZYWANIA UKŁADÓW ODE W KONTEKSCIE TECHNOLOGII NVIDIA CUDA

Większość prezentowanych w literaturze koncepcji równoległego rozwiązywania układów ODE, oferujących odpowiednio duży z punktu widzenia zastosowania technologii Nvidia CUDA stopień zrównoleglenia obliczeń, bazuje na wykorzystaniu znanych metod sekwencyjnych. Jedną z takich idei zakłada dekompozycję przedziału całkowania na szereg podprzedziałów stanowiących odrębne problemy, z których każdy może być rozwiązywany niezależnie jedną ze znanych metod sekwencyjnych. Idea ta była ostatnio rozwijana w pracy [3] pod nazwą Metody Spekulacyjnej, w której zastosowano między innymi metodę Rungego-Kutty IV rzędu. W metodzie zakładany jest duży stopień zrównoleglenia ograniczony jedynie liczbą procesorów co klasyfikuje ją do badań nad możliwościami implementacji w technologii Nvidia CUDA. Alternatywna idea zakłada dekompozycję układu równań różniczkowych na bloki równań, bądź pojedyncze równania, które mogą być obliczane równoległe. Idea ta nie daje wprawdzie tak dużych możliwości zrównoleglenia jak Metoda Spekulacyjna ponieważ jest to ograniczone ilością równań różniczkowych układu. Jednakże zakłada ona mniejszy koszt obliczeniowy i może okazać się wydajniejsza od Metody Spekulacyjnej w przypadku gdy liczba równań układu znacząco przekracza liczbę dostępnych rdzeni wykonawczych GPU. Wszelkie koncepcje zakładające równoległość na poziomie samej metody numerycznej zostały odrzucone ze względu na zbyt mały stopień zrównoleglenia, uniemożliwiający tym samym pełne wykorzystanie potencjału technologii Nvidia CUDA.

## 3. WSTĘPNE POMIARY ZREALIZOWANE NA RÓWNOLEGŁYM CPU

### *3.1. Sposób realizacji pomiarów*

W celu oceny rzeczywistego potencjału koncepcji zakładającej dekompozycję układu równań na bloki bądź pojedyncze równania, opracowane zostało oprogramowanie stanowiące implementację tej idei dla wielordzeniowego CPU. Oprogramowanie umożliwia generowanie układów o dowolnej liczbie liniowych równań różniczkowych zwyczajnych. W oprogramowaniu zaimplementowano sekwencyjne metody Eulera, Rungego-Kutty II rzędu, Rungego-Kutty IV rzędu, oraz bazujące na nich implementacje równoległe. Przeprowadzone pomiary dotyczą czasu pracy zarówno sekwencyjnych jak i równoległych wersji algorytmów. Platformę pomiarową stanowił komputer o następującej konfiguracji: CPU: Intel Core i7 2630qm, ilość pamięci operacyjnej 6 GB, system operacyjny Windows 7 (64 bit).

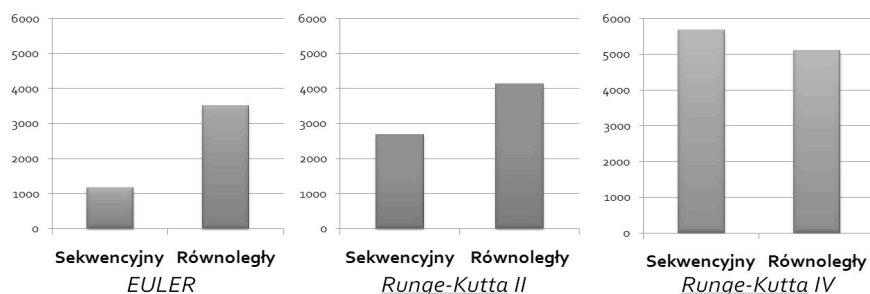
### *3.2. Wybrane wyniki pomiarów*

Wszystkie wartości czasu uzyskane z pomiarów podane zostały w milisekundach. Dokładne zestawienie wartości czasów wszystkich prezentowanych pomiarów, w ujęciu czterech przypadków zawiera tabela 1.

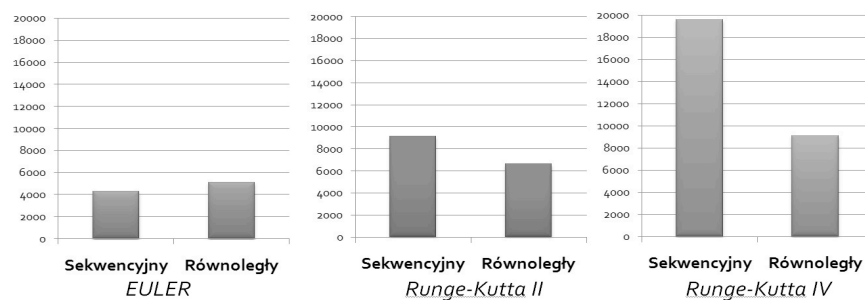
*Tabela 1 - szczegółowe zestawienie wyników pomiarów czasu w milisekundach*

Przypadek		1	2	3	4
Rodzaj implementacji algorytmu		S	R	S	R
Stopień zrównoleglenia		1 wątek	4 wątki	1 wątek	8 wątków
Ilość równań w układzie		4	4	8	8
Zastosowana sekwencyjna metoda numeryczna	Euler	1173,19	3514,93	4272,49	5096,49
	Runge-Kutta II	2683,53	4134,8	9163,2	6666,19
	Runge-Kutta IV	5672,61	5104,58	19558,8	9091,37

Dwa pierwsze przypadki w tabeli stanowią zestawienie wyników pomiarów czasu rozwiązywania układu 4 równań różniczkowych, odpowiednio dla sekwencyjnych (S) oraz równoległych (R) implementacji algorytmów: Eulera, Rungego-Kutty II rzędu oraz Rungego-Kutty IV rzędu. Analogiczne zestawienie stanowią przypadki 3 i 4, z tą różnicą że rozwiązywany był układ 8 równań. Ilość kroków całkowania dla wszystkich przypadków była jednakowa i wynosiła 10 000 000. Dla przypadków 1 i 2 czasy realizacji algorytmów sekwencyjnych i równoległych zestawiono na rysunku (Rys. 1)

*Rys. 1. Zestawienie czasów podanych w milisekundach dla układu 4 równań*

Dla przypadków 3 i 4 czasy realizacji algorytmów sekwencyjnych i równoległych zestawiono na rysunku (Rys. 2)

*Rys. 2. Zestawienie czasów podanych w milisekundach dla układu 8 równań*

#### 4. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych pomiarów (tab. 1) jednoznacznie wskazują iż na opłacalność równoległego rozwiązywania układów ODE, przy wykorzystaniu koncepcji bazującej na dekompozycji układu na poszczególne równania, mają wpływ dwa kluczowe aspekty. Pierwszym z nich jest zastosowanie metody numerycznej o odpowiednio dużej złożoności obliczeniowej. Dobrze ilustruje to rysunek 1, gdzie zaobserwować można iż opłacalność równoległej realizacji obliczeń pojawiła się dopiero w przypadku zastosowania metody Rungego-Kutty IV rzędu. Opłacalność jest tym większa im większa jest złożoność obliczeniowa zastosowanej metody numerycznej. Drugim aspektem mającym wpływ na opłacalność zastosowania algorytmu równoległego jest stopień jego zrównoleglenia. Dobrze ilustruje to rysunek 2, na którym zaobserwować można iż w przypadku stopnia zrównoleglenia rzędu 8 wątków, pojawiła się opłacalność zastosowania algorytmu równoległego bazującego na metodzie Rungego-Kutty II rzędu. Istnieje zatem realna możliwość poprawy wydajności metod rozwiązywania układów równań różniczkowych zwyczajnych dzięki zastosowaniu masowo równoległego przetwarzania.

#### LITERATURA

- [1] NVIDIA CORPORATION: Nvidia Tesla Kepler GPU Computing Accelerators, Nvidia Corporation 2012
- [2] NVIDIA CORPORATION: Nvidia Tesla GPU Computing, Nvidia Corporation 2010
- [3] J. FORENC: Analiza spekulacyjna stanów nieustalonych w układach elektrycznych, Rozprawa doktorska, Politechnika Białostocka 2006
- [4] K. BURRAGE: Parallel and Sequential Methods for Ordinary Differential Equations. Clarendon Press, Oxford, 1995
- [5] D. PETCU: Parallelism in Solving Ordinary Differential Equations. Mathematical Monographs 64, Timisoara University Press, 1998
- [6] C.W. Gear: Massive Parallelism Across Space in ODEs. Applied Numerical Mathematics 11, 1993

### STUDY INTO USE NVIDIA CUDA TECHNOLOGY FOR SOLVING SYSTEMS OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS

Abstract: This paper presents an analysis of selected concepts for parallel solving systems of ordinary differential equations in the context of research on the development of algorithms for NVIDIA CUDA technology. Completed the implementation of one of these concepts for multi-core processor CPU. The measurement results are presented in this paper.

**PETR PĚTVALDSKÝ, PETR BILÍK**  
VŠB-TU Ostrava, FEI

## **TESTING GAPLESS MEASUREMENT OF PQA ACCORDING TO IEC 62586-2**

**Abstract:** This paper describes a tester for automated testing of power quality analyzers, focuses on evaluation of correct gapless and non-overlapping measurement according to standard IEC 62586-2[1]. A test is used in order to verify the accuracy of the basic time window for evaluating RMS voltage values (10/12 cycle), and to evaluate whether during the measurements RMS samples (gapless) are not lost and mutual overlaps of individual cycles are not produced. The tester is based on principles of virtual instrumentation. The testing hardware uses PXI system architecture and the software is made in NI LabVIEW programming environment.

### 1. INTRODUCTION

Due to large expansion of renewable energy resources in distribution grid, occurrence of disturbances in the power system has been increasing during few last years. It leads to degradation of power quality in power system. Therefore, long-term monitoring and evaluation of power quality is becoming increasingly important not only for electricity distributors but also for European regulators and customers.

With regard to these facts, systems for measurement and analysis of power quality are being increasingly used in different places of power system. Although the requirements for evaluation of power quality are described in IEC 61000-4-30[2], testing equipment for power quality analyzer testing is not currently available. Last year (2012) a new international standard IEC 62586-2 [1] was published which describes new demands for testing power quality analyzers.

The Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, VSB-Technical University of Ostrava is currently developing fully automated equipment that would be able to test devices which measure the power quality. This paper is focused on the description of testing correct gapless and non-overlapping measurement.

### 2. GAPLESS (NON-OVERLAPING) MEASUREMENT

PQ analyzers compute RMS values from the basic measurement interval of 10/12 cycles ( 10 cycles at the signal frequency 50 Hz and 12 cycles for the frequency of 60 Hz ) which is in both cases 200ms time period. These values are then aggregated to continue the calculations for the following three periods:

- 150/180-cycles interval
- 10-minute interval
- 2-hour interval

Individual intervals should be connected to each other (gapless) and should not overlap, apart from exceptions in the time synchronization every 10 minutes. Last 10/12 cycles interval in 10-minute intervals usually overlaps over the next 10/12 cycles interval, this interval is then included in the aggregation of the previous 10-minute interval - as Figure 1 illustrates:

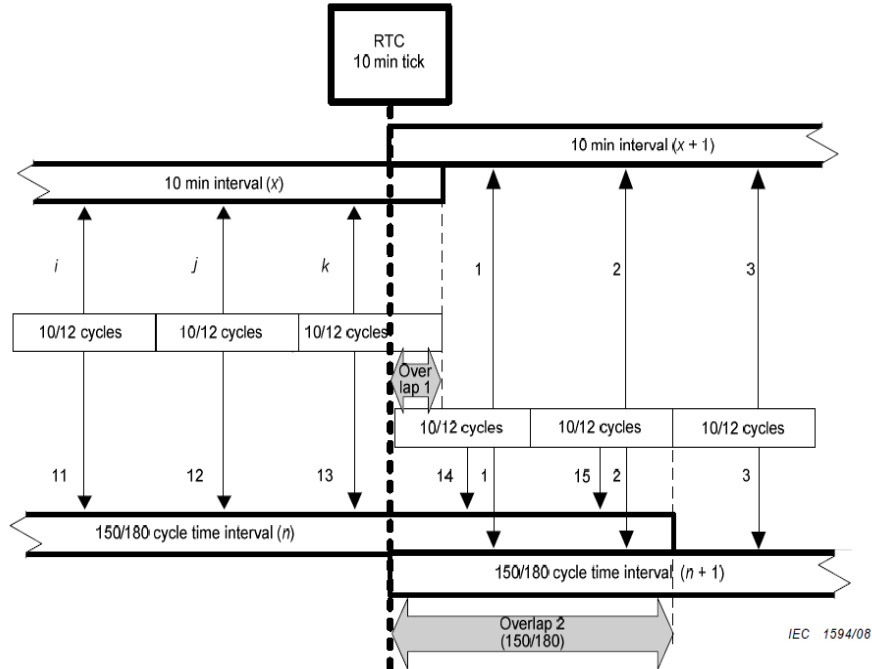


Figure 1. 10-minute interval synchronization [2].

The exact timing of each interval and the synchronization is not an easy task. Thus there is a suspicion that some power quality analyzers manufacturers can simplify the measuring algorithm, so that an incorrect implementation is not visible at first sight. An example of incorrect implementation (Figure 2) of 10/12 cycles measurements can be using a moving window of exact length 200ms (or even greater than 200ms) although it is required that the RMS values should evaluate for the 10/12 cycles (a frequency deviation from the 50/60Hz cause inaccuracies).

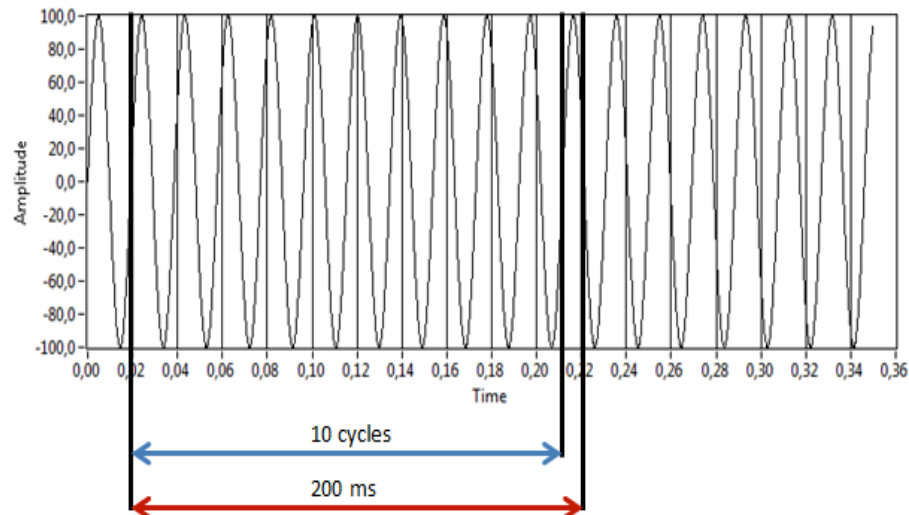


Figure 2. Example of incorrect 10/12 cycles measurement.

### 3. TEST HARDWARE DESCRIPTION

In terms of hardware the test system consists of a control computer which is running the test software, which will be described in the next chapter.

The control computer is present here as a PC based device in PXI chassis (PCI eXtensions for Instrumentation). PXI system, which is a part of the tester is marked NI PXI 1033. It is a standard PXI chassis, which can be fitted with up to five extension modules.

Only one expansion module is used and it is a multifunction NI PXI 6733 card, which allows generating analog output signals with sampling frequency up to 1MS/s. The card is equipped with D/A converter with 16-bit resolution.

With this multifunction card signals are generated for particular tests, as prescribed by the standard. This card, however, allows generating signals only in the range of -10V to +10 V. Therefore the generated signal is amplified by power amplifiers to the level of 65V, which corresponds to the declared input voltage range of a tested power quality analyzer. Thus, the amplified signals for all the three phases can then be routed to the measuring inputs of the power quality analyzer. For purposes of this particular test part usage of only one phase was sufficient.

In Figure 3 below, please see the photography of the real test system, which is stored in mobile 19" rack.



Figure 3. Photography of test system.

#### 4. TEST DESCRIPTION

For testing the correct evaluation of the RMS amplitude, the device under test must be tested with fluctuating signal of fundamental frequency with the following parameters:

- Sinusoidal modulation
- Basic harmonic component: 100%  $U_{din}$
- Modulation depth +/- 10%
- Modulation frequency: 2,3Hz

Signal can be mathematically expressed as follows:

$$s_{RMS}(t) = V_1 \sqrt{2} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) (1 + A_m \cos(2\pi f_m t + \varphi_m)) \quad (1)$$



With the above parameters for the voltage  $U_{din}$  230 V signal would be as shown in Figure 4.

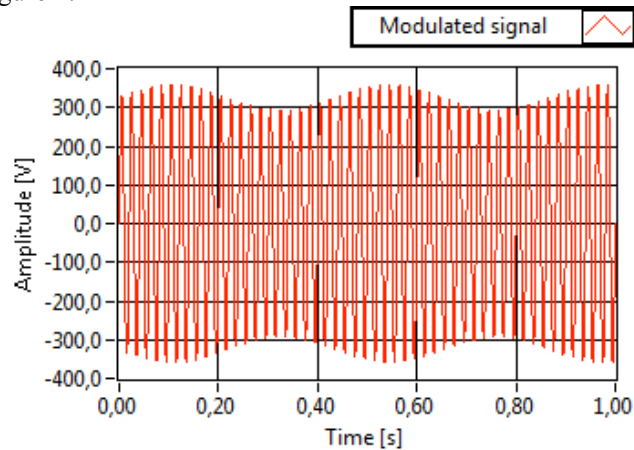


Figure 4. Modulated (testing) signal

In this ideal case (theoretical simulation) the fluctuation frequency is exactly 2.3 Hz. It is now relatively easy to detect gaps or overlaps during measurement using FFT transformation. The spectrum is calculated from the relative (measured RMS value to  $U_{din}$ ) RMS values (array of 100 elements).

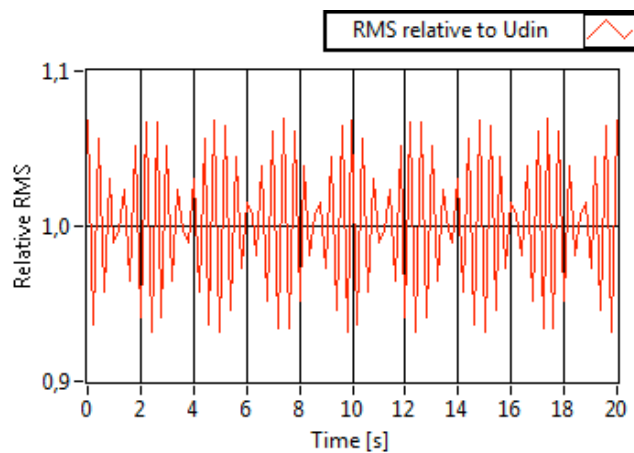


Figure 5. RMS values relative to  $U_{din}$  (theoretical simulation)

If only one missing sample of RMS value in the analyzed array exists, spectral analysis reflects with spectrum leakage effect. It can be seen in the graph in Figure 6. Blue color shows the spectrum that corresponds to the set of values, in which there are no missing values. Red color shows the spectrum of array that is missing one sample RMS value. The same disproportion in measured values as missing sample causes the gaps or overlaps.

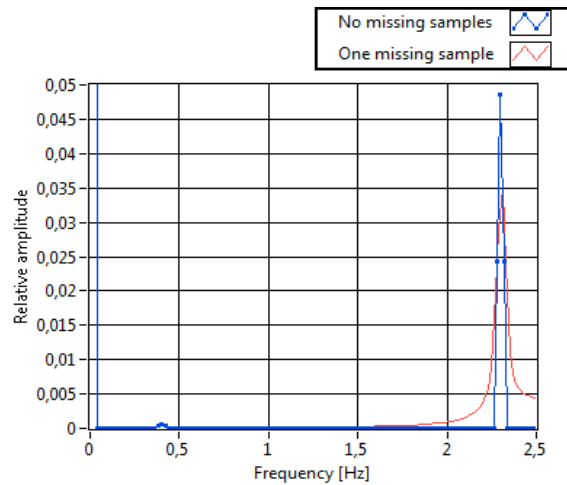


Figure 6. FFT analysis of RMS variations (theoretical simulation)

The test should not take longer than 10 minutes, as this could lead to a possible overlap due to 10-minute aggregation interval. This, in this case, will be correct.

Voltages  $U_{din}$  (Declared input voltage) with an ideal signal / noise ratio should be applied to the test. Manufacturer of test equipment itself should specify the optimum value of this voltage.

The tested device should provide in interval of every 10/12 periods measured value of RMS voltage with a time stamp with the history of the samples with a length of at least 100.

The test device must store the data in a log file, or be able to read the measurement data from the communications port in order to subsequently process the measured data for testing purposes.

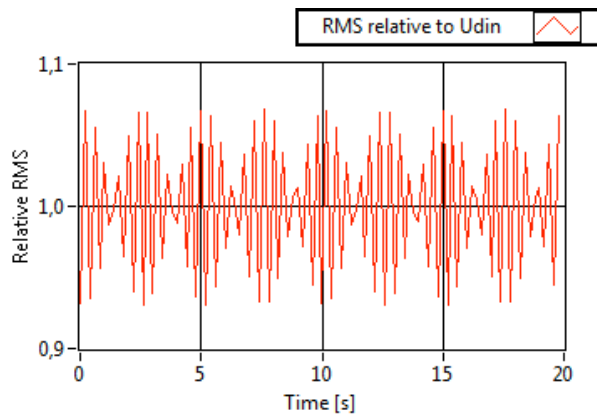


Figure 7. FFT analysis of RMS variations (theoretical simulation)

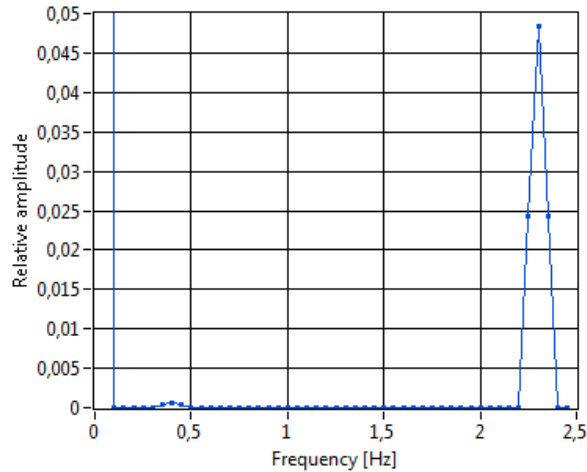


Figure 8. FFT analysis of RMS variations (theoretical simulation)

Figure 7 shows the relative RMS values (computed from measured RMS values and  $U_{din}$ ) by ENA330 analyzer, which was subjected to this test. And Figure 8 shows the spectral analysis of these values. From the view to the spectral analysis can be concluded that the analyzer meets the terms of the requirement for gapless measurement because there is no visible spectral leakage. But to obtain probative value, it is necessary to perform additional calculations.

## 5. EVALUATION OF RESULTS

Measured sequence of RMS values from 10/12 cycles period of signal are  $U_{rms}(0) \dots U_{rms}(99)$ . From this sequence it is possible to calculate the following values:

$$A(N) = \left\| \frac{1}{50\sqrt{2}} \sum_{n=0}^{99} U_{RMS}(n) e^{j2\pi \frac{n}{N} k} \right\|, k = 45, 46, 47 \quad (2)$$

Note: The double line denotes modulus of a complex number.

As an indicator of missing samples, or overlaps, the following formula can be used:

$$Q = \sqrt{\frac{A(k)^2}{A(k-1)^2 + A(k+1)^2}} \quad (3)$$

Where  $k$  is the position of the FFT bin corresponding to the modulation frequency, and  $A(k)$  is the amplitude of the bin. In this case, the modulation

frequency of 2.3 Hz and the field size, determined for FFT analysis, 100 RMS values, the bin corresponding to modulation frequency is  $k=46$ , assuming that the DC component is bin with index 0.

$$Q = \frac{A(46)^2}{\sqrt{A(45)^2 + A(47)^2}} \quad (4)$$

According to IEC 62586-2 [1] following requirements should be met:

- 1)  $Q > 20$
- 2)  $4.5\% < A(46)/V1 < 5.5\%$
- 3)  $\text{Time}(U(99)) - \text{Time}(U(0)) = 20\text{s} \pm 6\text{ms}$

Analyzing the data measured by the analyzer ENA330 when testing under the above conditions, we came to the following values:

A(45)	A(46)	A(47)	A(46)/U <sub>din</sub>	Q	t(U(99))-t(U(0))
0,0045	3,16841	0,0073	4,8424 %	369,4703	19,997

## 6. CONCLUSION

Analyzing the results of the test, it was found that the measurement algorithm of tested analyzer ENA330 is processed appropriately according to the requirements of IEC 62586-2. Another analyzer (LEM Memobox 300) was also tested, but was found that this device does not export values with 200ms interval; the lowest interval available for export values was measured 5 minutes. This is insufficient for analysis, so the unit had to be excluded from testing. The test described in this article is part of a comprehensive tester, it's still in development. Result will be a tester for automated testing of power quality analyzers.

## REFERENCES

- [1] IEC 62586-2 Ed.1. Power quality measurement in power supply systems: Part 2: Functional tests and uncertainty requirements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2012.
- [2] IEC 61000-4-30 Ed.2.0 Electromagnetic compatibility (EMC): Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2008. ISBN 2-8318-1002-0.
- [3] IEC 61000-4-7:2002/A1:2008 Electromagnetic compatibility (EMC): Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2008.
- [4] IEC 61000-4-15 Ed.2.0. Electromagnetic compatibility (EMC): Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional design specifications. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010. ISBN 978-2-88912-076-5

**SANDRA PRZEWOŹNIK**

Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki  
Katedra Zarządzania Projektami

## **WPLYW POSTĘPU TECHNICZNEGO I TECHNOLOGICZNEGO NA EFEKTYWNOŚĆ KRAJOWEJ GOSPODARKI ENERGETYCZNEJ**

**Abstract:** This article focuses on the major changes which in the course of the restructuring process have improved the energy efficiency of the Polish economy through the revolution of scientific – technical and technological.

Postęp techniczny i technologiczny, jaki dokonał się w ciągu ostatnich 20 lat spowodował ogromne zmiany w krajowej gospodarce energetycznej. Niesie on ze sobą nowe nadzieje, a także nowe zagrożenia. Pozwolił wyzwolić człowieka od wielu uciążliwych czynności, powoduje stopniową poprawę warunków pracy, ale również zmusza do przekwalifikowania, czy też zmiany miejsca pracy wiele osób z różnych środowisk zawodowych. W roku 1989 w krajowym przemyśle dokonał się znaczący przełom – rozpoczął się dynamiczny okres transformacji gospodarczej zmierzający do wdrożenia wymogów gospodarki rynkowej i standardów obowiązujących w państwach Unii Europejskiej.

W artykule skupiono się na ważniejszych zmianach, jakie w toku procesu restrukturyzacji wpłynęły na poprawę skuteczności polskiej gospodarki energetycznej poprzez rewolucję naukowo – techniczną i technologiczną.

Jednym z charakterystycznych elementów gospodarki rynkowej jest jej liberalizacja wobec organizacji strukturalnej uczestników rynku oraz wobec produktu (np. energia elektryczna, gaz, ciepło i in.). Liberalizacja rynku energetycznego wymusiła konieczność wprowadzenia szeregu zmian w sposobie organizacji i działania podmiotów gospodarczych, w układzie zatrudnienia oraz w strukturze udziału poszczególnych źródeł energii pierwotnej w produkcji energii elektrycznej. Pojawiły się także nowe utrudnienia związane z funkcjonowaniem rynku energii elektrycznej, takie jak niski przyrost nowej infrastruktury energetycznej, niewystarczająca przepustowość istniejącej infrastruktury sieciowej oraz brak lub niespójność istniejących regulacji prawnych.

Kolejnym, istotnym zagadnieniem transformacji gospodarki jest kondycja krajowego przemysłu, a w szczególności problem niedostosowania jego struktury i poziomu nowoczesności do wymagań obecnego rynku, na którym dominuje intensywny rozwój techniki i technologii. Ten wszechobecny postęp

należy postrzegać jako „proces doskonalenia środków produkcji oraz metod wytwórczych i przedmiotowych warunków pracy”<sup>1</sup> [4].

Prawidłowe funkcjonowanie wspólnego rynku energii elektrycznej nie jest możliwe bez istnienia wystarczającej infrastruktury technicznej. Stworzenie właściwie działającego, w pełni jednolitego rynku zależy w dużym stopniu od zwiększenia zdolności przesyłowych połączeń transgranicznych. Według Międzynarodowej Agencji Energetycznej w ciągu najbliższych 15-20 lat zmieni się struktura udziału pierwotnych źródeł energii w ogólnej ilości produkowanej energii. Wzrośnie produkcja energii elektrycznej oparta na gazie (o ok. 91%) oraz z wykorzystaniem biomasy (o ok. 32 %), wynikająca z planów redukcji emisji zanieczyszczeń do środowiska. Jednocześnie w procesie urynkowienia energetyki ujawnił się m.in. problem braku niezbędnej nadwyżki mocy zainstalowanej w generacji, przy prognozowanym do roku 2030 wzroście zapotrzebowania na energię elektryczną krajowej gospodarki. Wśród innych przykładów wskazujących na potrzebę dokonania przeobrażeń rynkowych na uwagę zasługuje wykorzystanie technik teleinformatycznych w procesach transmisji, monitorowania, optymalizacji, archiwizacji i prognozowania działalności technologicznych i biznesowych podmiotów energetycznych [6].

Cechą charakterystyczną rozwiniętej gospodarki jest jej wysoki poziom innowacyjności. W celu aktywnego uczestnictwa w światowym handlu państwa zwiększają nakłady na zaawansowanie technologiczne ich gospodarek, jak i na budowę społeczeństwa informacyjnego. Wymownym tego przykładem jest rynek telekomunikacji i informatyki, który rozwija się najszybciej, a wartość sprzedanych wyrobów w obszarze ICT oraz liczba składanych wniosków patentowych z zakresu technologii informacyjnej i komunikacyjnej stale rośnie. Od początku lat 90 nastąpił prawie pięciokrotny wzrost liczby wniosków patentowych składanych w Europejskim Biurze Patentowym. Najwięcej wniosków, bo aż 59,6% pochodzi z grupy elektrycznych technik komunikacyjnych, 32,6% z grupy technik obliczeniowych, rachunkowych, a 7,8% reprezentuje podstawowe narzędzia obsługujące przesył energii elektrycznej [7].

Podejście pragmatyczne w określeniu efektywności nakazuje szukać takich rozwiązań, które ograniczą błędy i stworzą w miarę obiektywną wskazówkę dla wyboru decyzji w sferze międzysystemowej wymiany energii i mocy elektrycznej. Ocena efektywności gospodarowania każdego przedsiębiorstwa wymaga wyznaczenia jego celu, w którym poziom realizacji byłby następnie mierzony określonym miernikiem efektywności. Kryteria oceny dowolnego obiektu badań nie są niezmiennie i zależą od dwóch czynników: upływu czasu oraz obranej perspektywy. W dalszej części opracowania uwagę skupiono na analizie rachunku ekonomicznego zużycia energii elektrycznej w

---

<sup>1</sup> LISIKIEWICZ J.: Wpływ postępu technicznego na zmiany struktury w przemyśle, Zeszyt Naukowy SGPIŚ 1971, nr 83, s. 143 [3].

gospodarstwach domowych, sprawności ciepłowni i elektrociepłowni oraz strukturze nakładów finansowych w obliczu postępu technicznego i technologicznego [4]. W handlu energią elektryczną niezbędne jest podejmowanie decyzji opartych na ścisłej kalkulacji i rozpoznaniu rynku. Rachunek ekonomiczny konieczny jest przy zawieraniu kontraktów i ich rozliczaniu, a także jako przesłanka importowo-eksportowa. Do głównych korzyści płynących z poprawy efektywności należą m.in. wzrost przychodów ze sprzedaży produktów i towarów, przy malejącym wskaźniku wkładu inwestycyjnego, zmniejszenie zużycia energii elektrycznej w gospodarstwach domowych oraz zwiększenie sprawności pracy ciepłowni i elektrociepłowni. Polityka Unii Europejskiej, wyrażona w dyrektywie [1] narzuca konieczność stałego monitorowania efektywności energetycznej. Natomiast oszczędność energii należy określać jako bezwzględne zmniejszenie zużycia energii w wyniku działań organizacyjnych, inwestycyjnych lub modernizacyjnych [4].

Badania przeprowadzone przez GUS wykazały, że udział zużycia energii w gospodarstwach domowych w finalnym zużyciu energii, wyniósł 31% (wg danych z 2009 r). Malejący udział zużycia energii na ogrzewanie i przygotowanie posiłków wynika z zastępowania niskoparowych pieców węglowych nowoczesnymi urządzeniami gazowymi i elektrycznymi. Wskaźnik zużycia energii na jedno mieszkanie z uwzględnieniem korekty klimatycznej ma tendencję malejącą, przy średniorocznym tempie spadku wynoszącym 2,0% od 1999 r. Spadek jednostkowy zużycia energii w mieszkaniach jest związany z realizacją programu termomodernizacji budynków, redukcją strat w sieciach ciepłowniczych oraz poprawą sprawności nowo instalowanych urządzeń. Natomiast zmiana wydajności ciepłowni produkującej ciepło sieciowe wzrosła w latach 2008 - 2009 i przekroczyła 80 %. W przypadku elektrociepłowni wzrost sprawności odnotowano w 2009 r. Analiza struktury nakładów inwestycyjnych w przemyśle wg gałęzi przemysłu pokazuje, że od roku 1994 wkład finansowy maleje. W 2010 r. dane o przedsiębiorstwach wg sekcji PKD w stosunku do roku 2006 wykazały, że przychody ze sprzedaży produktów i towarów w sekcji wytwarzania i zaopatrywania w energię elektryczną, gaz i wodę znacznie wzrosły [2, 5].

Zatem, poprawa efektywności wykorzystania nośników energii jest procesem ciągłym, trwającym od dziesięcioleci i musi być kontynuowana również w przyszłości. Jest to najlepszy, choć nie zawsze najtańszy sposób rozwiązywania problemów energetycznych społeczeństw, uwzględniający także postulaty ochrony środowiska naturalnego. Większość usprawnień efektywnościowych wynika z autonomicznych decyzji podmiotów kierujących się rachunkiem ekonomicznym, co w obecnych realiach polskiej gospodarki wymaga znaczącego wysiłku finansowego i organizacyjnego. Jest to jednak jedyna droga w kierunku zwiększenia konkurencyjności polskiej energetyki na rynku krajowym i globalnym.

**LITERATURA**

- [1] Dyrektywa 2006/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dn. 5 kwietnia 2006r. W sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych
- [2] Efektywność wykorzystania energii w latach 1999-2009. Informacje i opracowania statystyczne, GUS, Warszawa 2001
- [3] LISIKIEWICZ J.: Wpływ postępu technicznego na zmiany struktury w przemyśle, Zeszyt Naukowy SGPIS 1971, nr 83, s. 143 – 135 .
- [4] MIKOŁAJEWICZ Z.: Przemiany strukturalne polskiej gospodarki wobec wyzwań integracyjnych z Unią Europejską , Uniwersytet Opolski, Opole 2004
- [5] Podmioty gospodarcze według rodzajów i miejsc prowadzenia działalności w 2006 r. i w 2010 r., Informacje bieżące, GUS, Warszawa 2007/2011
- [6] SKOMUDEK W., KOSIOREK L., Wspomaganie zarządzania Lokalnym Rynkiem Energii Operator Rynku Lokalnego (ORL), materiały konferencyjne, Jelenia Góra 2010
- [7] WYSOKIŃSKA Z.: Konkurencyjność w międzynarodowym i globalnym handlu technologiami, PWN, Warszawa-Lódź 2001



**SANDRA PRZEWOŹNIK**

Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki  
Katedra Zarządzania Projektami

## **ZARZĄDZANIE POPYTEM NA RYNKU ENERGII ELEKTRYCZNEJ**

**Abstract:** One of the main problems of the Polish energy electricity market is balance of market mechanisms. In article focus on more important aspects of the problem of demand-side management in the electricity market. Described the main problems of the national electricity market, the prospects for improvement, the importance of effective demand management and demand-side response and tools (programs), which would trigger the consumer the appropriate behavior affecting its involvement in energy production, thus allowing the transition from passive to active transactions in the electricity market.

### 1. WSTĘP

Do najważniejszych problemów, przed którymi został postawiony polski rynek energii elektrycznej jest tendencja wzrostu zapotrzebowanie na energię elektryczną, utrudnienia wynikające z możliwości jej magazynowania, zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego oraz integracja odnawialnych źródeł energii. Istotnie ważnym zagadnieniem, z punktu widzenia prawidłowej pracy systemu elektroenergetycznego, jest utrzymanie w każdej chwili równowagi pomiędzy podażą i popytem na rynku energii elektrycznej. Obecnie szacowanie popytu na energię elektryczną odbywa się na podstawie prognozowania i planowania sprzedaży oraz potwierdzania zamówień odbiorców. Przyjmując za kryterium czas, analizy prognostyczne najczęściej opierają się o ocenę zapotrzebowania retrospektywną, bieżącą i prospektywną. W konsekwencji nietrafione prognozy powodują ogromne straty energii w całym systemie elektroenergetycznym. Zminimalizowanie kosztów chybionych prognoz możliwe jest poprzez wyzwolenie takich mechanizmów w krajowym sektorze elektroenergetycznym, które zredukowałyby zapotrzebowanie szczytowe na energię oraz, tym samym, wyzwoliłyby u konsumentów takie zachowania, które wpłynęłyby na racjonalny i świadomy sposób korzystania z takiego dobra, jakim jest energia elektryczna. Taką szansę umożliwiają mechanizmy zarządzania stroną popytową, których fundamentem i warunkiem koniecznym efektywnego funkcjonowania jest upowszechnienie systemu inteligentnego opomiarowania. Kraje rozwinięte postrzegają technologię inteligentnych sieci elektroenergetycznych jako najskuteczniejszą drogę do zmniejszenia zużycia energii elektrycznej. W toku tych globalnych zmian, mamy do czynienia z nowym zjawiskiem, które staje się powszechne także w Polsce, przejściem od pasywnej do aktywnej transakcji na rynku energii elektrycznej. Obecnie, konsument energii będzie mógł wystąpić w roli aktywnego konsumenta (prosumenta), który także może być dostawcą energii.

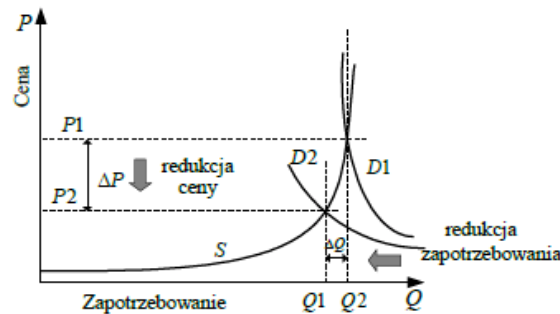
## 2. RANGA ZARZĄDZANIA POPYTEM NA RYNKU ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Zarządzanie popytem (*Demand Side Management – DSM*) ma za zadanie identyfikowanie, ocenę i wykorzystanie źródeł (zasobów) po stronie popytu na energię elektryczną przez jej końcowych użytkowników. DSM jest jednym z instrumentów realizacji zintegrowanego planowania zasobów energetycznych po stronie popytowej. Technika DSM przede wszystkim polega na efektywnym gospodarowaniu zapotrzebowaniem na energię oraz tzw. adaptacji zapotrzebowania, czyli przesunięciu obciążenia w czasie i przewidywaniu procesu zapotrzebowania. Do podstawowych celów zarządzania popytem zalicza się redukcję maksymalnych obciążeń szczytowych (typowo kilka godzin w ciągu roku, kiedy relacje ceny/koszty są wysokie), przesunięcie obciążeń pomiędzy różnymi porami dnia lub porami roku oraz dopasowanie obciążenia do aktualnych warunków pracy systemu elektroenergetycznego. Osiągnięcie powyższych celów możliwe jest poprzez wprowadzenie określonych programów. Przyjmując, że gdyby odbiorcy końcowi zmniejszyli pobór energii w momencie zapotrzebowania szczytowego i przyczyniliby się do osiągnięcia stanu równowagi między popytem i podażą w systemie elektroenergetycznym kraju, to przez to mieliby pewny wpływ na rynkową cenę energii – niższą cenę zakupu. Znaczenie tutaj mają rozwiązania pozwalające na natychmiastową redukcję zapotrzebowanej mocy, w okresach największego obciążenia systemu i najwyższych cen energii na rynku hurtowym. W praktyce kryterium to spełniają programy polegające na bezpośrednim sterowaniu urządzeniami u odbiorców oraz dynamiczne taryfy elektryczne (bodźce cenowe). Skuteczność produktów cenowych wynika z tego, że uzależniają one stawki za energię elektryczną od wysokości i dynamiki cen energii na rynku hurtowym, przez co zwiększa się liczba odpowiedzi odbiorców na sygnały cenowe [1][6][8]. Podsumowując do najważniejszych narzędzi wykorzystywanych w procesie kształtowania popytu na energię elektryczną należą: taryfy elektryczne (produkty cenowe), kontrolowanie pracy urządzeń elektrycznych u odbiorców, inne działania bazujące głównie na edukacji, takie jak działania doradczo-usługowe, kształtowanie struktury odbiorników energii, programy bodźcowe i marketingowe.

## 3. FUNKCJONALNOŚĆ SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO I POTENCJAŁ STRONY POPYTOWEJ

W sytuacji gotowości odbiorców końcowych do dobrowolnego dostosowania zapotrzebowania, można mówić o występowaniu reakcji strony popytowej (DR - *Demand Response* lub DSR - *Demand Side Response*), będącej efektywnym składnikiem techniki zarządzania popytem. DR formułowana jest jako dobrowolne, tymczasowe działanie odbiorcy (lub współdziałanie z operatorem) powodujące zmianę wielkości zapotrzebowania pod wpływem różnorodnych bodźców lub realizowane na podstawie umowy z użytkownikiem końcowym. W horyzoncie krótkookresowym (godziny) reakcja strony

popytowej ma wpływ na bilans mocy w systemie i może być widziana jako ekonomiczna optymalizacja zapotrzebowania na energię, a nie działanie prowadzące do oszczędności energii. W horyzoncie długookresowym DR może wpływać na bilans energii jak również może spowodować jej oszczędność. Sygnał cenowy inicjujący mechanizm DR może pochodzić ze wszystkich rynków ustalających cenę mocy lub energii, tj. rynku transakcji natychmiastowych, rynku dnia bieżącego, rynku mocy regulacyjnej, rynku bilansującego, czy rynku usług systemowych. Zasoby DR zostaną uaktywnione, jeżeli cenowy sygnał inicjujący mechanizmy DR, będzie niższy od rynkowej ceny rozliczeniowej. Sygnał cenowy może także bazować na taryfach na energię elektryczną oraz za usługi przesyłowe i dystrybucyjne. Ogólne wyjaśnienie skutków reakcji strony popytowej zostało przedstawione na wykresie na rys. 1, przedstawiającej zależność ceny  $P$  od podaży energii elektrycznej  $Q$  [7].

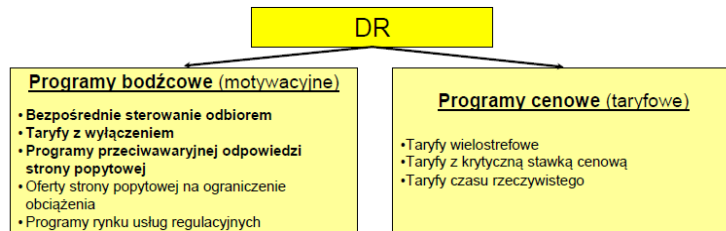


Rys. 1. Efekt reakcji strony popytowej na cenę na rynku energii elektrycznej [7].

W przypadku nieelastycznego popytu, któremu odpowiada krzywa zapotrzebowania  $D1$ , brak reakcji strony popytowej, na wysokie koszty wytworzenia  $S$ , prowadzi do wysokiej ceny  $P1$  oraz może w skrajnym przypadku doprowadzić do braku zbilansowania systemu. W przypadku uelastycznienia popytu poprzez wprowadzenie programów reakcji strony popytowej, czemu odpowiada krzywa  $D2$  oraz zmniejszenie zapotrzebowania o wartość  $\Delta Q$ , na rynku ustali się znacznie niższa cena  $P2$ . Technika DR, w zależności od czynników rynkowych, może być oparta na programie ukierunkowanym na niezawodność, który reaguje na ograniczenia w pracy systemu elektroenergetycznego, bądź na programie ukierunkowanym na rynek, który jest zależny od sygnałów cenowych i to odbiorca sam decyduje o zmniejszeniu poboru lub podporządkowuje się zdalnemu odciążaniu (redukcja zużycia). Zdalne odciążanie może się odbywać z wyprzedzeniem (dzień lub kilkanaście minut wcześniej) lub automatycznie w trybie on-line (rys. 2) [2].

Programy bodźcowe pozwalają głównie na redukcję maksymalnych obciążeń szczytowych (typowo kilka godzin w ciągu roku), gdy relacje ceny/koszty są wysokie na skutek zdarzeń takich jak awarie czy wzrost zapotrzebowania na energię. Z tego względu są to programy dedykowane

operatorom systemów elektroenergetycznych. Programy takie dostarczają operatorowi zasoby, które mogą być przez niego wykorzystane zarówno do bieżącego bilansowania podaży i popytu energii elektrycznej, jak i do zapewnienia krótkookresowego bezpieczeństwa systemu elektroenergetycznego. Mogą to być zarówno programy, w których operator inicjuje działanie prowadzące do zredukowania mocy obciążenia odbiorcy, jak i programy wymagające od odbiorcy podjęcia decyzji o zredukowaniu wartości popytu na podstawie zachęt cenowych oferowanych przez operatora lub sprzedawcę energii [4][7].



Rys.2. Mechanizmy zarządzania stroną popytową [4].

Istnieje szereg programów bodźcowych, z których najważniejsze wymieniono poniżej:

- **Bezpośrednie sterowanie odbiorem (DLC)**, który polega na zdalnym wyłączeniu niektórych urządzeń odbiorcy. Decyzja o wyłączeniu odbioru wynika z zaistnienia warunków zagrażających niezawodności pracy systemu elektroenergetycznego, a czas pomiędzy przekazaniem polecenia dotyczącego wyłączenia urządzeń odbiorcy a ich wyłączeniem jest bardzo krótki – z reguły nie dłuższy niż 15 minut. Odbiorcy uczestniczący w programie bezpośredniego sterowania odbiorem w zamian za ograniczenie zapotrzebowania otrzymują zapłatę motywacyjną. Program ten poprzez redukcję zapotrzebowania mocy odbiorcy może wpływać na redukcję całkowitego zapotrzebowania systemu.
- **Taryfy z wyłączeniem (ICR)**, w których w umowie z klientem zamieszcza się klauzulę, w której odbiorca akceptuje przerwy w dostawie całości lub części pobieranej mocy, albo sam zgadza się ograniczyć pobór mocy na żądanie dostawcy. Czas trwania wyłączeń jest z góry ustalony i przypada na okresy bardzo wysokich cen energii na rynku hurtowym (w konsekwencji niskiej niezawodności systemu). Programy typu ICR są tradycyjnie oferowane tylko największym odbiorcom przemysłowym lub komercyjnym.
- **Ofertowanie strony popytowej na ograniczenie obciążenia lub programy licytacji popytu (DBP)**, które zachęcają dużych odbiorców do zaoferowania redukcji obciążenia za cenę, za którą są gotowi dokonać takiej redukcji. Mimo dużej przejrzystości ekonomicznej, z punktu widzenia operatora systemu ten typ programów nie jest idealny, ponieważ nie oferuje pewnej odpowiedzi strony popytowej. W przypadku, gdy oferty odbiorców są tańsze niż inne alternatywne sposoby dostarczenia energii, wówczas redukcje

obciążenia są przyjęte przez operatora, a tym samym odbiorcy, których oferty zostały zaakceptowane, zobowiązują się do zmniejszenia swojego obciążenia.

- **Programy przeciwawaryjnej odpowiedzi strony popytowej (EDRP)** przewidują zachęty finansowe dla odbiorców za redukcję ich obciążenia podczas zdarzeń zagrażających niezawodności dostaw. Jednakże zmniejszenie obciążenia jest dobrowolne. Jeżeli odbiorca nie dokona zmniejszenia obciążenia, to wówczas może zostać ukarany zgodnie z zawartą umową.
- **Programy rynku usług regulacyjnych (ASMP)** umożliwiają odbiorcom zgłaszanie (licytację) ofert redukcji obciążenia, na rynku usług regulacyjnych, czym zwiększają zakres dostępnej rezerwy operacyjnej. Jeżeli oferty odbiorców zostaną przyjęte, to wówczas są one wyceniane, zgodnie z ceną rynkową i opłacane za zobowiązanie do dyspozycyjności. W przypadku konieczności wykonania redukcji obciążenia, operator systemu wzywa do dokonania redukcji [3].

Programy cenowe są programami dedykowanymi dla sprzedawców energii elektrycznej. Mają one na celu długoterminowe zwiększenie bezpieczeństwa pracy systemu elektroenergetycznego, co można uzyskać wpływając na zachowania odbiorców energii w zakresie zużycia energii elektrycznej. Zachowania te powinny być ukierunkowane na zwiększenie świadomości odbiorców o zużyciu energii elektrycznej, prowadzącej do dobowego wyrównania krzywej zużycia energii elektrycznej. Najistotniejszymi czynnikami wpływającymi na te zachowania są uzyskanie niższych kosztów zakupu energii i świadomość odbiorców. Do grupy programów cenowych zalicza się trzy programy.

- **Taryfy wielostrefowe (TOU)** oferują opłatę za energię elektryczną zmieniającą się w cyklu dobowym, tygodniowym (dni robocze/weekendy) raz sezonowo (lato/zima). Stawki są z zasady ustalane dla dłuższych okresów, co sprawia, że nie są one skutecznym narzędziem w bieżącym sterowaniu popytem, a ponadto narażają dostawcę na ryzyko cenowe. Taryfa wielostrefowa ma jednak tą przewagę nad taryfą płaską, że dostarcza odbiorcom bodźców do ograniczenia zużycia energii w szczytach obciążenia i korzystania z energii w okresach niskich cen (doliny obciążenia). Oddziaływanie taryfy TOU na odbiorców jest tym większe, im większa jest rozpiętość pomiędzy stawkami dla różnych stref czasowych i gdy istnieje możliwość programowania urządzeń elektrycznych, np. pomp ciepła, do pracy w dolinie obciążenia [6].
- **Taryfy z krytyczną stawką cenową (CPP)** wprowadzają się jedną lub dwie dodatkowe, bardzo wysokie stawki dla szczytów obciążenia systemu, a więc okresów, w których ceny na rynku hurtowym energii elektrycznej są najwyższe, dla ściślejszego powiązania stawek w taryfie wielostrefowej z bieżącymi warunkami pracy systemu elektroenergetycznego. Odbiorców informuje się z krótkim wyprzedzeniem, że stawki te będą stosowane, a ich

wysokość oraz czas, przez który będą obowiązywały, mogą być ustalone przez dostawcę z góry. W innej odmianie tej taryfy stawki umowne są zastępowane cenami rynku bieżącego.

- **Taryfy czasu rzeczywistego (RTP)** przewiduje zmienność cen energii elektrycznej w czasie. W taryfie czasu rzeczywistego stawka opłaty za energię elektryczną zmienia się podobnie jak ceny na rynku hurtowym, przy czym odbiorcy są informowani o prognozowanych cenach energii z wyprzedzeniem czasowym od 1 godziny do 1 doby [5][3][8].

Uczestnicy rynku nie zawsze zdają sobie sprawę z posiadanych możliwości jak być aktywnym na rynku i mieć wpływ na kształtowanie cen na rynkach fizycznych oraz na bezpieczeństwo dostaw. Zgodnie z tradycyjnym sposobem myślenia, energia elektryczna ma zostać dostarczona odbiorcom końcowym wtedy, kiedy jej potrzebują. Informacja o korzyściach wynikających z DSR może prowadzić do aktywniejszego wykorzystania potencjalnych zasobów popytowych posiadanych przez odbiorców, szczególnie jeśli na tych zasobach będą mogli zarobić. W aktualnych, coraz bardziej napiętych uwarunkowaniach pracy KSE, a zarazem silnie narastającym popycie na energię elektryczną, aktywacja zasobów DSR może okazać się bardzo atrakcyjna dla wszystkich uczestników rynku energii elektrycznej. Praktyczny potencjał DSR waha się w czasie rzeczywistym w zależności od wielu różnych czynników, takich jak czas aktywacji takiego potencjału, lokalna cena energii elektrycznej, cena rynkowa produktów przemysłowych, substytucja alternatywnych postaci energii, czas dostępny przed aktywacją, czas trwania oraz częstotliwość reakcji popytowych.

#### 4. PODSUMOWANIE

Wprowadzenie odpowiednich mechanizmów umożliwiłoby odbiorcom aktywne włączenie się w proces poprawy niezawodności operacyjnej systemu elektroenergetycznego. Jeżeli odbiorca zdecydowałby się ograniczyć zużycie energii podczas szczytu jej zapotrzebowania, to wówczas mógłby obniżyć koszty jej nabycia. W dłuższej perspektywie korzyścią dla odbiorców końcowych byłoby względne obniżenie kosztów zakupu energii, wynikające z optymalizacji warunków szczytowej pracy systemu tzn. zmniejszenia kosztów wytworzenia energii w okresie szczytowym. Dla skutecznego działania programów zarządzania popytem konieczne jest opracowanie modelu pozwalającego na redystrybucję korzyści wynikających ze skutków wdrożenia inteligentnego opomiarowania.

#### **LITERATURA**

- [1] BANERJEE R., CHATTOPADHYAY D., PARIKH J.: Integrating Demand Side Options in Electric Utility Planning: A Multiobjective Approach. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, 1995, , s. 657-663.

- 
- [2] BLACK J. W.: Demand Response as a Substitute for Electric Power System Infrastructure Investments. W: Electricity Transmission in Deregulated Markets Conference, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, December 15-16, 2004.
  - [3] BOBER D.: Sterowanie popytem na energię elektryczną w sytuacjach niedoboru mocy – przegląd metod, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 238, Lublin 2008, s. 37-69.
  - [4] LUBCZYŃSKI W.: Programy zarządzania popytem w środowisku inteligentnego opomiarowania jako narzędzie poprawy bezpieczeństwa Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, PSE – Operator S. A. Warszawa 2010.
  - [5] MICHALIK – MIELCZARSKA G., SZCZYGIEŁ L., MIELCZARSKI W.: Nowe metody kontroli i regulacji taryf przedsiębiorstw dystrybucyjnych. Rynek Energii, nr 1(44) 2003, s. 5-13
  - [6] O'SHEASY M.: How to Perform Efficient TOU Design. W: Energy Central's EnergyPulse.net, CyberTech, Inc. July 23, 2003.
  - [7] PSE – Operator S.A: Opracowanie modelu stosowania mechanizmów DSR na rynku energii w Polsce, ETAP IV: Opracowanie raportu z realizacji zadania szczegółowego, Konstancin – Jeziorna 2010.
  - [8] RYŚ M.: Wybrane narzędzia sterowania popytem na energię elektryczną, Rynek Energii, nr 4/2005, s. 30-36

**TOMASZ PYKA**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej

## **POPRAWA STEROWANIA Z UŻYCIEM ALGORYTMÓW TYPU PREDYKTOR-KOREKTOR**

**Streszczenie:** W artykule porównano metody predyktor-korektor dla algorytmów korekcji Adamsa-Moultona i Gears przy wykonaniu predykcji algorytmem Adamsa-Bashfortha trzeciego rzędu. Porównania dokonano w przypadku obliczania współczynnika wypełnienia szerokości impulsu PWM w robocie mobilnym trójkołowym. Symulacji dokonano dla dwóch różnych wartości kroków czasowych procesu sterowania.

### 1. WSTĘP

Zagadnienie efektywnego sterowania robotem mobilnym jest obecnie bardzo aktualne. Świadczą o tym publikacje [1, 2], w których prezentowane są wyszukane algorytmy poprawiające ruch robota po zadanej trajektorii. Nowe algorytmy uwzględniają niepewność parametrów, przez co sterowany obiekt staje się odporny (ang. robust) na zakłócenia. Należy jednak dodać, że zapotrzebowanie na moc obliczeniową takich algorytmów jest coraz większe, co powoduje, że robotem nie steruje już prosty mikrokontroler lecz procesor 32 bitowy lub sygnałowy.

W praktycznych zastosowaniach najczęściej stosowany jest regulator nadążny, tzn. na podstawie uzyskanych błędów w danej chwili czasowej, regulator wyznacza współczynnik wypełnienia szerokości impulsu dla silników. Przy odpowiednio dużej częstotliwości sterowania, napięcie uzyskane w wyniku modulacji szerokości impulsu (PWM) jest bardzo zbliżone do żądanego napięcia sterującego. W praktycznych zastosowaniach, gdy stosowany jest regulator typu P, PD lub PID, popełniany jest błąd związany z opóźnieniem sygnału sterującego, przez co sterowanie jest opóźnione w układach cyfrowych o jeden krok czasowy.

Wobec powyższego w artykule porównano dotychczasowe obliczanie współczynnika wypełnienia impulsu PWM bez uwzględnienia predykcji sygnałów sterujących z wynikami uzyskanymi za pomocą algorytmu predyktor-korektor w robocie mobilnym trójkołowym Pioneer 2DX [1]. Jako predyktor wykorzystano metodę Adamsa-Bashfortha III-go rzędu, natomiast jako korektor zastosowano metodę Adamsa-Moultona III-go rzędu oraz Gears III-go rzędu.

Zastosowanie tych metod było możliwe, gdyż założono, że w robocie mobilnym sterowanie będzie odbywać się ze stałym krokiem.

Symulację przeprowadzono dla robota mobilnego trójkołowego Pioneer 2DX [1], przy czym do symulacji użyto danych rzeczywistego silnika Dunkermotoren GR63 z przekładnią PLG52 1:20.25. Aby zbliżyć symulowany



układ do rzeczywistości założono 5% niepewność wartości momentów bezwładności.

## 2. METODY NUMERYCZNE

Symulacji dokonano dla modelu robota z nadążnym regulatorem PD:

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = (\text{int}) \left( 256K \left( \begin{bmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{v1} \\ e_{v2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{p1} \\ e_{p2} \end{bmatrix} \right) / \begin{pmatrix} v_{\max} \\ r_1 \end{pmatrix} \right), \quad (1)$$

gdzie  $k_1$ ,  $k_2$  oznaczają współczynniki wypełnienia impulsu,  $K=10$  oznacza wzmacnienie regulatora,  $e_{v1}$  oraz  $e_{v2}$  oznacza błędy prędkości (różnica pomiędzy prędkością zadaną a obliczaną) odpowiednio dla koła 1 i 2,  $e_{p1}$  oraz  $e_{p2}$  oznacza błędy po położeniach (różnica pomiędzy położeniem zadanym a obliczanym),  $r_1$  jest promieniem koła równym 0,0825m, natomiast  $v_{\max}$  jest prędkością maksymalną robota, która wynosi 0,5 m/s.

Jak wynika z zależności (1), współczynniki wypełnienia impulsu są obliczane z opóźnieniem, w związku z czym sterowanie zawsze będzie opóźnione o jeden krok względem procesu rzeczywistego, czyli jest sterowaniem nadążnym. Wobec powyższego zaproponowano wykorzystanie metody predykcyjnej Bashforth'a z korektorem realizowanym wg algorytmów Adamsa-Moulton'a i Geara. Algorytm Adamsa-Bashfortha III-go rzędu posiada następującą formę [3]:

$$x_{n+1} = x_n + h \left\{ \frac{23}{12} f(x_n, t_n) - \frac{16}{12} f(x_{n-1}, t_{n-1}) + \frac{5}{12} f(x_{n-2}, t_{n-2}) \right\}, \quad (2)$$

Korektor Adamsa-Moultona III-go rzędu ma następującą postać [3]:

$$x_{n+1} = x_n + h \left\{ \frac{5}{12} f(x_{n+1}, t_{n+1}) + \frac{8}{12} f(x_n, t_n) - \frac{1}{12} f(x_{n-1}, t_{n-1}) \right\}, \quad (3)$$

Natomiast korektor Geara III-go rzędu wygląda następująco [3]:

$$x_{n+1} = \frac{18}{11} x_n - \frac{9}{11} x_{n-1} + \frac{2}{11} x_{n-2} + h \left\{ \frac{6}{11} f(x_{n+1}, t_{n+1}) \right\}, \quad (4)$$

gdzie  $x_n$  – oznacza wartość współczynnika wypełnienia impulsu w chwili czasowej  $t_n$ ,  $t_n$  – oznacza chwilę czasową, dla której znana jest ostatnia wartość obliczanych wielkości,  $h$  – oznacza krok czasowy przyjęty w metodach całkowania numerycznego ( $h=t_{n+1}-t_n$ ).

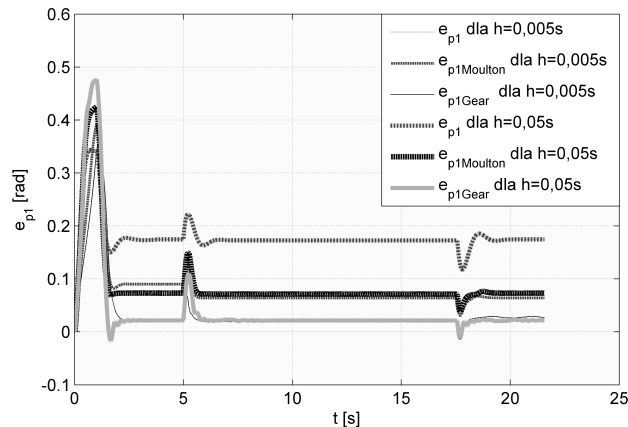
## 3. WYNIKI SYMULACJI

Symulacji komputerowej dokonano z uwzględnieniem uproszczonego modelu przekształtnika PWM opisanego w [4] przy przyjęciu, że krok czasowy procesu sterowania wynosi 0,05s oraz 0,005s.

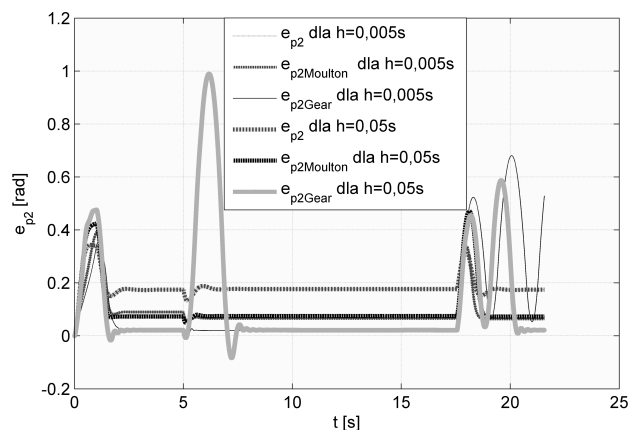
Trajektorię ruchu robota mobilnego przedstawiono w [5], przy czym robot najpierw porusza się ruchem przyspieszonym po prostej, następnie

porusza się ze stałą prędkością (6,06 rad/s), po czym porusza się po łuku i następnie dalej kontynuuje jazdę ze stałą prędkością po prostej.

Wyniki otrzymanych symulacji przedstawiono na rysunku 1 i 2, przy czym  $e_{p1}$  oznacza błąd kąta obrotu dla koła 1, natomiast  $e_{p2}$  oznacza błąd kąta obrotu dla koła 2:



Rys. 1. Wykresy obrazujące zależność wartości błędów położenia koła 1 w funkcji czasu dla kilku wybranych wartości  $h$



Rys. 2. Wykresy obrazujące zależność wartości błędów położenia koła 2 w funkcji czasu dla kilku wybranych wartości  $h$

Na rysunku 1 przedstawiono zależne od czasu i zmiany kąta obrotu koła 1 wartości błędów dla różnych wartości kroku czasowego procesu sterowania ( $5 \cdot 10^{-2}$  oraz  $5 \cdot 10^{-3}$ ). Szczególnie interesujący jest rysunek nr 2, który przedstawia błędy kąta obrotu dla koła 2, zmiana kroku sterowania nie wpływa wprawdzie na wynik uzyskany metodą, która nie używa predykcji, natomiast ma bardzo duże znaczenia przy korzystaniu z algorytmu Geara. W metodzie Geara

w trakcie zmiany ruchu występują bardzo duże błędy, co może w konsekwencji zdestabilizować obiekt. Dlatego też, zdaniem autora bardziej wskazane jest użycie metody predyktor-korektor składającej się z algorytmów Adamsa-Bashfortha i Adamsa-Moultona, gdyż niezależnie od zmiany kroku sterowania, błędy są znacznie mniejsze niż bez używania metod predycyjnych. Wykorzystanie metod predycyjnych zmniejsza uchyb związany z opóźnieniem sterowania w całym obszarze ruchu.

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule dokonano porównania metod numerycznych typu predyktor-korektor w specyficznych zastosowaniach powiązanych z procesami sterowania robotów. Na podstawie symulacji komputerowej, w której za pomocą równań różniczkowych opisano model robota zbliżony do rzeczywistego, stwierdzono, że w przypadku obliczania współczynnika wypełnienia impulsu PWM wydaje się zasadne stosowanie metody Adamsa-Moultona. Poprzez jej zastosowanie uzyskano dyspersję błędów po trajektorii prawie o połowę mniejszą niż w przypadku braku stosowania metod predycyjnych. Oryginalnym osiągnięciem autora jest zastosowanie wzorów służących do całkowania numerycznego w celu predykcji wartości współczynnika wypełnienia impulsu PWM. Wartość współczynnika wypełnienia impulsu używana jest przez autora do poprawy sterowania robotem mobilnym.

#### LITERATURA

- [1] GIERGIEL M.J., HENDZEL Z., ŻYLSKI W., Modelowanie i sterowanie mobilnych robotów kołowych, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2002.
- [2] FIERRO R., LEWIS F. L., Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics, *Journal of Robotic Systems* 14(3), 1997.
- [3] CHUA L.O. LIN P.M., Komputerowa analiza układów elektronicznych – algorytmy i metody obliczeniowe, WNT Warszawa 1981.
- [4] BENIAK R., PYKA T., Influence of PWM on Trajectory Accuracy in mobile Robot Motion, *JAMRIS Vol 6*, 2012.
- [5] PYKA T., Dobór kroku sterowania w zależności od tarcia o podłoże, *Elektryka z.67* 2012.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego

**PIOTR SCHNEIDER**

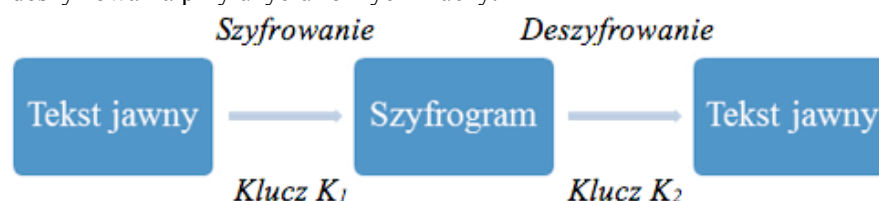
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Instytut Elektroenergetyki

## WYDAJNOŚĆ ASYNCHRONICZNYCH ALGORYTMÓW SZYFROWANIA DANYCH W SYSTEMIE OPERACYJNYM LINUX

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia wyniki i wnioski z przeprowadzonych badań mających na celu sprawdzenie wydajności wybranych algorytmów asynchronicznych w systemie operacyjnym Linux. Pokazuje mocne jak i słabe strony algorytmów RSA i ElGamal [1].

### 1. WSTĘP

W algorytmach asynchronicznych do szyfrowania i deszyfrowania wykorzystuje się różne klucze. Dobierane są one w taki sposób, aby z klucza szyfrującego nie dało się odtworzyć klucza deszyfrującego. Każda osoba posiada swoją unikatową parę kluczy: publiczny i prywatny. Pierwszy z nich jest ogólnodostępny, np. jest podany na stronie internetowej i służy tylko do szyfrowania danych. Klucz prywatny posiada tylko właściciel i służy on do odszyfrowania danych. Poniżej na rysunku 1 przedstawiono proces szyfrowania i deszyfrowania przy użyciu różnych kluczy.



Rys. 1. Proces szyfrowania i deszyfrowania w algorytmach asynchronicznych [3]

Jeżeli szyfrowanie będzie rozumiane jako funkcja przyporządkowująca danym zawierającym tekst jawny  $M$  dane zawierające szyfrogram  $C$  to można oznaczyć ją jako  $E$  i proces szyfrowania z rysunku 1 zapisać w postaci wzoru matematycznego:

$$E_{K_1}(M) = C \quad (1)$$

Podobnie jak w przypadku szyfrowania, jeżeli proces deszyfrowania z rysunku 1 będzie rozumiany jako funkcja i w tym wypadku oznaczona jako  $D$  to można zapisać ją w postaci następującego wzoru matematycznego:

$$D_{K_2}(C) = M \quad (2)$$

W celu uzyskania tekstu jawnego po wcześniejszym jego zaszyfrowaniu musi zostać spełniona następująca zależność:

$$D_{K_2}(E_{K_1}(M)) = M \quad (3)$$

## 2. TESTY WYDAJNOŚCI

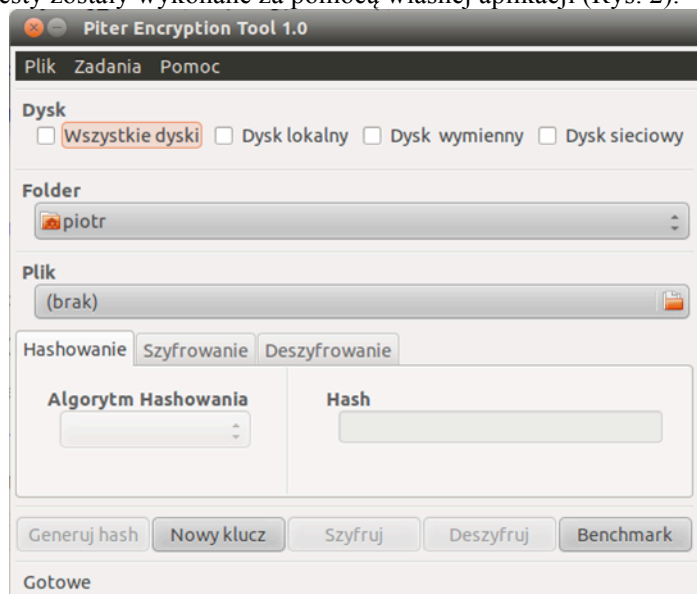
### 2.1. Wprowadzenie

Testom zostały poddane różne dane. Zostały one pogrupowane w następujące kategorie:

- Pliki tekstowe
- Pliki graficzne
- Pliki dźwiękowe
- Pliki filmowe
- Pliki wykonywalne

Podstawowym kryterium w trakcie testów był czas. W momencie, gdy proces szyfrowania przekraczał 4 godziny został on przerywany.

Testy zostały wykonane za pomocą własnej aplikacji (Rys. 2).



Rys. 2. Okno główne programu [3]

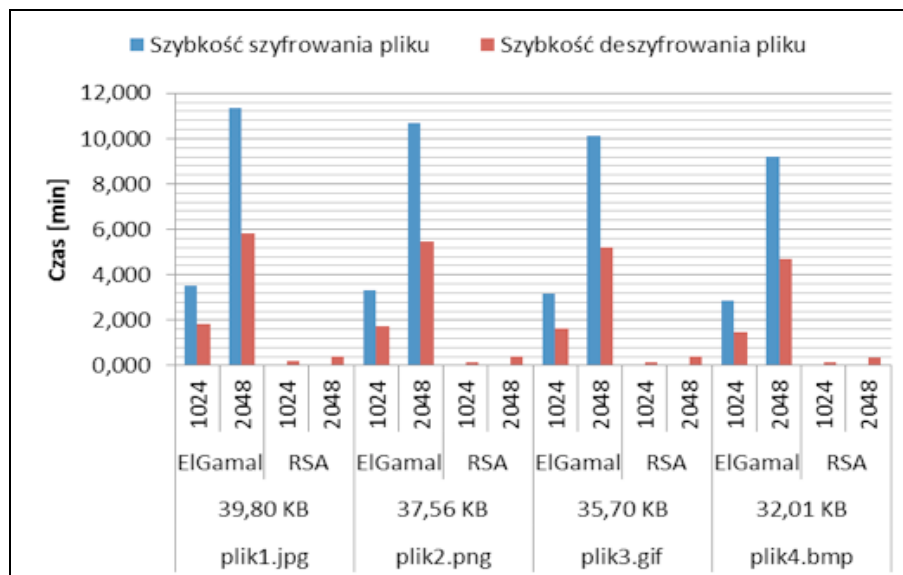
W tabeli 1 przedstawiono podstawowe dane komputera, na którym wykonano testy.

Tab. 1. Dane techniczne komputera [3]

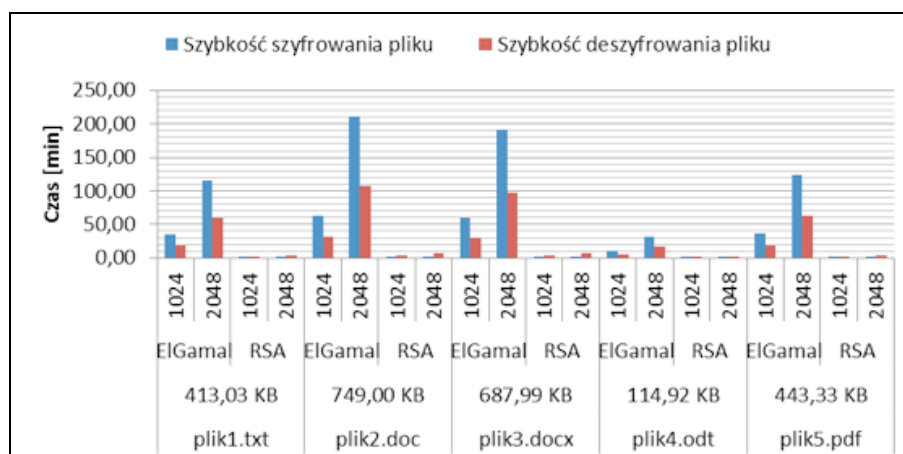
Dane techniczne	
Typ komputera	Laptop
Procesor	Intel Pentium Dual Core 1.60 Ghz
Pamięć RAM	2 GB
Dysk twardy	250 GB
System operacyjny	Ubuntu 12.04 LTE x32

## 2.2. Wyniki testów

W podrozdziale przedstawione zostały, niektóre z wyników testów uzyskanych po zaszyfrowaniu i deszyfrowaniu różnej wielkości plików. Uzyskane wyniki zostały zaprezentowane w postaci wykresów.



Rys. 3. Wykres szybkości szyfrowania i deszyfrowania plików graficznych o rozmiarze do 40 KB [3]



Rys. 4. Wykres szybkości szyfrowania i deszyfrowania plików graficznych o rozmiarze do 1 MB [3]

### 3. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Po zaszyfrowaniu dowolnego pliku np. kluczem 2048 bitowym algorytmu RSA można zauważyć, że rozmiar pliku ulega zmianie. Dzieje się tak niezależnie od zastosowanego algorytmu i długości klucza. Poniżej w tabeli 2 został podany procentowy przyrost rozmiaru pliku zaszyfrowanego do pliku przed zaszyfrowaniem.

Tab. 2. Średni przyrost rozmiaru pliku po zaszyfrowaniu [3]

Algorytm szyfrowania	Długość klucza szyfrującego [bity]	Średni przyrost rozmiaru pliku po zaszyfrowaniu [%]
ElGamal	1024	75,01
	2048	75,00
RSA	1024	32,87
	2048	16,56

Analizując powyższą tabelę można zauważyć, że przyrost rozmiaru pliku dla klucza 1024 bitowego algorytmu RSA jest prawie dwukrotnie większy niż dla klucza 2048 bitowego tego samego algorytmu. W przypadku ElGamal przyrosty rozmiaru pliku dla obu kluczy są prawie takie same. Wpływ na to ma budowa algorytmu oraz stosowanie dopełnień. Algorytm RSA w zależności od długości klucza i dopełnienia OAEP [2] za jednym razem może zaszyfrować kilkadziesiąt lub kilkaset bajtów (Tab. 3).

Tab. 3. Liczba bajtów możliwa do zaszyfrowania w jednym cyklu przez algorytm RSA [3]

Długość klucza szyfrującego	Maksymalny rozmiar danych możliwych do zaszyfrowania przez klucz w jednym cyklu pracy przy użyciu dopełnienia OAEP [bajty]
1024	86
2048	214

W przypadku algorytmu ElGamal zastosowana została klasa BigInteger [3]. Dzięki niej stało się możliwe zaszyfrowanie w jednym cyklu większej liczby bajtów (Tab. 4).

Tab. 4. Liczba bajtów możliwa do zaszyfrowania w jednym cyklu przez algorytm ElGamal [3]

Długość klucza szyfrującego	Ustalona rozmiar danych do zaszyfrowania przez klucz w jednym cyklu pracy przy użyciu dopełnienia OAEP [bajty]
1024	128
2048	256

Przy obu algorytmach wartości nie są imponujące i przy średnim rozmiarze pliku liczba cykli potrzebnych do zaszyfrowania pliku jest duża, np. chcąc zaszyfrować plik o rozmiarze 1,24 MB kluczem 1024 bitowym algorytmu RSA potrzeba 15119 cykli i dodatkowo 1 cykl o mniejszej liczbie bajtów.

Zakładając, że czas potrzebny do zaszyfrowania 1 cyklu wynosi 25 ms można obliczyć czas potrzebny do zaszyfrowania całego pliku. W przykładzie wynosi on około 6,30 godzin. W procesie szyfrowania tworzony jest zaszyfrowany blok danych (Tab. 5).

Tab. 5. Rozmiar zaszyfrowanego bloku danych [3]

Algorytm szyfrowania	Długość klucza szyfrującego [bity]	Rozmiar zaszyfrowanego bloku [bajty]
ElGamal	1024	512
	2048	1024
RSA	1024	128
	2048	256

Rozmiar bloku jest istotny w procesie deszyfrowania, gdyż proces ten wymaga podziału bloku na fragmenty o rozmiarze zgodnym z rozmiarem bloku obsługiwanego przez dany klucz. Ponadto wielkość bloku powoduje, że plik zaszyfrowany ma większy rozmiar niż przed zaszyfrowaniem. Powodem tego jest fakt, że do zaszyfrowania, np. w przypadku klucza 1024 bitowego algorytmu RSA, brano 86 bajtów, a otrzymano blok o wielkości 128 bajtów. Przy czym ilość cykli potrzebnych do zaszyfrowania pliku nie uległa zmianie.

Po zaszyfrowaniu dużej ilości danych najlepszym spośród testowanych algorytmów okazał się algorytm RSA. Niezależnie od rozmiaru pliku potrzeba było znacznie mniej czasu by zaszyfrować lub odszyfrować plik. W przypadku ElGamal po przekroczeniu 1 MB czas szyfrowania przekraczał 4 godziny. Natomiast algorytm RSA dobrze sobie radził do 20 - 21 MB. Po przekroczeniu rozmiaru inaczej niż w przypadku ElGamal czas szyfrowania pozostaje mały, ale czas deszyfrowania przekracza 4 godziny. Z tego też względu dane nie mogły zostać zebrane. Z powyższych rozważań wynika, że algorytm RSA szybciej szyfruje, a wolniej deszyfruje, a algorytm ElGamal odwrotnie. Poniżej w tabeli 6 dla obu algorytmów i ich kluczy został zaprezentowany średni stosunek czasu szyfrowania do czasu deszyfrowania.

Tab. 6. Średni stosunek czasu deszyfrowania do czasu szyfrowania [3]

Algorytm szyfrowania	Długość klucza szyfrującego	Czas deszyfrowania / Czas szyfrowania
ElGamal	1024	1:59
	2048	1:120
RSA	1024	2:1
	2048	2:1

Niewątpliwie na szybkość szyfrowania i deszyfrowania wpływ ma budowa algorytmu. W ramach przypomnienia algorytm ElGamal został oparty na trudności związanej z obliczeniem logarytmu dyskretnego, a algorytm RSA na trudności faktoryzacji dużych liczb złożonych. Również moc obliczeniowa procesora, czas dostępu do danej na dysku twardym oraz system pliku dysku twardego mogą skrócić lub wydłużyć proces szyfrowania i deszyfrowania.



#### 4. WNIOSKI

Spośród testowanych algorytmów najlepszym okazał się algorytm RSA. Potrzeba było znacznie mniej czasu by zaszyfrować plik niż w przypadku algorytmu ElGamal. Algorytm RSA w przeciągu 4h potrafi deszyfrować plik o rozmiarze 21 MB. Algorytm ElGamal w porównaniu do algorytmu RSA szybciej deszyfruje, a wolniej szyfruje. W przeciągu 4h potrafi zaszyfrować plik o rozmiarze 1 MB.

Algorytmy asynchroniczne nadają się do szyfrowania małych 1 MB plików. Poprzez zastosowanie dwóch kluczy: publicznego i prywatnego gwarantują duże bezpieczeństwo. W procesie szyfrowania niezależnie od zastosowanego algorytmu i długości klucza rozmiar pliku ulega zmianie.

#### LITERATURA

- [1] <http://etutorials.org/Programming/Programming+.net+security/Part+III+.NET+Cryptography>, 14 Luty 2012.
- [2] HOOK D.: Kryptografia w Javie. Od podstaw, ss. 121, 123 – 125, Helion. <http://pdf.helion.pl/krypja/krypja-4.pdf> [dostęp: 14.06.2012].
- [3] SCHNEIDER P.: Wydajność asynchronicznych algorytmów szyfrowania danych w systemie operacyjnym Linux, praca magisterska, Opole 2012.
- [4] TAN C. K.: C# BigInteger Class. <http://www.codeproject.com/Articles/2728/C-BigInteger-Class> [dostęp: 14.06.2012].
- [5] WOBST R.: Kryptologia. Budowa i łamanie zabezpieczeń, ss. 150, 159, 161, RM, Warszawa 2002.

**AGNIESZKA TISZBIEREK**

Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki  
Katedra Inżynierii Wiedzy

## **PORÓWNANIE MODELI TRÓJWYMIAROWYCH WYKONANYCH PRZY POMOCY DWÓCH METOD SKANOWANIA OBRAZU**

**Streszczenie:** Celem opracowania jest przedstawienie efektów pracy dwóch narzędzi do tworzenia komputerowej grafiki trójwymiarowej. Autor prezentuje i zestawia ze sobą, w celu porównania, modele trójwymiarowe otrzymane przy użyciu programów, których działanie opiera się na dwóch różnych trybach uzyskania wyników – metodzie on-line i off-line.

### 1. WSTĘP



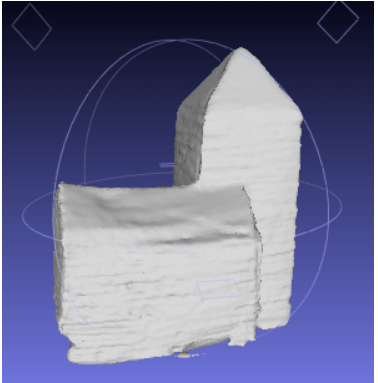

Prezentowane w artykule modele trójwymiarowe zostały wykonane przy pomocy dwóch różnych programów, reprezentujących dwie odmienne metody pobierania i odtwarzania obrazu trójwymiarowego. Pierwszym programem reprezentującym innowacyjną metodę skanowania on-line jest program ProFORMA. Program ten powstał stosunkowo niedawno 2009 roku, jako projekt studentów Uniwersytetu Cambridge. Jego autorzy Qi Pan oraz Gerhard Reitmayr, w dokumentacji, stwierdzają, że innowacyjnością tego programu jest nie tylko wykorzystanie algorytmu triangulacji Delaunay realizującego obliczenia, ale także możliwość śledzenia efektów pracy na bieżąco [1]. Tych cech niewątpliwie nie posiada metoda wykorzystywana w działaniu drugiego programu reprezentującego grupę programów bazujących na metodzie pobierania i odtwarzania obrazu trójwymiarowego off-line. Program DAVID – laserscanner, jest znanym programem, który już dość długo istnieje na rynku. Program ten jednak jest na bieżąco unowocześniany i doskonalony przez cały sztab autorów [2].

### 2. ZESTAWIENIE I PORÓWNANIE MODELI TRÓJWYMIAROWYCH.

Opisywane modele wirtualne powstały na podstawie modeli rzeczywistych zbliżonych do siebie zarówno kształtem jak i formą. Po całym procesie wykonania modeli, środowiska pracy (wymagane przy programie David- laserscanner), przystąpiono do drugiego etapu pracy, jakim było wykonywanie skanów i łączenie ich w jeden obiekt. Proces łączenia był wymagany jedynie przy pracy wykorzystującej metodę on-line. Program ProForma bowiem pobierał obrazy i łączył je w jeden obiekt na bieżąco, jednocześnie pozwalając użytkownikowi na podgląd i ewentualną modyfikację (naprawę błędów i braków). Ostatecznie powstały dwa modele trójwymiarowe. Można zatem było zestawić i porównana otrzymane wyniki i wyciągnąć adekwatne do zestawienia wnioski. Pierwszym istotnym zestawieniem, od

którego rozpoczęto analizę, było zestawienie modeli trójwymiarowych z ich rzeczywistymi pierwowzorami. Tak dobrane zestawienie pozwoliło określić, który z programów najlepiej swoją pracą „odzworowuje rzeczywistość”.

*Tabela. 1. Tabela zestawiająca modele trój wymiarowe użyte w procesie skanowania [3]*

Model trójwymiarowy	Model rzeczywisty
ProFORMA	
	
DAVID - laserscanner	
	

Analizując powyższe zestawienie (tab.1.) zauważono, że pomimo pewnych braków i niedoskonałości w wypełnieniu, modele trójwymiarowe były jednak kształtem i wyglądem bardzo zbliżone do swoich rzeczywistych

oryginałów. Naturalnie nie były idealne i łatwo zauważyć pewne rozbieżności. Jednak patrząc na modele z szerszej perspektywy, która dopuszcza pewien margines błędu, niedoskonałości nie są, aż tak liczne i nie mają znaczącego wpływu na jakość powstałych modeli trójwymiarowych.

Przypatrując się pierwszemu z modeli (wykonanemu przy pomocy programu ProFORMA) można było zauważyć pewne nierówności w „odwzorowywaniu” krawędzi modelu. Poszczególne fragmenty nie posiadały gładkich ścian, miejsca, w których łączyły się niektóre krawędzie były niedokładne, a także modele 3D posiadały nierówności i elementy niewystępujące na modelu rzeczywistym.

W przypadku drugiego modelu także można było zauważyć pewne „usterki”. Krawędzie modelu trójwymiarowego nie były tak ostre i wyraźne, jak było to widoczne w modelu rzeczywistym, a gładkość ścian w wizualizacji nie była już taka jak w oryginale.

Dużym plusem modeli był natomiast kształt identyczny z oryginałami, oraz brak nieciągłości w poszczególnych elementach i ścianach powstałych modeli trójwymiarowych. Dzięki temu były one ciągłe, jednolite i wyraziste.

Kolejnym etapem analizy wykonanych modeli było zestawienie obu modeli 3D razem tak, by możliwe stało się dokładne obejrzenie ich i porównanie ze sobą. Warto było przyrzeć się każdej ze ścian, a także modelom ustawionym w różnych perspektywach. Dzięki temu możliwe stało się dokładne porównanie oraz wyciągnięcie trafnych wniosków.

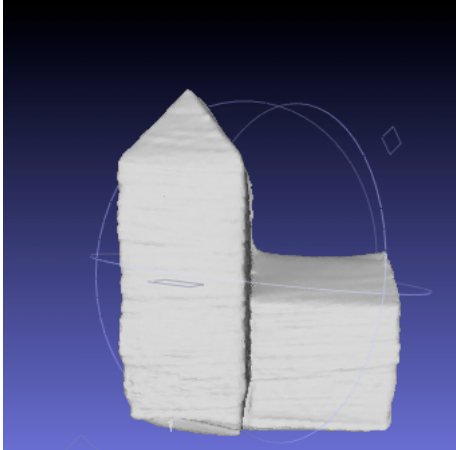



Zestawienie w tabeli wybranych ścian modeli trójwymiarowych obok siebie pozwoliło na precyzyjne porównanie każdej z nich z drugą wykonaną przy pomocy innej metody. Można było zauważyć wady i zalety poszczególnych elementów modeli widocznych jedynie w danym ustawieniu. Poszczególne ściany bowiem mogły różnić się między sobą jakością w zależności od układu.

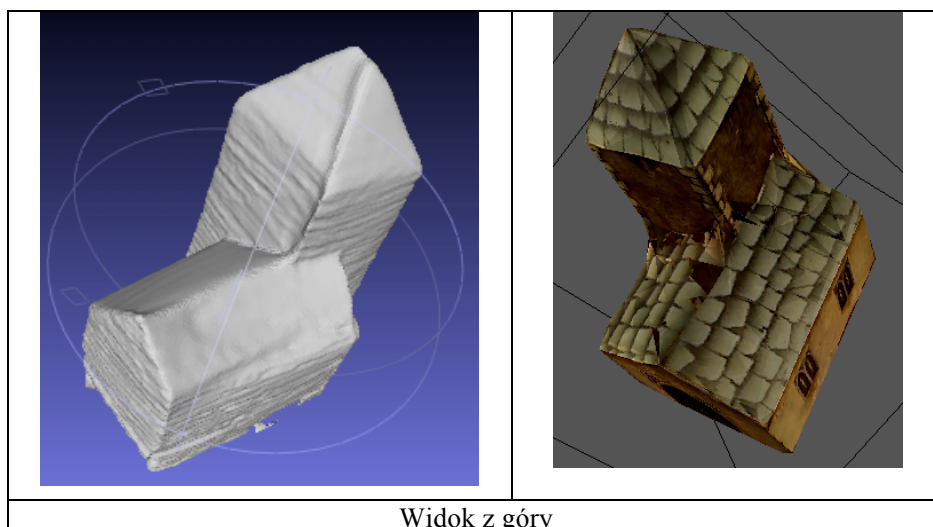
Analizując i porównując modele łatwo zauważalny był fakt, że na pewnych ścianach modelu wykonanego przy użyciu programu ProFORMA występują pewne zniekształcenia i wyrzuszenia. Niektóre ściany nie łączą się ze sobą pod kątem prostym (tak jak dzieje się to w modelu rzeczywistym), a w niektórych perspektywach widać nieprecyzyjność nałożonej tekstury. Jednak zaletą tego modelu są niewątpliwie idealnie ostre krawędzie oraz kształt prawie identyczny z oryginałem. Dodatkowym plusem była nałożona tekstura oraz brak nieciągłości w powierzchni modelu. Mimo swoich drobnych wad (przede wszystkim brak dokładnie odtworzonych niektórych ze ścian) model był bardzo dokładny i realistyczny. Można było zatem z całą pewnością uznać efekt pracy za bardzo dobry.

Przyglądając się drugiemu z modeli (wykonanemu przy użyciu programie DAVID – laserscanner), również zauważalne były zalety i wady. Najbardziej widoczną wadą był brak tekstury. Niestety wersja darmowa, w której był tworzony model, nie posiadała tej funkcji. Kolejną istotną wadą była nieostrość krawędzi i chropowatość ścian. Dodatkowym problemem technicznym stała się

możliwość mimowolnego zeskanowania wraz z modelem podstawki, na której stał. Fakt ten powodował, że odwzorowany trójwymiarowo dół modelu mógł być niedokładny. Próba usunięcia zbędnych elementów z modelu (taką możliwość daje jedna z funkcji programu) powodowała usunięcie podstawy i odkrycie brak wypełnienia wnętrza modelu. Jednak, pomimo wymienionych powyżej wad, także i ten model trójwymiarowy posiadał kształt idealny z kształtem rzeczywistego oryginału, a jego powierzchnia była ciągła i pozbawiona nieciągłości. W związku z tym w tym przypadku także efekt pracy można było ocenić jako bardzo dobry.

*Tabela. 2. Tabela zestawiająca modele będące efektem pracy [2]*

DAVID - laserscanner	ProFORMA
	
Widok z przodu	
	
Widok z boku	



Widok z góry

### 3. ZESTAWIENIE I PORÓWNANIE KOSZTÓW MATERIALNYCH ORAZ CZASU I PRACY UŻYTKOWNIKA

Ocenięcie efektów pracy i porównanie uzyskanych modeli trójwymiarowych jest tylko jednym aspektem wchodzącym w skład pełnego porównania. Prócz efektów bardzo ważne często są dodatkowe kwestie takie jak poziom trudności wykonania modelu czy obsługi programu, a także czas i praca włożona w jego wykonanie. Istotny często staje się również koszt materialny poniesiony przez użytkownika. Jeśli zatem potencjalny użytkownik miałby dokonać wyboru programu, to do wykonania rekonstrukcji modelu trójwymiarowego, musi on poznać nie tylko efekty pracy, ale zapoznać się także z pozostałymi aspektami.

*Tabela. 3. Tabela zestawiająca koszty wykonania modeli trójwymiarowych dwoma metodami [2]*

Poszczególne elementy	Program	
	ProFORMA	DAVID - laserscanner
<i>Czas pracy potrzebny do wykonania modelu</i>	Krótki; Proces jednorazowy; Efekty pracy widoczne w trakcie jego trwania; Brak procesu scalania	Długi; Czasochłonny i monotony proces skanowania; Wymagane częste powtórki; Efekt widoczny dopiero po zakończeniu skanowania, oświetlania linią lasera i wykonaniu kolejnych zdjęć; Częste powtarzanie

		procesów od nowa; Długi i pracochłonny proces scalania
<i>Praca włożona przez użytkownika</i>	Jednorazowa; Brak powtórzeń procesów; Wymagana praca: wolne obracanie modelem	Często powtarzana; Wymagana praca: obracanie modelu o dokładny kąt, oraz pobieranie zdjęcia za pomocą lasera (przynajmniej ośmiu zdjęć); Trudny, często powtarzany proces scalania
<i>Koszt materialny</i>	Zakup poszczególnych sprzętów: Komputer: 2500 zł Kamera : 100 zł Zakup systemu i programu: System operacyjny: (Linux) darmowy Program: (wersja testowa) darmowa	Zakup poszczególnych sprzętów: Komputer: 2500 zł Kamera : 100 zł Laser : 40 zł Zakup systemu i programu: System operacyjny: (Windows) 300zł Program : (wersja ograniczona) darmowa Wykonanie sceny: ok. 30zł Wykonanie stabilizatora laserowego: ok. 20 zł Koszt zakupu całkowitego zestawu (tj. program, laser, wykonana scena, kamera i instrukcja) : <u>399 euro + przesyłka</u>
<i>Tekstura</i>	Możliwość nałożenia; Czynność nieskomplikowana	Możliwość nałożenia jedynie w wersji płatnej; Czynność czasochłonna i skomplikowana
<i>Efekty</i>	Bardzo dobry	Bardzo dobry

Podobnie bywa z kosztami materialnymi, czasem oraz wkładem pracy. Dlatego warto było również zwrócić uwagę na te elementy pracy i je także zestawzić i porównać. Dzięki analizie poniższej tabeli, porównanie dwóch metod pozyskiwania modelu trójwymiarowego, staje się pełniejsze i bardziej świadome.

Po analizie można było z całą pewnością stwierdzić, iż program ProFORMA (oraz metoda zastosowana w jego działaniu) w ocenianych aspektach lepiej zdał egzamin. Okazał się programem tańszym (koszt

wymaganego sprzętu jest o wiele niższy od kosztu wymaganego sprzętu przy drugim z programów), wymagającym mniej poświęcenia od użytkownika (zarówno pracy, czasu oraz umiejętności), a dającym bardzo dobre efekty końcowe. ProFORMA to nowy projekt, dlatego też ciągle się rozwija, a wersja wykorzystana do zrobienia modelu była jedną z pierwszych wersji testowych. Efekty pracy programu nie były jeszcze idealne, ale zapewne z biegiem czasu i dalszej pracy nad programem będą stawały się coraz lepsze. Jednak już przy początkowej wersji programu można było dostrzec jego zalety. Obiekt rzeczywisty był skanowany i odtwarzany jednocześnie, co pozwalało użytkownikowi na bieżąco śledzić efekty pracy. Praca była jednorazowa i ograniczała się do powolnego obracania obiektu wokół kilku osi. Sam proces skanowania był krótki i nie wyczerpujący, natomiast proces scalania odbywał się w ogóle bez udziału użytkownika. Podobne zalety posiadał proces nakładania tekstury. Tak, więc użytkownik uzyskał bardzo dobry model w krótkim i prostym procesie. Dodatkową zaletą programu jest fakt i wersja testowa nie była wersją płatną, a posiadała wszystkie dostępne funkcje. Użytkownik zaoszczędził także w czasie zakupu sprzętu i oprogramowania. Do pracy z innowacyjnym programem potrzebny był jedynie podstawowy komputer (jedynie należało zwrócić uwagę na to by posiadał dobry procesor i kartę graficzną) oraz zwykła kamera internetowa. ProFORMA pracowała na systemie operacyjnym Linux, który jest darmowy, tak więc i w tej kwestii nie było obciążeń finansowych. Oczywiście środowisko to jest trudniejsze w obsłudze niż system operacyjny Windows, jednak autorzy zapowiadali, iż będą tworzyli kolejną wersję programu także pod system Windows. Niepotrzebny był żaden dodatkowy sprzęt czy scena. ProFORMA okazała się zatem wspaniałym przełomem w świecie grafiki trójwymiarowej, który zapoczątkował erę łatwiejszego i przyjemniejszego tworzenia wizualizacji 3D, dostępnych dla każdego użytkownika.

Zupełnie inaczej wygląda posumowanie pracy z drugim z porównywanych programów. Użytkownik wprawdzie uzyskał bardzo dobry efekt swojej pracy, jednak jej wkład w tworzenie modelu okazał się ogromny. Skanowanie modelu było procesem długim, męczącym i czasochłonnym. Należało tworzyć przynajmniej osiem skanów, bowiem tylko obracając obiekt o kąt  $45^\circ$ , można był uzyskać skany posiadające wspólne elementy ścian, a co za tym idzie zdolne do późniejszego scalania. Pobieranie jednego skanu trwało bardzo długo i polegało na powolnym przesuwaniu linią lasera po obiekcie od góry w dół i z powrotem. Czynność tą należało powtarzać tak długo aż otrzymało się pełny i nieposiadający „dziur” wirtualny obraz ściany. Oczywiście proces ten wymagał odpowiednich warunków takich jak zaciemnione pomieszczenie czy specjalnie przygotowana scena. Użytkownik więc musiał poświęcić dodatkowy czas na stworzenie sceny oraz stabilizatora laserowego (układu optycznego tworzącego „nóż świetlny”, wykonanego według własnego projektu). Okazało się bowiem, iż sam laser nie generuje potrzebnej wiązki światła, a jedynie sam punkt. Dodatkową wadą był fakt, iż efekty pracy nie były



widoczne od razu. Bardzo często powodowało to, że użytkownik po wykonaniu całej pracy uzyskiwał niezadowalający efekt i musiał powtarzać cały proces. Kolejnym wymaganiem względem użytkownika był proces scalania. Był on równie długi i żmudny bowiem należało testować różne metody łączenia pobranych zdjęć, gdyż każdy skan mógł lepiej bądź gorzej połączyć się z resztą przy pomocy danej metody. Również i w tym wypadku praca trwała długo, wymagała wiele czasu, a jej efekt był widoczny dopiero po jej ukończeniu. Kolejnym aspektem wartym omówienia były koszty. Użytkownik prócz podstawowego sprzętu, jakim jest komputer i kamera potrzebował także lasera, samodzielnie wykonanej sceny (tła składającego się z dwóch połączonych ze sobą pod równym kątem 90 stopni ścian, na które zostały naklejone odpowiednie tekstury) oraz swoistego stabilizatora (także wykonanego według własnego pomysłu). Oczywiście prócz pracy włożonej w wykonanie owych elementów wzrasta wydatek finansowy. Program wymagał systemu operacyjnego Windows, który także nie występował w wersji darmowej. Jedynym plusem był fakt, iż sam program można było uzyskać w wersji darmowej. Jednak wersja ta była ograniczona i pozbawiona pewnych funkcji. Oczywiście można było zakupić pełny zestaw programu (w jego wkład wchodził laser, gotowa scena, kamera, instrukcja oraz pełna wersja programu z dostępnym pełnym pakietem funkcji) jednak jego cena okazała się ogromna. Ostatnim aspektem, brany pod uwagę podczas oceniania, była tekstura. Wersja darmowa (wykorzystana przy tworzeniu modelu), jak już zostało wspomniane miała wyłączone pewne funkcje, w tym też funkcje nakładania tekstur. Oczywiście istniało wiele innych programów realizujących szczególne funkcje w procesie nakładania tekstur, jednak obraz pobierany, scalany, łączony i nakładanych w różnych programach nie jest idealny. Wtedy proces trwałby długo, byłby czasochłonny i męczący a efekty i tak były by niezadowalające.

Podsumowując można było zatem uznać, że program bazujący na starszej z omawianych metod skanowania obiektów rzeczywistych, jest bardziej kosztowny i wymagający. Natomiast efekty pracy obu programów były zbliżone. Dodatkowo, z racji ciągłego rozwoju programu ProFORMA, można spodziewać się coraz lepszych efektów pracy innowacyjnego projektu.

#### 4. PODSUMOWANIE

Wykonane i opisane zestawienie programów reprezentujących dwie istniejące metody tworzenia wizualizacji trójwymiarowych, metodę pobierania zdjęć off-line reprezentowaną przez program David – laserscanner oraz metodę pobierania zdjęć on-line wykorzystywaną w innowacyjnym programie ProFORMA, miało na celu nie tylko ukazanie wad i zalet obu metod, ale także przedstawienie i zapoznanie z nowopowstałym i wciąż rozwijanym programem ProFORMA. Tabele zawierające dane opisujące wymagania i koszty związane z pracą z każdym z opisywanych programów, jednoznacznie przekonują, że praca z programem ProFORMA jest łatwiejsza i daje lepsze efekty. Można było zauważyć zalety programu takie jak: prostota obsługi, łatwości i szybkość

wykonywania modeli trójwymiarowych. Użytkownik nie był już tak zaangażowany w pracę i nie musiał jej poświęcać, aż tak wiele czasu.

Porównując powstałe modele, w każdym z nich można było doszukać się drobnych wad. Oczywiście jeśli model tworzony przy pomocy programu DAVID – laserscanner, powstawałby przy użyciu pełniej wersji programu oraz w warunkach profesjonalnych, zapewne byłby doskonalszy. Jednak nie zawsze jest to możliwe bowiem, nie każdy grafik pracuje w specjalnym laboratorium i ma dostęp do drogiego, nowoczesnego sprzętu.

Z pewnością można uznać, że efekty pracy (powstałe modele trójwymiarowe), pomimo drobnych wad, uzyskały ten sam poziom jakości. Jednakże ciągle należy pamiętać, że prace nad programem ProFORMA wciąż trwają i istnieje ogromne prawdopodobieństwo, iż efekty pracy tego programu w niedługim czasie staną się lepsze i może nawet jakością przewyższą efekty pracy z darmową wersją programu David –laserscanner.

Ciągle rozwijająca się grafika trójwymiarowa stała się obecnie bardzo modną i atrakcyjną dziedziną, widoczną w wielu aspektach życia. Jest ona wykorzystywana w wielu projektach, ułatwia obsługę nowoczesnych aplikacji oraz pozwala wizualnie przedstawić (tak by w zagadnienie włączył się nie tylko autor, ale i audytorium) innowacyjne pomysły. Fakt ten niewątpliwie spowodował większe zainteresowanie tą specjalnością, nie tylko grafików czy informatyków ale także amatorów. Kiedyś żmudna i monotonna praca, a także koszty mogły odstraszać potencjalnych zainteresowanych. Jednak dzięki innowacjom i dalszemu rozwojowi, tworzenie wizualizacji staje się łatwiejsze i przyjemniejsze, a efekty uzyskuje się szybciej, co jeszcze bardziej motywuje do pracy i rozwoju technologii z tej specjalności.

Wizualizacje trójwymiarowe można obecnie dostrzec prawie wszędzie. Prawie każda nowinka technologiczna opiera się na wizualizacji 3D. Innowacje w tej dziedzinie pomagają lekarzom, architektom, geologom, wspierają konstruktorów i naukowców, a także bawią w kinie i w domu. Dlatego warto interesować się i poznawać tę specjalność informatyki. Szczególnie, że dzięki temu staje się ona dostępniejsza i ciekawsza.

Niestety większość innowacji powstaje za granicą. Dlatego też często trudnością staje się aspekt propagowania i docierania informacji poza granice państw macierzystych. Także bariera językowa (tłumaczenie tekstów technicznych w sposób jasny i klarowny) dość często blokuje przekaz informacji. Dlatego warto, aby osoby zajmujące się zawodowo tym tematem, pisząc artykuły i tłumacząc dokumentację, pomagały rozwinąć zainteresowania i uzyskać dodatkową wiedzę, osobom zaczynającym przygodę z grafiką trójwymiarową. Pozwoli to na lepszy i sprawniejszy przepływ informacji z tej tematyki, a w konsekwencji może nawet na dalszy jej rozwój.

**LITERATURA**

- [1] PAN Q., REITMAYR G., DRUMMOND T.: Documentation to the ProFORMA program. [http://mi.eng.cam.ac.uk/~qp202/my\\_papers/BMVC09/BMVC09.pdf](http://mi.eng.cam.ac.uk/~qp202/my_papers/BMVC09/BMVC09.pdf), marzec 2011.
- [2] DAVID 3.x User Manual Pages, [http://www.david-laserscanner.com/wiki/david3\\_user\\_manual/3d\\_laser\\_scanning](http://www.david-laserscanner.com/wiki/david3_user_manual/3d_laser_scanning)
- [3] TISZBIEREK A.: Praca magisterska – Nowoczesne metody tworzenia grafiki trójwymiarowej, Opole 2011.