

ZESZYTY NAUKOWE  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

---

SCIENTIFIC LETTERS  
OF RZESZOW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

---

NR 292

(e-ISSN 2300-6358)

# ELEKTROTECHNIKA

Kwartalnik

tom XXIII

zeszyt 34 (nr 3/2015)

lipiec-wrzesień



WYDZIAŁ  
ELEKTROTECHNIKI  
I INFORMATYKI  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Wydano za zgodą Rektora

Redaktor naczelny  
Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej  
prof. dr hab. inż. Leonard ZIEMIAŃSKI

Rada Naukowa  
prof. Lúbomir BEŇA (Słowacja), prof. Victor BOUSHER (Ukraina)  
prof. Stanisław GRZYBOWSKI (USA), prof. Michal KOLCUN (Słowacja)  
prof. Stefan KULIG (Niemcy), dr hab. Grzegorz MASŁOWSKI (Polska)  
prof. Stanisław PIRÓG (Polska)

Komitet Redakcyjny  
(afiliacja: Polska)

*redaktor naczelny*  
prof. dr hab. inż. Lesław GOŁĘBIEWSKI

*redaktorzy tematyczni (naukowi)*  
dr hab. inż. Adam BRAŃSKI, prof. PRz  
dr hab. inż. Marek GOTFRYD, prof. PRz  
dr hab. inż. Stanisław PAWŁOWSKI, prof. PRz  
dr hab. inż. Zbigniew ŚWIDER, prof. PRz

*redaktor statystyczny*  
dr inż. Wiesława MALSKA

*sekretarz redakcji*  
dr inż. Robert ZIEMBA

*członkowie*  
dr inż. Robert HANUS  
dr inż. Mariusz MAĆZKA

Redaktor językowy  
Piotr CZERWIŃSKI

Przygotowanie matryc  
Robert ZIEMBA

p-ISSN 0209-2662  
e-ISSN 2300-6358

Wersja drukowana Zeszytu jest wersją pierwotną.

Redakcja czasopisma: Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki,  
ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów (e-mail: ziemba@prz.edu.pl)  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika>

Wydawca: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej  
al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów (e-mail: oficyna1@prz.edu.pl)  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl>

Informacje dodatkowe – str. 93

## SPIS TREŚCI

Łukasz ZYCH, Tomasz BINKOWSKI: Wykorzystanie światła halogenowego w badaniu ogniw polikrystalicznych .....	5
Paulina BOJDA, Lúbomir BEŇA, Henryk WACHTA: Kreowanie iluminacji obiektów architektonicznych z uwzględnieniem oddziaływania oświetlenia drogowego .....	13
Wiesława MALSKA, Henryk WACHTA: Wykorzystanie modelu ARIMA do analizy szeregu czasowego.....	23
Joanna MAZIARKA, Lúbomir BEŇA, Henryk WACHTA: Analiza rozkładu widmowego wybranych źródeł światła w procesie stabilizacji barwy .....	31
Victor BUSER, Victorija YARMOLOVICH: Modeling and identification of systems with fractional order integral an differential.....	43
Mariusz TROJNAR: Komputerowa analiza obwodów nieliniowych prądu stałego .....	59
Ivanna BUBELA: Opracowanie wyników losowych obserwacji z płasko-normalnym rozkładem metodą statystyk pozycyjnych .....	71
Veronika HERASYMENKO, Oleh SEHEDA, Bohdan STADNYK: The features of flame temperature measurement .....	81
Olha OLESKIV, Ihor MYKYTYN: Metrological verification of cyber-physical systems .....	87

Łukasz ZYCH<sup>1</sup>  
Tomasz BINKOWSKI<sup>2</sup>

## WYKORZYSTANIE ŚWIATŁA HALOGENOWEGO W BADANIU OGNIW POLIKRYSTALICZNYCH

Energetyka odnawialna jest dziedziną na której skupia się wiele działań naukowych, a jej stosowanie wymuszane jest powstającymi aktami prawnymi. Nowe obiekty budowlane muszą posiadać przynajmniej jedno źródło energii odnawialnej. Wymusza to nacisk na powstawanie nowych laboratoriów, w których wyznaczane są podstawowe charakterystyki źródeł odnawialnych. Jednym z najbardziej popularnych źródeł energii odnawialnej jest panel składający się z ogniw polikrystalicznych. Wyznaczanie jego podstawowych charakterystyk i parametrów w warunkach laboratoryjnych wymaga stosowania sztucznego oświetlenia zastępującego warunki naturalne. Jednym ze źródeł światła, które można wykorzystać w badaniach laboratoryjnych, jest oprawa ze źródłem halogenowym. W prezentowanym artykule przedstawiono stanowisko badawcze zawierające oprawy halogenowe do realizacji naświetlenia dwóch paneli. Badane panele składające się z ogniw polikrystalicznych obciążane były regulowaną rezystancją o dużej mocy. W wyniku realizacji pomiarów wykreślone zostały podstawowe charakterystyki opisujące badane panele. Wyznaczono charakterystykę prądowo-napięciową dla różnych wartości napromieniowania, określono wpływ temperatury na zależność mocy paneli od napięcia, uwzględniając w wykonanych pomiarach różną wartość kąta padania światła na powierzchnię paneli. Przeprowadzone badania pozwoliły na stwierdzenie poprawności otrzymanych wyników w oparciu o konfrontację z danymi katalogowymi dostarczonymi przez producenta paneli. Zweryfikowano działanie diod zabezpieczających panele poprzez obserwację wpływu zacinienia częściowego poszczególnych sekcji ogniwa. Wyznaczono także charakterystyki dla różnych konfiguracji połączeń paneli. Sprawdzono połączenia szeregowo i równoległe paneli w celu wykreślenia charakterystyk pomocnych w konfiguracji elektrycznej. Przeprowadzone badania pokazują, że wyznaczenie podstawowych charakterystyk w warunkach laboratoryjnych z światłem halogenowym jest wystarczające do oceny energetycznej paneli.

**Słowa kluczowe:** PV, charakterystyki paneli, badania paneli, testy, weryfikacja energetyczna

---

<sup>1</sup> Łukasz Zych, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, 791687289, lukaszzych@gmail.com

<sup>2</sup> Autor do korespondencji: Tomasz Binkowski, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, 17 865 1974, tbinkow@prz.edu.pl

## 1. Wstęp

### 1.1. Ogniwa polikrystaliczne

Ogniwa z krzemu polikrystalicznego są najbardziej popularne w technice, nie ze względu na jakość i sprawność (14-18%) przetworzonej energii, lecz na cenę ich wytworzenia. Stosowane są popularnie w energetyce w celach produkcji energii elektrycznej[2]. Cechami charakterystycznymi dla tej odmiany są widoczne kryształy krzemu (niejednorodny kolor ogniwa) oraz kształt prostokątny, co wynika ze sposobu odlewania krzemu w prostopadłościennych formach[1].

### 1.2. Stanowisko pomiarowe

W celu przeprowadzenia pomiarów głównych charakterystyk związanych z panelami słonecznymi niezbędne jest stanowisko pomiarowe. Musi ono zostać zaopatrzone w odpowiednio silne źródło światła, o spektrum zbliżonym do słonecznego. W tym celu użyto lamp halogenowych o łącznej mocy 4 kW. Aby zbadać podstawową charakterystykę prądowo-napięciową, ogniwa muszą zostać obciążone regulowanym rezystorem dużej mocy. Posłużyło do tego elektronicznie sterowane obciążenie.

### 1.3. Parametry techniczne badanych ogniw

Źródłem mocy w stanowisku były dwa panele słoneczne polikrystaliczne składające się z 36 szeregowo połączonych ogniw każdy. Jest to standardowy panel z hartowanego szkła i aluminiowej obudowy. Tabela 1 zawiera parametry paneli podane przez producenta.

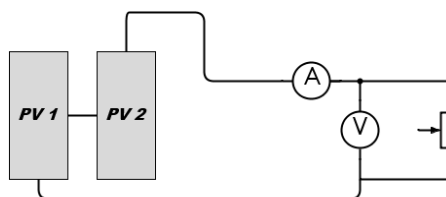
Tabela 1. Parametry badanych paneli polikrystalicznych

Table 1. The parameters of tested polycrystalline panels

Parametry	
Moc maks. [Pmax]	95 W
Napięcie nominalne [U]	12 V
Napięcie maks. (jałowe) [Uoc]	22 V
Napięcie w punkcie mocy maks. [Um]	17,5 V
Prąd zwarcia [Isc]	6,03 A
Prąd w punkcie mocy maks. [Im]	5,43 A
Wymiary [mm]	1035x660x35
Waga	8 kg

Panele zostały umieszczone na ruchomym stojaku pozwalającym na ich przemieszczanie oraz zmianę kąta względem głównego źródła światła. Na tylnej ścianie została umieszczona poziomicą pozwalająca na dokładne ustawienie względem ziemi. Na spodzie ramy zostały zamontowane dwa wentylatory służące do chłodzenia nagrzewających się od promieniowania baterii słonecznych. Sterowanie chłodzeniem odbywa się z głównego panelu kontrolnego. Rysunek 1 obrazuje połączenie paneli oraz sposób pomiaru parametrów.

Każdy z paneli został zabezpieczony dwiema diodami krzemowymi tzw. diodami bypass. Zapobiega to rozłączeniu obwodu podczas częściowego zaciemnienia panelu.

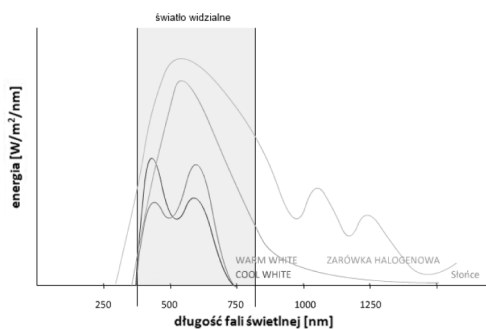


Rys. 1. Układ pomiarowy

Fig. 1. Measuring system

#### 1.4. Zestaw lamp halogenowych

Źródłem promieniowania świetlnego jest 8 lamp halogenowych o łącznej mocy 4 kW. Zamontowane zostały one na prostokątnej ramie w ustawieniu 2 x 4 punkty świetlne. Ramę przymocowano do blatu pomiarowego i zabezpieczono ją przed dostępem od strony użytkownika. Lampy halogenowe zostały użyte ze względu na zbliżone spektrum promieniowania do warunków naturalnych. Na rysunku 2 pokazano różnice między rozkładem długości fali słońca i żarówki halogenowej [1]. Wynikające różnice są powodem niedokładnych pomiarów promieniowania świetlnego.



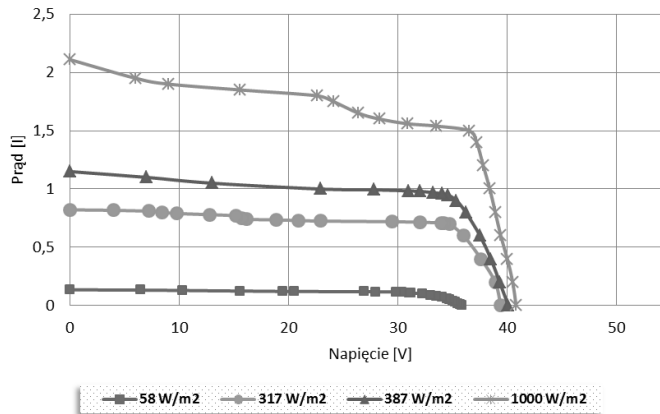
Rys. 2. Rozkład promieniowania żarnika halogenowego

Fig. 2. The radiation distribution of halogen filament

## 2. Wyniki pomiarów

### 2.1. Wpływ promieniowania - charakterystyka prądowo-napięciowa

Stopniowe zwiększanie wartości prądu obciążenia pozwala na wykreślenie charakterystyki z rysunku 3. Określa ona zależność prądu w funkcji napięcia. Z pomiarów wynika, że niskie wartości natężenia promieniowania nie powodują znacznego spadku napięcia. Znaczny spadek napięcia występuje po przekroczeniu tzw. punktu mocy maksymalnej. Moc w tym punkcie obliczymy mnożąc przez siebie napięcie i prąd w miejscu gdzie charakterystyka się załamuje.



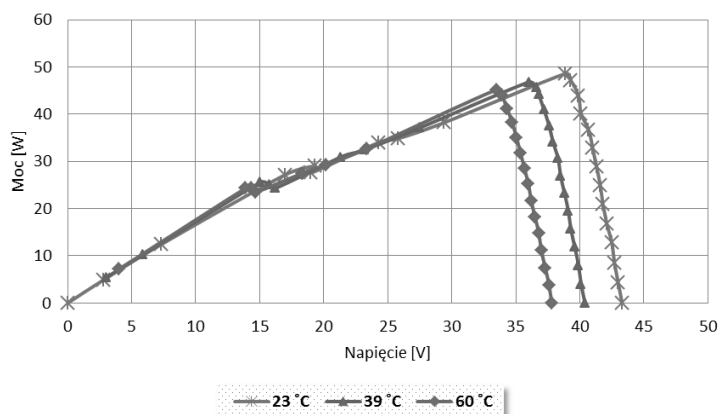
Rys. 3. Wpływ promieniowania na prąd i napięcie panelu

Fig. 3. The impact of radiation on the current and voltage of the PV panel

### 2.2. Wpływ temperatury na moc maksymalną panelu

Podczas normalnej eksploatacji paneli w ciągu dnia ich temperatura wzrasta. Wpływa to na sprawność, co przekłada się na mniejszą moc elektrowni słonecznych. Badania przeprowadzono przy stałym oświetleniu  $900 \text{ W/m}^2$ .

Wykreślone charakterystyki z rysunku 4 pozwalają wysunąć podstawowy wniosek: zwiększająca się temperatura ma negatywny wpływ na punkt mocy maksymalnej. Widać wyraźnie, że temperatura nie ma wpływu na początkowy kształt charakterystyki mocy, gdy ogniwo jest mocno obciążone (zakres od 0 do 30 V). Sytuacja zmienia się, gdy panel generuje maksymalną moc. Jej wartość wzrasta wraz ze spadkiem temperatury, dlatego dąży się do jak najefektywniejszego chłodzenia panelu w czasie eksploatacji. Powstają także konstrukcje łączące panele słoneczne z kolektorem noszące nazwę PVT (photovoltaic – thermal), jednak nie są zbyt często stosowane ze względu na wysoki koszt produkcji.

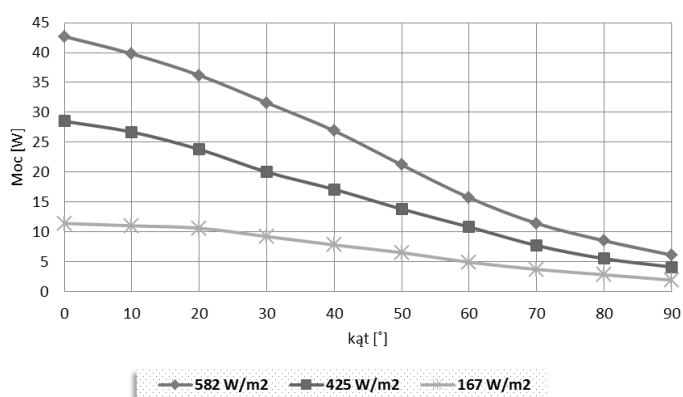


Rys. 4. Wpływ temperatury na moc maksymalną ogniw

Fig. 4. The effect of temperature on maximum PV power

### 2.3. Wpływ nachylenia panelu na moc maksymalną

Pomiar mocy maksymalnej względem zmieniającego się nachylenia panelu przeprowadzono dla trzech różnych wartości natężenia promieniowania (rys 5). Widać wyraźnie płynny spadek mocy przy zwiększającym się nachyleniu ogniw. Dzięki takim pomiarom można wnioskować, że niewielkie zmiany (rzędu 5-10°) mają stosunkowo mały wpływ na wydajność paneli. Wykorzystuje się to szeroko w elektrowniach, które nie posiadają systemu śledzenia słońca. W takim przypadku ogniwa są ustawione pod jednym ściśle określonym kątem, zależnym od szerokości geograficznej. W Polsce panele ustawiane są na południe oraz są nachylone względem podłoża o około 40°.



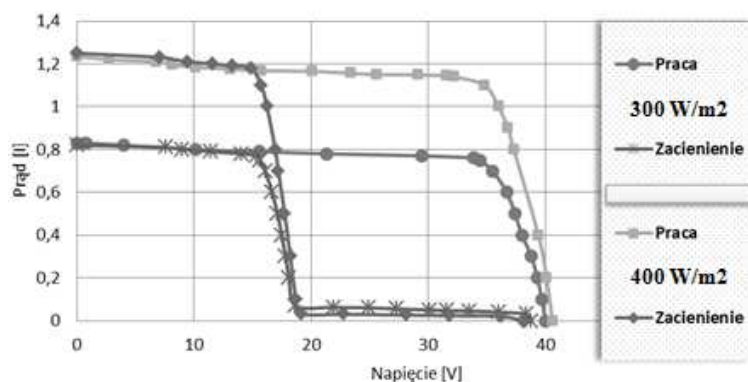
Rys. 5. Wpływ nachylenia na moc maksymalną ogniw

Fig. 5. Effect of inclination on the maximum PV power



## 2.4. Wpływ zacielenia panelu na moc maksymalną

Badanie wpływu zacielenia przeprowadzono dla dwóch różnych wartości napromieniowania w celu przedstawienia roli diod. Rysunek 6 obrazuje odłączenie jednego panelu i przejście prądu przez diody. Załamanie obu charakterystyk przebiega przy podobnej wartości napięcia (około 16 V) co potwierdza całkowity spadek napięcia na jednym z paneli. Z pomiarów wynika, że mimo braku produkcji prądu przez zacieleny panel, drugi pracuje bez zarzutu i przekazuje całą swoją moc do układu. W przypadku badanego panelu na dwóch diodach występuję spadek napięcia odpowiednio 0,7 V na każdą z nich, powodując spadek mocy maksymalnej jednego oświetlonego panelu.

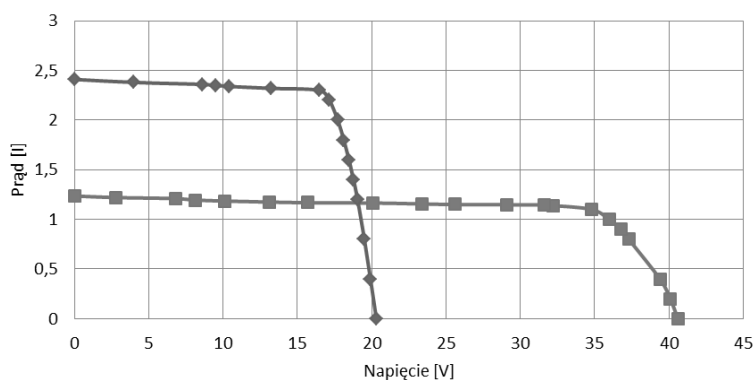


Rys. 6. Wpływ diod zabezpieczających na charakterystykę wyjściową paneli

Fig. 6. The impact of the security diodes on the PV output characteristics

## 2.5. Konfiguracja paneli – wpływ na prąd i napięcie

Badania przeprowadzono dla stałego napromieniowania 400 W/m<sup>2</sup>. Rysunek 7 obrazuje działanie paneli w dwóch konfiguracjach: szeregowej i równoległej. Podstawowa różnica to maksymalny osiągalny prąd oraz maksymalne napięcie pracy. Oczywiście jest, że przy połączeniu szeregowym będą sumować się napięcia, natomiast przy połączeniu równoległym zwiększy się wartość prądu maksymalnego. Połączenie szeregowe jest częściej wykorzystywane ponieważ łatwiej przetwarzać wysokie napięcie niż duży prąd. Natomiast duża wartość prądu powoduje duże straty ciepłone, co niekorzystnie wpływa na maksymalną produkowaną moc.



Rys. 7. Wpływ konfiguracji paneli na napięcie i prąd

Fig. 7. Impact of the panel configuration on the voltage and current

### 3. Wnioski

Przeprowadzone badania ogniw jednoznacznie potwierdzają charakterystyki wzorcowe, które umieszczają producenci na swoich stronach. Mimo stosunkowo słabego odwzorowania warunków naturalnych, kształty wszystkich charakterystyk były zgodne z oczekiwaniami.

Światło halogenowe doskonale nadaje się do odwzorowania charakterystyk, natomiast jego słaba moc w stosunku do słońca nie pozwala uzyskać maksymalnej mocy jaką dysponuje panel. Tego typu lampy są doskonałym zamiennikiem drogich źródeł światła imitujących światło słoneczne.

Biorąc pod uwagę fakt, że uzyskane charakterystyki nie odbiegają zasadniczo od postaci wzorcowych można stwierdzić, że prowadzenie testów laboratoryjnych i weryfikacja doświadczalna ogniw fotowoltaicznych w warunkach światła halogenowego może być z powodzeniem prowadzona w celu szacowania zysków energetycznych. Jest to szczególnie istotne w sytuacji, gdy istnieje konieczność wykorzystania niecertyfikowanych źródeł energii odnawialnej do zaspokajania potrzeb energetycznych budynków.

### Literatura

[1] Klugmann-Radziemska E.: Fotowoltaika w teorii i praktyce., BTC -Korporacja Paweł Zbysiński, Warszawa 2010.

[2] Szymański B.: Instalacje Fotowoltaiczne, GEOSYSTEM, 2014

## THE USE OF HALOGEN LIGHT IN A STUDY OF POLYCRYSTALLINE CELLS

### Summary

Renewable energy is an area on which it focuses a lot of scientific activities, and its use is enforced by the emerging legislation. New buildings must have at least one source of renewable energy. This forces an emphasis on the creation of new laboratories, which are determined the basic characteristics of renewable energy sources. One of the most popular sources of renewable energy is a panel consisting of polycrystalline cells. Determination of its basic characteristics and parameters in laboratory conditions requires the use of artificial lighting to replace the natural conditions. One of the light sources that can be used in laboratory tests is an halogen source. The article shows the test stand containing halogen lights to the exposures two panels. Test panels consisting of polycrystalline cells were charged with adjustable resistances with high power. As a result of the implementation of the measurements the basic characteristics describing the test panels have been plotted. The characteristics of current-voltage for different values of irradiation, referred to the effect of temperature on the relationship under voltage panels, having made the measurement of different lighting angle to the surface of the panels have been achieved. The conducted studies have helped to establish the correctness of the results obtained on the basis of confrontation with manuals provided by the manufacturer of the panels. The working protective diode panels by observation of the influence of partial shading of each section links have been verified. The characteristics for different connection configuration panels have been shown. The serial and parallel connection of a panels in order to plot characteristics helpful in setting up the plant have been corrected. The studies show that the determination of the main characteristics in the laboratory with halogen light is sufficient to assess the energy efficiency of the panels.

**Keywords:** PV, PV characteristics, research of PV panels, tests, verification of power engineering

DOI: 10.7862/re.2015.25

*Tekst złożono w redakcji:* maj 2015

*Przyjęto do druku:* wrzesień 2015

Paulina BOJDA<sup>1</sup>  
Lúbomir BEŇA<sup>2</sup>  
Henryk WACHTA<sup>3</sup>

## KREOWANIE ILUMINACJI OBIEKTÓW ARCHITEKTONICZNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM ODDZIAŁYWANIA ÓŚWIETLENIA DROGOWEGO

Artykuł obejmuje problematykę projektowania iluminacji obiektów architektonicznych, będących w strefie wpływu oświetlenia drogowego. Poprawnie wykonany projekt iluminacji poza koncepcją oczekiwanego efektu oświetleniowego powinien uwzględniać istniejące środowisko świetlne, które ma istotny wpływ na końcowy efekt planowanej realizacji iluminacji. W artykule przedstawiono problem emisji środowiska świetlnego na iluminowany obiekt, oraz możliwości jej ujęcia jako elementu tworzonej koncepcji iluminacji. Z drugiej strony podjęto próby oceny możliwości eliminowania niekorzystnych efektów świetlnych pochodzących od opraw oświetleniowych poprzez oświetlenie iluminacyjne. Prace zrealizowano opracowując model komputerowy odwzorowujący przykładowy budynek rzeczywisty zlokalizowany przy ulicy 3 Maja w Rzeszowie. Zaproponowano dwa rozwiązania iluminacji uwzględniającej oświetlenie drogowe dla wybranego obiektu. Prace projektowe związane z przygotowaniem reprezentacji geometrycznej obiektu oraz sceny świetlnej, a także rozkładu luminancji na powierzchniach oświetlanych, przeprowadzono z wykorzystaniem graficznej aplikacji komputerowej.

**Słowa kluczowe:** oprawy drogowe, rozkład luminancji, wizualizacja komputer.

### 1. Wprowadzenie

Często wybrane do iluminacji obiekty architektoniczne są zlokalizowane w bliskim sąsiedztwie dróg oraz szlaków komunikacyjnych, które są oświetlone za pomocą opraw ulicznych. Tworzą one warunki świetlne, które wraz z projektowaną iluminacją mogą realizować spójny obraz oświetlanego obiektu.

---

<sup>1</sup> Paulina Bojda, Politechnika Rzeszowska, absolwentka WEiI PRz., paulbojda@gmail.com

<sup>2</sup> Lúbomir Beňa, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 865 1977, lbena@prz.edu.pl

<sup>3</sup> Autor do korespondencji: Henryk Wachta, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 865 1977, hwachta@prz.edu.pl

Niekiedy oświetlenie drogowe może zostać wykorzystane jako część planowanej kreacji iluminacji, stanowiącą wstępne rozjaśnienie i podkreślenie konturów budynku, który należy uzupełnić iluminacją uwydatniającą rzeźbę oraz poszczególne detale architektoniczne. Aby uwzględnienie oświetlenia drogowego było możliwe, musi ono dostatecznie intensywnie i równomiernie oświetlać płaszczyznę elewacji. Poziom luminancji, która pozwala na wyróżnienie obiektu z tła wynosi zaledwie  $4 \text{ cd/m}^2$  [3, 11]. Złożenie efektu oświetlenia drogowego oraz właściwej iluminacji pozwala zredukować liczbę opraw oświetleniowych potrzebnych do uzyskania atrakcyjnego efektu iluminacji, przy zmniejszonej mocy zainstalowanej zastosowanego sprzętu oświetleniowego, co pociąga za sobą niskie koszty eksploatacji oraz korzyści na polu ekonomicznym związane z kosztami inwestycyjnymi.

W przypadku, gdy oświetlenie pochodzące od lamp drogowych jest zbyt słabe, aby mogło być wykorzystane jako autonomiczna część iluminacji, należy dążyć do opracowania takiego sposobu wprowadzenia światła iluminacyjnego, aby niekorzystny rozkład luminancji dodatkowo pochodzącej z otoczenia był niezauważalny. Nie bez znaczenia pozostaje parametr barwy wykorzystanych w oprawach ulicznych źródeł światła, która może zniekształcić odbiór barwy oświetlanej płaszczyzny, a nawet stworzyć nieestetyczny rezultat.

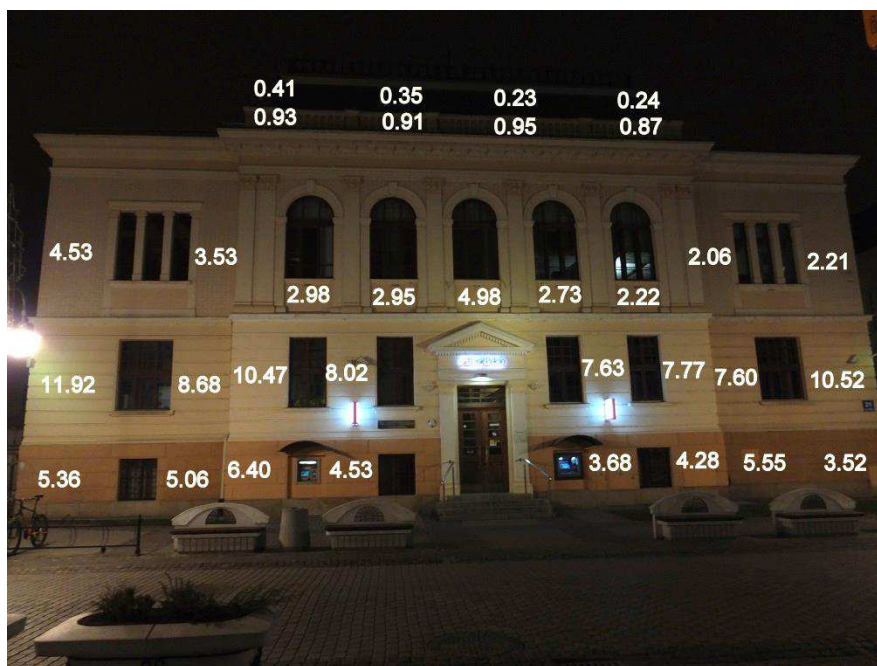
Najczęściej spotykanym typem źródeł w oświetleniu ulicznym są źródła sodowe, które charakteryzują się ciepłobiałą barwą o temperaturze barwowej na poziomie 2700-3000K. Barwa ta nie jest odpowiednia dla powierzchni w kolorach zbliżonych do niebieskiego i zielonego, gdyż odbierany jest on jako brudnoszary oraz mało estetyczny [9, 12], może także utrudniać stworzenie barwnej kreacji iluminowanej elewacji i ograniczyć wybór stosowanych opraw iluminacyjnych. Tego rodzaju źródła światła cechuje współczynnik oddawania barw o wartości na poziomie 20-40 %, słabe odwzorowanie kolorów oraz kontrastu barwy, powoduje zniekształcenie odbieranego obrazu barwnych, bogatych w detal architektoniczny elewacji [8, 9].

## 2. Cechy środowiska świetlnego

W zależności od rodzaju zastosowanych opraw oświetleniowych ulicznych oraz ich rozkładu strumienia świetlnego w przestrzeni, budynek znajdujący się w pobliżu może zostać oświetlony w sposób zalewowy, w całości – taki przypadek ma miejsce, gdy lampy drogowe emitują strumień świetlny zarówno w półprzestrzeń dolną jak i górną, np. stylizowane oprawy oświetleniowe, stosowane przy drogach pełniących funkcję deptaka w centrum miasta. Zazwyczaj jednak spotykane są oprawy emitujące światło w półprzestrzeń dolną, w związku z czym, intensywnie doświetlone zostają dolne kondygnacje, a poziom luminancji zmniejsza się w osi pionowej, osiągając minimalne wartości w górnych partiach budynku, w strefie szczytowego gzymsu. W tym

przypadku zaburzona zostaje zasada wzmocnienia wysokości, związana z postrzeganiem dziennym obiektu na jasnym tle otoczenia. Obraz nocny obiektu nie jest w takiej sytuacji zgodny z widokiem dziennym. Lampy zlokalizowane blisko budynku często tworzą na płaszczyźnie elewacji akcenty świetlne o podwyższonej luminancji w ramach określonego konturu, które nie zawsze rozłożone są w sposób symetryczny. To zaś znacznie utrudnia stworzenie harmonijnego wizerunku nocnego obiektu, bądź prowadzi do podjęcia decyzji o potrzebie przesunięcia oprawy oświetlenia ulicznego jeżeli jest to możliwe lub konieczności rezygnacji z iluminacji obiektu.

Przedstawiony na rysunku 1 [2] rozkład luminancji na elewacji wybranego do analizy obiektu charakteryzuje się wzrostem wartości luminancji w części centralnej budynku, na poziomie I kondygnacji, szczególnie w obszarze bocznych skrzydeł.



Rys.1. Rozkład luminancji – istniejące warunki na analizowanej elewacji

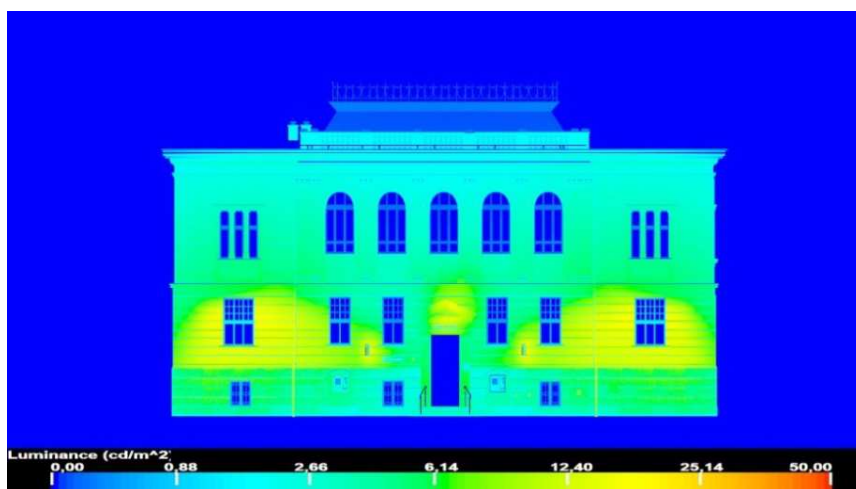
Fig.1. The luminance distribution – analyzed the existing conditions on the facade

Istniejące oprawy uliczne cechuje szeroki rozsył światłości, emitują one strumień świetlny zarówno w górną jak i dolną półprzestrzeń. Na efekt rozjaśnienia elewacji wpływa również jasna tonacja żółtych kolorów powierzchni budynku, na ciemnym tle, które wzmacnia ciepłobiała barwa źródeł światła na poziomie 3000 K.

### 3. Opracowanie modelu komputerowego do badań

Wstępnie ustalono, że iluminowana zostanie wyłącznie elewacja frontowa budynku, ze względu na najbardziej atrakcyjną rzeźbę, a także możliwości jej wielokierunkowej obserwacji. W przestrzeni wirtualnej komputerowego oprogramowania graficznego, na podstawie zgromadzonej dokumentacji fotograficznej, utworzono model reprezentacji geometrycznej elewacji budynku Banku Pekao SA II w Rzeszowie, z dokładnością odwzorowania detalu architektonicznego, wynikającą z konieczności rozróżniania elementów w porze dziennej oraz ustalonej koncepcji iluminacji, a także przyjętych kierunków i odległości obserwacji. W kolejnym etapie prac projektowych, zdefiniowano materiały oraz ich cechy refleksyjno-transmisyjne, na podstawie wykonanych wcześniej fotografii oraz pośredniego pomiaru współczynnika odbicia, metodą dwukrotnego pomiaru natężenia oświetlenia [4].

Do opracowania sceny świetlnej, reprezentującej istniejące warunki oświetleniowe, pochodzące z otoczenia, wykorzystano pliki w formacie IES, zawierające informację na temat rozsyłu światłości zastosowanych opraw, definiowane oraz udostępniane przez producenta sprzętu oświetleniowego. Na podstawie wykonanej dokumentacji fotograficznej oraz pomiaru luminancji w charakterystycznych punktach elewacji, wprowadzono do przestrzeni wirtualnej programu zastępcze źródła światła, sterując ich parametrami w taki sposób, aby uzyskiwane rozkłady luminancji oraz efekt wizualny, były jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych.



Rys.2. Odwzorowanie symulacyjne istniejących warunków oświetleniowych

Fig.2. Simulation of current lighting conditions

Wykonanie obliczeń fotometrycznych oraz kolorymetrycznych przeprowadzono przy pomocy algorytmu obliczeń bilansu energetycznego *Radiosity*. Efektem obliczeń była fotorealistyczna wizualizacja przedstawiająca istniejące w rzeczywistości warunki oświetleniowe, a także rozkład luminancji na oświetlonej powierzchni (rys.2) [1, 5, 6].

#### 4. Praktyczna realizacja iluminacji obiektu architektonicznego z uwzględnieniem oddziaływania oświetlenia drogowego

Zamierzeniem opracowanej iluminacji było podkreślenie atrakcyjnej formy architektonicznej budynku oraz wyeksponowanie jej w nocnym obrazie przestrzeni miejskiej. Pierwsza koncepcja (rys.3) [1] zrealizowana została metodą punktową. Istniejące warunki oświetleniowe, pochodzące od opraw ulicznych zainstalowanych wzdłuż ciągu pieszego, wykorzystano jako oświetlenie płaszczyznowe, służące podkreśleniu i uwydatnieniu kubatury całej elewacji, tworząc warstwę tła. Ta zaś uzupełniona została w akcenty świetlne uwydatniające bogatą rzeźbę detalu architektonicznego. Iluminacja obejmuje także rozświetlenie patynowanego dachu wraz z efektownym elementem dekoracyjnym w postaci kutej balustrady, których oświetlenie pochodzące z otoczenia nie obejmowało ze względu na wysokość położenia. Wykorzystano źródła światła o temperaturze barwowej ustalonej na poziomie 3000 Kelwinów, która wzmocniła ciepłą tonację elewacji. Wykorzystanie oświetlenia dekoracyjnego jako elementu rozświetlenia konturowego było możliwe dzięki relatywnie jednorodnym plamom świetlnym na elewacji oraz oprawom drogowym kierującym część promieni świetlnych w górną półprzestrzeń.



Rys.3. Rozmieszczenie oraz nacelowanie sprzętu oświetleniowego – wariant 1

Fig.3. Arrangement of lighting equipment – option 1

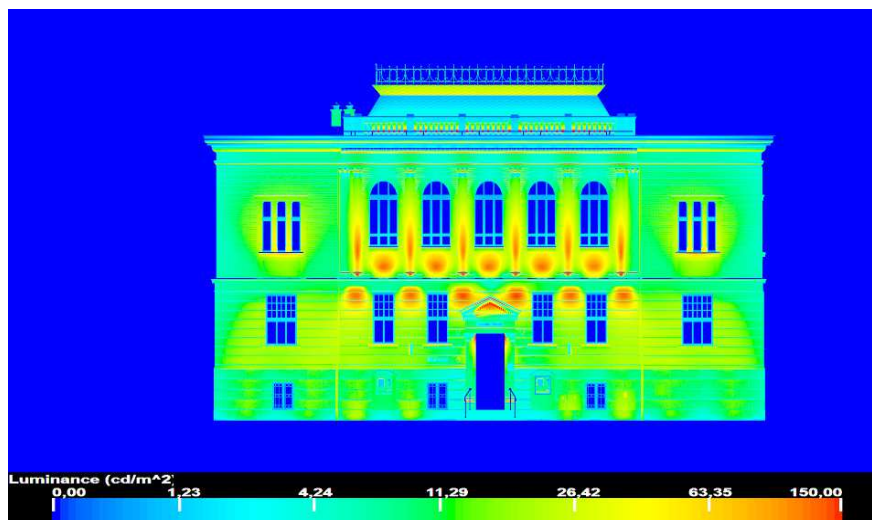




Rys.4. Finalna wizualizacja komputerowa iluminacji – wariant 1

Fig.4. The final computer visualization of illumination – option 1

Na wygenerowanej wizualizacji rozkładu luminancji (rys.5) [1] oświetlonej elewacji dominuje kolor odpowiadający wartościom luminancji na poziomie kilkunastu  $\text{cd/m}^2$ , które są zgodne z zaleceniami [7].



Rys.5. Analiza rozkładu luminancji – wariant 1

Fig.5. Luminance distribution analysis – option 1

Drugi wariant koncepcji iluminacji analizowanego obiektu (rys.6) [1], jest rozwinięciem poprzedniego. Uzyskany efekt oświetleniowy różni się jednak znacząco. W tym przypadku finalny efekt emisji świetlnej otoczenia jest niezauważalny. Przewidziano instalację systemu opraw liniowych na poziomie gzymsu rozdzielającego I i II kondygnację, włączając również projektory zainstalowane wzdłuż pilastrów, które dodatkowo podkreślają plastyczną kompozycję części centralnej budynku na poziomie II kondygnacji, bogatą w ornamentykę. Dzięki takiemu rozwiązaniu wyeliminowany zostaje niekorzystny efekt lokalnych rozjaśnień elewacji pochodzący od oświetlenia drogowego.

Wzrok obserwatora przyciąga rozświetlona sylwetka budynku, skupiając uwagę na akcentowanych światłem detalach architektonicznych. Temperatura barwowa opraw iluminacyjnych tak jak w poprzednim przypadku, wynosi 3000 Kelwinów, próby zastosowania innej barwy nie przyniosły zadowalającego rezultatu estetycznego.



Rys.6. Rozmieszczenie oraz nacelowanie sprzętu oświetleniowego – wariant 1

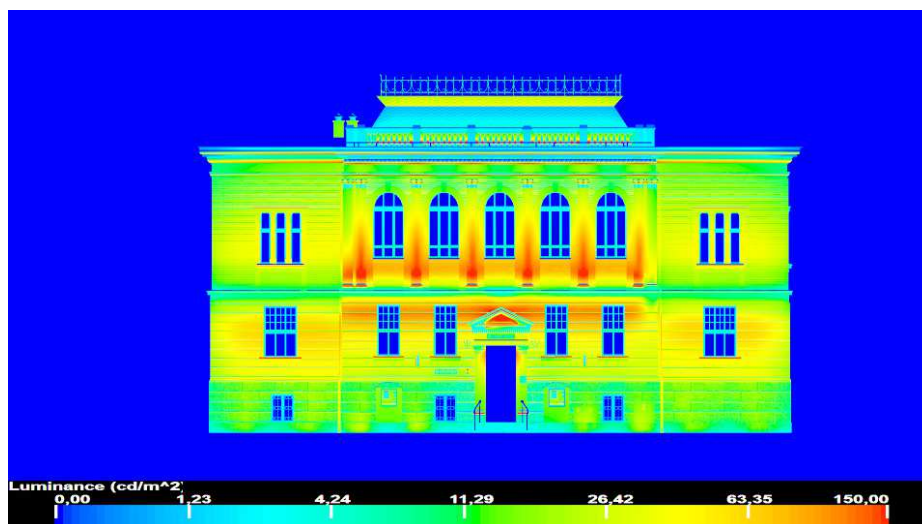
Fig.6. Arrangement of lighting equipment – option 1

Dzięki zastosowaniu opraw liniowych o szerokim rozsyłe światłości rozkład luminancji na badanej płaszczyźnie (rys.8) [1] jest równomierny i utrzymuje się na poziomie kilkunastu  $\text{cd/m}^2$  [7].



Rys.7. Finalna wizualizacja komputerowa iluminacji – wariant 1

Fig.7. The final computer visualization of illumination – option 1



Rys.8. Analiza rozkładu luminancji – wariant 1

Fig.8. Luminance distribution analysis – option 1

Następująco przedstawia się aspekt ilości opraw iluminacyjnych i mocy sumarycznej dwu wariantów iluminacji [10]:

Tabela 1. Zestawienie użytego sprzętu oraz uzyskany poziom mocy instalacji iluminacyjnej

Table 1. Summary of the used equipment and the resulting power level of floodlights

Typ oprawy	Ilość opraw	Całkowita moc zainstalowana [kW]
<b>WARIANT 1</b>		
Philips eW Graze QLX Powercore (42 W)	33	1,8
Philips DecoScene LED BBP621 (27 W)	8	
Thorn Qba LED (24 W)	6	
Philips DecoFlood <sup>2</sup> LED Mini (27 W)	2	
<b>WARIANT 2</b>		
Philips eW Graze QLX Powercore (42 W)	88	4,1
Philips DecoScene LED BBP621 (27 W)	8	
Thorn Qba LED (24 W)	6	
Philips DecoFlood <sup>2</sup> LED Mini (27 W)	2	

## 5. Podsumowanie

Proces projektowania iluminacji obiektów architektonicznych jest zadaniem wieloetapowym, wymagającym uwzględnienia wielu czynników mających wpływ na uzyskany efekt końcowy. Poza kryteriami dotyczącymi uwarunkowań technicznych, architektury, funkcji obiektu czy kierunków obserwacji, bezwzględnie należy uwzględnić wpływ oświetlenia pochodzącego od opraw ulicznych. Oświetlenie to może nieść za sobą szereg niekorzystnych czynników, które mogą utrudniać, bądź uniemożliwić wykonanie iluminacji. Ewentualne ograniczenia mogą wynikać z niezgodności temperatury barwowej oświetlenia drogowego oraz wyspecyfikowanego do iluminacji. Pewnym ograniczeniem może też być zbyt bliska lokalizacja słupów oświetleniowych skutkująca zbyt jaskrawymi lokalnymi plamami świetlnymi na elewacji.

Przeprowadzone analizy symulacyjne potwierdziły możliwość wykorzystania pozytywnych cech oddziaływania środowiska świetlnego na iluminowaną elewację w postaci oświetlenia konturowego, ujmując je jako autonomiczną część kreowanej iluminacji oraz minimalizując w ten sposób potrzebną moc zainstalowaną, a w konsekwencji koszty eksploatacyjne instalacji. Przeanalizowano także z powodzeniem możliwość ukrycia niekorzystnych efektów świetlnych w postaci nierównomiernego rozkładu luminancji na elewacji, stosując przemyślane umieszczenie sprzętu oświetleniowego.

## LITERATURA

- [1] Autorskie wizualizacje komputerowe wykonane w programie Autodesk 3ds MAX 2013
- [2] Dokumentacja fotograficzna autorów

- [3] Bąk J., Pabjańczyk W.: Podstawy techniki świetlnej, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1994
- [4] Bojda P.: Zastosowanie metody fotorealistycznej trójwymiarowej symulacji komputerowej w projektowaniu iluminacji obiektów architektonicznych, praca dyplomowa, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2015
- [5] Krupiński R.: Modelowanie 3D dla potrzeb iluminacji obiektów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011
- [6] Pasek J.: Wizualizacje architektoniczne, HELION 2011
- [7] Raport CIE 094-1993, Guide for Floodlighting
- [8] Ratajczak J.: Oświetlenie iluminacyjne obiektów architektonicznych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009
- [9] Wiśniewski A.: Elektryczne źródła światła, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010
- [10] [www.lighting.philips.pl](http://www.lighting.philips.pl) (09.02.2015)
- [11] Żagan W.: Iluminacja obiektów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003
- [12] Żagan W.: Podstawy techniki świetlnej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011

Praca została wykonana z wykorzystaniem aparatury zakupionej w wyniku realizacji Projektu: „Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej”, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Projektu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013, Oś priorytetowa 1 – Konkurencyjna i innowacyjna gospodarka.

## **CREATING ARCHITECTURAL ILLUMINATION, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF ROAD LIGHTING**

### **S u m m a r y**

The article presents the idea of designing architectural illumination which affects the road lighting. Properly created illumination project include the concept of the expected effects of the lighting and existing lighting environment. It has a great impact on the final result of the planned illumination. The paper presents the problem of environmental immersion light on the illuminated architectural object and proposes the possibility of forming it as a part of illumination. On the other hand analyzed the possibility of eliminating negative effects of light from road luminaires by floodlighting. Practical use of a combination of road lighting with illumination, was illustrated with the example of the real building – Bank Pekao SA II in Rzeszów. The authors proposed two solutions of illumination taking into account road lighting for the selected object. The virtual geometrical model of the building, lighting scene and calculations of the size of the light were realized with the use of the graphic computer applications.

**Keywords:** road luminaires, luminance distribution, computer visualization

DOI: 10.7862/re.2015.26

*Tekst złożono w redakcji:* maj 2015

*Przyjęto do druku:* wrzesień 2015

Wiesława MALSKA<sup>1</sup>  
Henryk WACHTA<sup>2</sup>

## WYKORZYSTANIE MODELU ARIMA DO ANALIZY SZEREGU CZASOWEGO

W artykule zaprezentowano zastosowanie metody ARIMA służącej do analizy szeregu czasowego z trendem i sezonowością. Szereg czasowy jest jednym z rodzajów szeregów statystycznych, który można zdefiniować jako ciąg obserwacji pewnego zjawiska w kolejnych jednostkach czasu (latach, kwartałach, miesiącach, itp.). Analiza szeregów czasowych opiera się na głównym założeniu, że kolejne wartości rozważanej cechy (zmiennej) reprezentują kolejne pomiary wykonane w takiej samej jednostce czasu (w równych odstępach czasu). Zmienną niezależną jest czas (jednostka czasu). Obserwując różne zjawiska (w tym także związane z gospodarką elektroenergetyczną) często chcemy wiedzieć czy i jak zmieniają się w czasie, czyli jaka jest ich dynamika. Analiza szeregów czasowych stosowana jest głównie do podejmowania decyzji związanych z przyszłością. Rozważane zjawisko może podlegać pewnym prawidłowościom, których wykrycie i opis jest głównym celem analizy szeregów czasowych. W wielu przypadkach modele szeregów czasowych wykorzystywane są w celu wnioskowania o przyszłości badanego zjawiska (do prognozowania). Prognozowanie w ujęciu statystycznym to wnioskowanie o przyszłych wartościach szeregu czasowego, które oparte jest na danych czasowych lub analizie wartości, jakie przyjmują rozważane cechy statystyczne (zmienne). Przy analizie w dziedzinie czasu w szeregu czasowym można wyodrębnić pewne składowe (stały przeciętny poziom zjawiska, trend, cykle długookresowe, wahania sezonowe, wahania krótkookresowe, interwencje, składnik losowy (zakłócenie losowe)), przy czym nie wszystkie one muszą występować w konkretnym analizowanym szeregu. Metoda prognozowania zależy od składowych szeregu czasowego. Wyniki obliczeń z wykorzystaniem modelu ARIMA zaprezentowano korzystając z pakietu STATISTICA v. 10.0.

**Słowa kluczowe:** szereg czasowy, metody analizy szeregów czasowych, prognozowanie, model ARIMA.

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Wiesława Malska, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, 17 865 1974, [wmalska@prz.edu.pl](mailto:wmalska@prz.edu.pl)

<sup>2</sup> Henryk Wachta, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, 17 865 1977, [hwachta@prz.edu.pl](mailto:hwachta@prz.edu.pl)

## 1. Wstęp

Różnorodne aspekty zjawisk gospodarczych, które związane są z zapotrzebowaniem, produkcją i zużyciem energii elektrycznej wymagają różnorodnych informacji o charakterze tego procesu. Informacji dotyczących przeszłości tego procesu dostarczają nam instytucje (Główny Urząd Statystyczny, Eurostat, itp.), a informacji dotyczących przyszłości, czyli prognoz elektroenergetycznych wymaga się w procesach planowania rozwoju i eksploatacji całego systemu elektroenergetycznego. Znaczenie i ważność prognozowania elektroenergetycznego znalazło formalne uzasadnienie w ustawie Prawo energetyczne i w rozporządzeniach Ministra Gospodarki. Analizę różnego typu zjawisk masowych, wykorzystując metody statystyczne przeprowadza się na podstawie analizy szeregów czasowych. W szeregach czasowych zmienną niezależną jest czas, a zmienną zależną są wartości liczbowe badanego zjawiska. Analiza szeregów czasowych należy do działu statystyki, która wykorzystywana jest w praktyce gospodarczej. Podstawowym celem analizy jest uzyskanie możliwości prognozowania przebiegu zjawisk, a także uzyskanie odpowiedzi na pytanie, jakie mechanizmy powodowały taki, a nie inny przebieg rozważanego zjawiska. Celem jest także możliwość symulacji w oparciu o model zawierający zmienne, których zmiana daje możliwość obserwacji efektu. Szeregi czasowe są realizacjami pewnych procesów stochastycznych. Szereg czasowy jest próbą z procesu stochastycznego. Na podstawie analizy szeregu czasowego chcemy poznać właściwości mechanizmu, który go wygenerował, czyli procesu stochastycznego. Wybór odpowiedniej metody analizy szeregu czasowego często jest zdeterminowany jednostką czasu, wg której „mierzone” określone zjawisko.

Do typowych elementów składowych procesu generującego szereg należy trend, wahania okresowe, wahania losowe oraz interwencje w proces (nagłe zmiany spowodowane czynnikami zewnętrznymi), itp. W większości analiz statystycznych przyjmuje się, że wahania losowe są generowane przez rozkład normalny o wartości oczekiwanej równej zero i stałej wariancji. Prognozowanie to wnioskowanie o przyszłym przebiegu zdarzeń oparte na danych czasowych lub też na analizie wartości przyjmowanych przez zmienne losowe. Wybór metody prognozowania zależy od elementów składowych szeregu czasowego [1, 3, 4]. Jeżeli szereg czasowy zawiera tylko składową systematyczną w postaci stałego poziomu i wahania losowe (zakłócenia przypadkowe) to wówczas oblicza się współczynnik zmienności. Jeżeli wartość tego współczynnika nie przekracza 0,05 korzysta się w takim przypadku z wygładzania średnimi ruchomymi lub wykorzystuje się tzw. metodę naiwną. W przypadku występowania jedynie trendu do identyfikacji struktury szeregu czasowego w statystyce stosuje się różne metody wygładzania i dopasowania odpowiedniej krzywej. Do opracowania prognozy w takim przypadku wykorzystuje się model Holta i model Wintersa [1]. Szeregi czasowe z trendem można także aproksymować za pomocą funkcji liniowej. Do analizy szeregów czasowych z wahaniami sezonowymi stosuje się



metodę wskaźników, analizę harmoniczną Fouriera i funkcje autokorelacji. Jeżeli w szeregu czasowym występują wszystkie składniki systematyczne analiza polega na wyodrębnianiu ich z szeregu czasowego, czyli tzw. dekompozycji szeregu czasowego [1, 3, 5, 11]. W artykule wykorzystano model ARIMA dostępny w pakiecie STATISTICA 10.0.

## 2. Model ARIMA

Model ARIMA należy do najbardziej efektywnych metod prognozowania szeregów czasowych. Zapoczątkowany został przez Boxa i Jenkinsa [11,12].

W modelu tym wyróżnia się trzy parametry: parametr autoregresyjny (p), rząd różnicowania (d), parametr średniej ruchomej (q) [3, 12].

Model ARIMA (p, q, d), opisywany jest również za pomocą cyfr np. (0, 1, 1), gdzie 0 oznacza zerową ilość parametrów autoregresyjnych, 1-jednokrotne różnicowanie dla 1-jednego parametru średniej ruchomej [11].

Metoda ARIMA zawiera poszczególne etapy wykonania analizy: identyfikację, estymację i diagnozę [3]. Pierwszą fazą analizy jest identyfikacja. Na tym etapie należy zidentyfikować liczbę oraz typ parametrów modelu ARIMA, które następnie zostają oszacowane. W celu dokonania identyfikacji, należy posłużyć się wykresami szeregów oraz autokorelacją. Głównym warunkiem procesu identyfikacji dla metody ARIMA jest stacjonarność wejściowego szeregu. Powinien mieć stałą w czasie średnią, wariancję oraz autokorelację. Za stacjonarność szeregu odpowiada parametr (d). Określając liczbę parametrów modelu zwracamy szczególną uwagę na korelogramy autokorelacji (ACF) oraz autokorelacji cząstkowej (PACF) [1, 3, 12]. Model ARIMA może być stosowany wówczas gdy szereg jest stacjonarny i wejściowy zbiór danych zawiera minimum 50 obserwacji [1, 13]. Aby osiągnąć stacjonarność szeregu, należy poddać go różnicowaniu, a następnie przeanalizować wykres danych oraz korelogram.

Przy doborze parametrów modelu sezonowego ARIMA, posługujemy się analizą ACF oraz PACF jak w modelu prostym ARIMA [12]. W szeregu sezonowym autokorelogram (ACF) i autokorelogram cząstkowy (PACF) wykazuje duże wartości dla wielokrotności opóźnienia sezonowego.

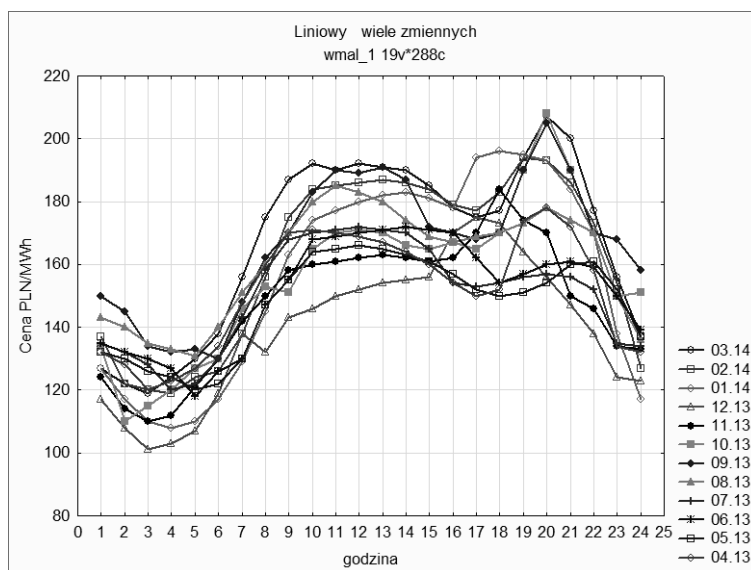
Kolejną fazą modelu ARIMA jest estymacja parametrów. Jest to zadanie trudne. Podczas estymacji parametrów stosuje się metodę najmniejszych kwadratów. Polega ona na znalezieniu najmniejszej sumy kwadratów reszt wartości parametrów modelu. Niejednokrotnie trzeba tutaj posłużyć się metodą iteracyjną. W przypadku dobrania nieodpowiedniego modelu, podczas procesu estymacji może dojść do niezgodności parametrów. Wówczas program przypisze sumie kwadratów bardzo dużą wartość. Wartość taką nazywamy wartością kary [3, 12].

Etap diagnozy dokonuje oceny wybranego modelu. Na podstawie znanych części danych ocenia się trafność wygenerowanej prognozy. Podczas diagnozy



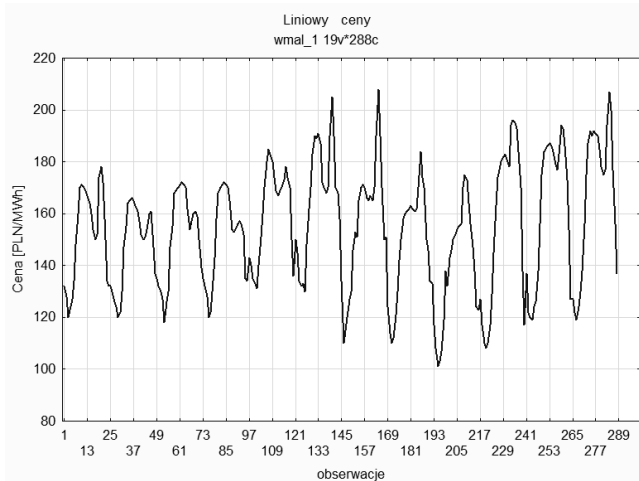
możemy sprawdzić również reszty przy pomocy (ACF) i (PACF). Przy dobrze dobranym modelu, funkcje nie powinny przyjmować wartości różnych od zera. O niepoprawności modelu ARIMA mówi się, gdy reszty wykazują nieprawidłowość lub autokorelację [3]. Metoda ARIMA jest wykorzystywana do analizy szeregów czasowych z trendem i sezonowością. Do analizy wybrano dane dostępne na stronie Towarowej Giełdy Energii [6, 13] odnoszące się do miesięcznych średnioważonych cen dla 24 godzin doby w okresie od 1 kwietnia 2013 roku do 31 marca 2014 roku (jednostka PLN/MWh). Szereg czasowy przedstawiono na rys. 1. dla miesięcznych średnioważonych cen odniesionych do każdej godziny doby. Szereg czasowy jest podzielony na miesiące ( $k = 12$ ) i w obrębie każdego miesiąca na 24 godziny ( $d = 24$ ). Wykorzystując dostępne w pakiecie STATISTICA wykresy można przedstawić rozważany szereg czasowy dla poszczególnych miesięcy analizowanego roku, a także można przedstawić szereg czasowy dla analizowanego okresu. Na rys. 1 przedstawiono szereg czasowy dla miesięcznych średnioważonych cen energii elektrycznej dla 24 godzin doby w okresie od kwietnia 2013 do marca 2014 roku, na którym widać zależność wartości cen w odniesieniu do godziny doby (czyli tzw. sezonowość).

Na rys. 2 zaprezentowano szereg empiryczny dla okresu od kwietnia 2013 do marca 2014 roku dla danych zaczerpniętych z raportów miesięcznych Towarowej Giełdy Energii S.A.



Rys. 1. Szereg czasowy dla miesięcznych średnioważonych cen energii elektrycznej dla 24 godzin doby w okresie od kwietnia 2013 do marca 2014 roku

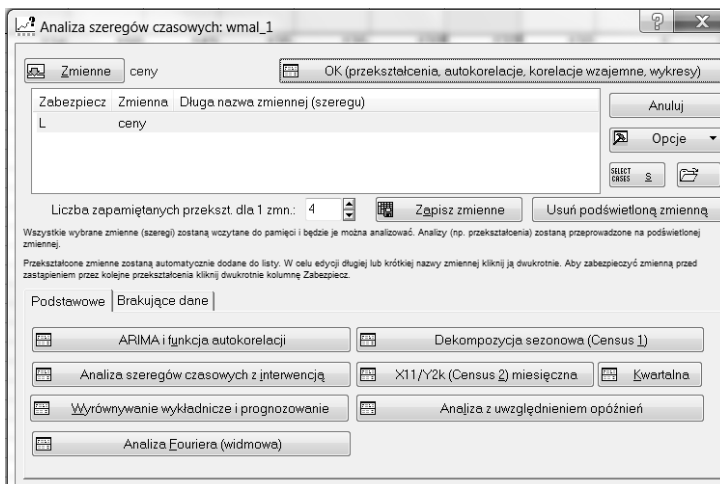
Fig. 1. The time series representing weight-averaged monthly the prices of electricity for 24 hours of the day in the period from April 2013 to March 2014



Rys. 2. Szereg empiryczny dla okresu od kwietnia 2013 do marca 2014 roku, na podstawie [6]

Fig. 2. The empirical series for the period from April 2013 to March 2014, based on [6]

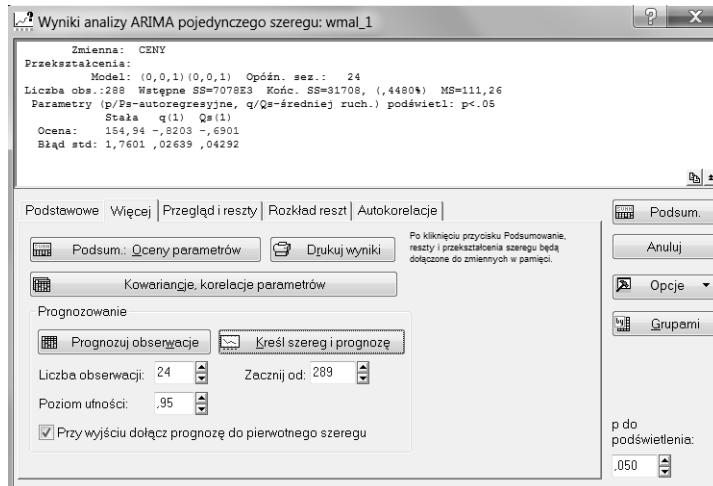
W programie STATISTICA są dostępne narzędzia do dekompozycji szeregów czasowych z wahaniami sezonowymi (rys 3.).



Rys. 3. Widok karty Statystyka/Zaawansowane modele liniowe i nieliniowe/Szeregi czasowe i prognozowanie z dostępnymi narzędziami do dekompozycji szeregów czasowych

Fig. 3. View the card Statistics/ Advanced Linear Model / Time series and forecasting tools available to the decomposition of the time series

Rysunek 4 przedstawia okno wyników analizy ARIMA wraz z dostępnymi kartami do dalszej analizy i obliczeń.



Rys. 4. Okno wynikowe analizy ARIMA

Fig. 4. Result of analysis in ARIMA

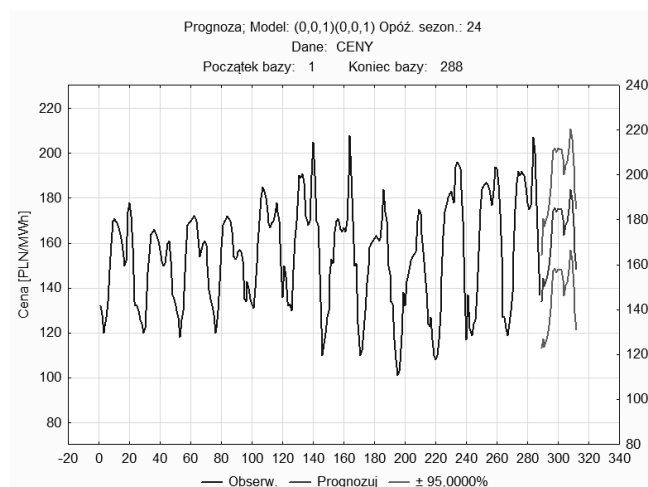
Prognoza; Model: (0,0,1)(0,0,1) Opózn. sezon.: Dane: CENY Początek bazy: 1 Koniec bazy: 288				
Nr obs.	Prognozu	Dolne 95,0000%	Górne 95,0000%	Błąd std
289	133,9747	113,2132	154,7363	10,54784
290	144,1890	117,3361	171,0419	13,64253
291	140,5626	113,7097	167,4155	13,64253
292	142,8261	115,9732	169,6790	13,64253
293	145,3426	118,4897	172,1955	13,64253
294	149,9281	123,0752	176,7810	13,64253
295	157,5308	130,6779	184,3837	13,64253
296	170,0284	143,1755	196,8813	13,64253
297	174,4093	147,5564	201,2622	13,64253
298	175,6571	148,8042	202,5100	13,64253
299	173,8001	146,9473	200,6530	13,64253
300	175,3528	148,4999	202,2056	13,64253
301	174,9044	148,0515	201,7573	13,64253
302	175,0195	148,1666	201,8724	13,64253
303	170,5884	143,7355	197,4413	13,64253
304	163,5094	136,6565	190,3623	13,64253
305	167,8539	141,0010	194,7068	13,64253
306	169,4102	142,5573	196,2631	13,64253
307	174,9850	148,1321	201,8379	13,64253
308	183,8460	156,9931	210,6989	13,64253
309	179,4457	152,5928	206,2986	13,64253
310	167,5414	140,6885	194,3943	13,64253
311	155,6631	128,8102	182,5160	13,64253
312	148,4491	121,5962	175,3020	13,64253

Rys. 5. Prognoza modelu ARIMA dla średnioważonych cen energii dla 24 godzin doby dla miesiąca kwietnia 2014 roku

Fig. 5. Forecast of ARIMA model for the average of the prices of energy for 24 hours a day for the month of April 2014

Na rysunku 5 przedstawiony jest arkusz wynikowy prognozy w miesiącu kwietniu 2014r. przy miesięcznych średnioważonych cenach energii elektrycznej dla 24 godzin doby. Natomiast na rysunku 6 przedstawiono przebieg szeregu

empirycznego wraz prognozą i 95% przedziałem ufności dla miesięcznych średnioważonych cen dla 24 godzin doby.



Rys. 6. Przebieg szeregu empirycznego wraz prognozą (dla miesiąca kwietnia 2014r.) i 95% przedziałem ufności dla miesięcznych średnioważonych cen dla 24 godzin doby

Fig. 6. The course of a number of empirical and forecast (for the month of April 2014) and 95% confidence intervals for the monthly average of the prices for 24 hours a day

Pakiet STATISTICA umożliwia analizę szeregów czasowych, a także wykonanie prognozy na kolejny okres czasu [1, 3, 5].

### 3. Podsumowanie

Zaprezentowany w artykule przykład zastosowania metody ARIMA jest przykładem praktycznego wykorzystania analizy szeregu czasowego do prognozowania przyszłych wartości zmiennej objaśnianej (zależnej od czasu). Konkretna wartość liczbową, będąca wynikiem procesu prognozowania (predykcji) jest prognozą. Natomiast okres, na który prognozujemy tzw. horyzont prognozy zależy jest od typu i charakteru zmiennej objaśnianej. Prognozowanie jest praktycznym wykorzystaniem metod statystycznych i modeli, które dostępne są w narzędziach informatycznych wspomagających często procesy gospodarcze, w tym także w dziedzinie gospodarki elektrotechnicznej.

### Literatura

- [1] Rabiej M., Statystyka z programem Statistica, *Helion* 2012
- [2] Nowak E., Prognozowanie gospodarcze, *Agencja Wyd. PLACET*, Warszawa 1998
- [3] Kot S., Jakubowski J., Sokołowski A., Statystyka, *Wyd. Difin*, Warszawa 2011

- [4] Sokołowski A., Analiza szeregów czasowych i prognozowanie, *Statistica w badaniach naukowych i nauczaniu statystyki*, Statsoft, Kraków 2010
- [5] <http://www.statsoft.pl>
- [6] <http://tge.pl/pl/155/raporty-miesieczne>, Urząd Regulacji Energetyki, Raporty Roczne Prezesa URE, dostęp kwiecień 2015r.
- [7] <http://www.ure.gov.pl/>
- [8] Nowak E., Prognozowanie gospodarcze. Metody, modele, zastosowania, przykłady. Agencja wydawnicza Placet, Warszawa 1998
- [9] Cieślak M., *Prognozowanie gospodarcze, metody i zastosowania*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005
- [10] Snarska A., *Statystyka, ekonometria, prognozowanie*, Wydawnictwo Placet, Warszawa 2005
- [11] Sobczyk M., *Statystyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002
- [12] Box E. P., Jenkins G. M., *Szeregi czasowe – analiza i prognozowanie*, PWN, Warszawa 1983
- [13] Malska W.: Zastosowanie metody wskaźników do analizy szeregów czasowych, „POSTĘPY w ELEKTROTECHNICE STOSOWANEJ”, Kościelisko, 16 -20 czerwca 2014r.

## ARIMA MODEL USING THE TIME SERIES ANALYSIS

### Summary

The paper presents the application of the method used for the analysis of ARIMA time series with trend and seasonality. Time series is one of the types of statistical series, which can be defined as a series of observations of a phenomenon in the following units of time (years, quarters, months, etc.). Time series analysis based on the main idea that a further consideration of the characteristics (variable) represent the more measurements made in the same unit of time (at regular intervals). The independent variable is the time (unit of time). Observing different phenomena (including related to the economy electricity) often want to know whether and how they are changing over time, that is what is their dynamics. Time series analysis is mainly used to make decisions about the future. Considered phenomenon may be subject to certain regularities, which detect and description is the main objective of the analysis of time series. In many cases, time series models are used to apply for the future of the studied phenomenon (to predict). Forecasting is statistically inference about future values of the time series, which is based on the analysis of data or time values which take under consideration the statistical characteristics (variables). At the time domain analysis in time series can extract some components (constant average level of the phenomenon, a trend long-term cycles, seasonal fluctuations, fluctuations in short-term, interventions, random component (random disturbance)), and not all of them must be analyzed in a specific number of. Forecasting method depends on the components of the time series. The results of calculations using the ARIMA model is presented using STATISTICA v. 10.0.

**Keywords:** time series, time series analysis methods, forecasting, ARIMA model.

DOI: 10.7862/re.2015.27

*Tekst złożono w redakcji:* maj 2015

*Przyjęto do druku:* wrzesień 2015

Joanna MAZIARKA<sup>1</sup>  
Lúbomir BEŇA<sup>2</sup>  
Henryk WACHTA<sup>3</sup>

## ANALIZA ROZKŁADU WIDMOWEGO WYBRANYCH ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA W PROCESIE STABILIZACJI BARWY

W artykule przedstawiono wyniki analizy widma promieniowania widzialnego wybranych źródeł światła, typowanych do zastosowań wewnętrznych, takich jak: lampa fluorescencyjna kompaktowa, żarówka LED oraz żarówka halogenowa. Podczas badań analizowano zmiany zachodzące w rozkładzie widma promieniowania w przyjętym czasie obserwacji – odpowiadającemu okresowi stabilizacji barwy analizowanych źródeł światła. Zarejestrowano serie rozkładów widmowych luminacji energetycznej, bezpośrednio po załączeniu badanych źródeł światła, po upływie kilku minut oraz po ustabilizowaniu się fotometrycznego parametru barwy. Wykorzystując fakt, iż rozkład widmowy determinuje temperaturę barwową  $T_b$  emitowanego promieniowania świetlnego oraz wskaźnik oddawania barw  $R_a$ , przeprowadzono analizę widmową poszczególnych źródeł światła. Analiza miała na celu wyłonienie źródeł światła, umożliwiających możliwie szybkie rozróżnianie szczegółów barwnych przedmiotów pracy wzrokowej oraz posiadających wskaźnik oddawania barw na poziomie co najmniej 80%, bezpośrednio po ich zasileniu. Źródła światła o wymienionych wcześniej parametrach, znajdują zastosowanie w pomieszczeniach, gdzie praca wzrokowa wymaga uzyskania docelowych wartości parametrów świetlnych w możliwie najkrótszym czasie od załączenia (archiwa, magazyny, łazienki itp). Stwierdzono, że wymagania te spełniają jedynie żarówki halogenowe oraz półprzewodnikowe źródła LED. Charakteryzują się one stałym w czasie widmem promieniowania, zawierającym wszystkie składowe promieniowania widzialnego, a ustabilizowanie się wartości parametrów świetlnych związanych z emitowaną barwą trwa krócej niż 30 s. Poddane badaniom źródło fluorescencyjne, mimo dobrego poziomu oddawania barw, nie spełnia oczekiwanego zadania ze względu na zbyt długi czas stabilizacji barwy.

**Słowa kluczowe:** spektrometr, widmo promieniowania, źródła światła, temp. barwowa

---

<sup>1</sup> Joanna Maziarka, Politechnika Rzeszowska, absolwentka WEiI PRz, mziarka@gmail.com

<sup>2</sup> Lúbomir Beňa, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, 17 865 1977, lbena@prz.edu.pl

<sup>3</sup> Autor do korespondencji: Henryk Wachta, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, 17 865 1977, hwachta@prz.edu.pl

## 1. Wstęp

Najszerze zastosowanie w obszarze techniki świetlnej mają elektryczne źródła światła, emitujące promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie widzialnym. Rozkład emitowanego promieniowania optycznego na składowe monochromatyczne, odpowiadające poszczególnym długościom fal mieszczących się w zakresie 380 – 780 nm, określa się widmem promieniowania. Zawartości poszczególnych składowych promieniowania oraz odpowiadające im wartości widmowej luminancji energetycznej wpływają na barwę emitowanego światła  $T_b$  oraz zdolność oddawania barw oświetlonych obiektów  $R_a$ . Parametry te determinują obszar zastosowania poszczególnych źródeł światła [1, 2].

W trakcie realizowanych badań zaobserwowano zmiany zachodzące w rozkładzie widma promieniowania w przyjętym czasie - odpowiadającym procesowi stabilizacji, czyli od momentu załączenia źródła światła do ustalenia się jego parametrów świetlnych. Analiza miała na celu wyłonienie źródeł światła, umożliwiających możliwie szybkie rozróżnianie szczegółów barwnych obserwowanych obiektów oraz posiadających wskaźnik oddawania barw na poziomie, co najmniej 80%. Źródła światła tego typu znajdują szczególnie zastosowanie wszędzie tam, gdzie występuje duża częstość łączeń oraz gdzie praca wzrokowa wymaga uzyskania ustabilizowanych wartości parametrów świetlnych w możliwie najkrótszym czasie od załączenia (np.: archiwa, łazienki, magazyny itp).

Badania przeprowadzono dla wybranych źródeł światła do zastosowań wewnętrznych takich jak: świetlówka kompaktowa, półprzewodnikowe źródło LED oraz żarówka halogenowa. Badania zrealizowano z wykorzystaniem laboratoryjnego spektrometri Konica Minolta CS-2000 oraz dedykowanego oprogramowania CS-S10w [3, 4].

## 2. Badania żarówki halogenowej

Do badań szczegółowych wyspecyfikowano żarówkę halogenową o mocy 42 W, stosowaną powszechnie w oświetleniu wewnętrznym. Jej podstawowe dane fototechniczne zestawiono w tabeli 1. Pomiary rozkładu widmowego badanego źródła światła wykonano bezpośrednio po włączeniu lampy, po 60 s oraz 180 s pracy źródła światła. Poza analizą widmową ocenie poddano zmiany współczynników chromatyczności oraz temperatury barwowej.

Uzyskany w wyniku pomiaru (bezpośrednio po włączeniu lampy) rozkład widmowy jest rozkładem ciągłym. Minimum ( $24,4 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ ) i maksimum ( $330 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ ) wartości widmowej luminancji energetycznej zostało zaobserwowane odpowiednio dla fali o długości 401 nm oraz 775 nm. Zmierzona wartość temperatury barwowej wyniosła 2761 K (rys.1) [5].

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne żarówki halogenowej [6]

Table 1. Technical specifications of halogen bulb [6]

Parametr foto-techniczny	Wartość
Moc źródła światła [W]	42
Napięcie robocze [V]	230
Strumień świetlny [lm]	630
Typ budowy[-]	bańka przezroczysta
Temperatura barwowa [K]	2800
Barwa światła [-]	ciepła biel
Trzonek [-]	E27
Trwałość znamionowa [h]	2 000

Po upływie 60 sekund widmo promieniowania żarówki halogenowej nie zmieniło się znacząco. Jednak analizując szczegółowo wyniki pomiarów można stwierdzić, że nowe maksimum wartości widmowej luminancji energetycznej wynoszące  $327 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ , odpowiada fali o długości 777 nm. Natomiast nowe minimum ( $23,5 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ ) zarejestrowano, tak jak w poprzednim przypadku dla fali o długości 401 nm. Zmierzona wartość temperatury barwowej spadła o 7 K i wyniosła 2756 K (rys.2). Wyniki analizy składu widmowego po 180 sekundach pracy lampy zilustrowano na rysunku 3.



Rys. 1. Rozkład widmowy promieniowania żarówki halogenowej bezpośrednio po załączeniu

Fig. 1. Spectrum immediately after turning on

Porównując ze sobą rys. 3 z rys. 2 [5] oraz rys. 1 można wyprowadzić wniosek, iż widmo promieniowania podczas pomiaru nie uległo zauważalnym zmianom. Potwierdzają to uzyskane wyniki, ponieważ minimum ( $23,3 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ ) i maksimum ( $325 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ ) wartości widmowej luminancji energetycznej zostało zaobserwowane odpowiednio dla fali o długości 401 nm oraz 777nm. Wartość temperatury barwowej utrzymała się zasadniczo na poziomie 2756 K. Utrzymany charakter widma daje podstawy do kolejnego wniosku: poziom oddawania barw



$R_a$  w krótkim czasie po załączeniu źródła światła jest na stałym poziomie.



Rys. 2. Rozkład widmowy promieniowania żarówki halogenowej po upływie 60 sekund

Fig. 2. Spectrum after 60 seconds

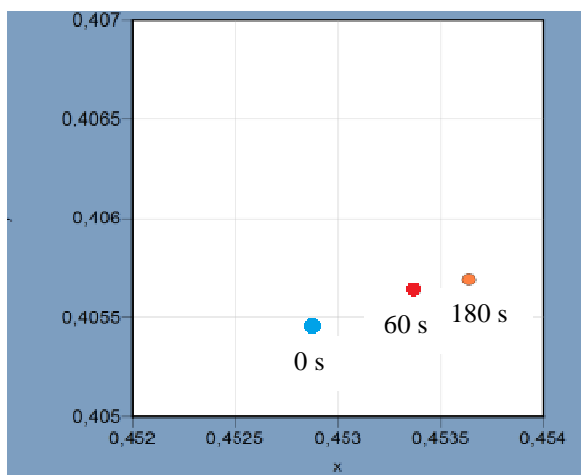


Rys. 3. Rozkład widmowy promieniowania żarówki halogenowej po upływie 180 sekund

Fig. 3. Spectrum after 180 seconds

Dodatkowo analizie poddano wartości współczynników chromatyczności. Stwierdzono, że zmiana wartości  $x$  oraz  $y$  w czasie pomiaru następowała na czwartym miejscu po przecinku. Tak mała zmiana barwy światła jest niezauważalna dla ludzkiego oka. Zatem można przyjąć stałe wartości współczynników chromatyczności, wynoszące w przybliżeniu odpowiednio:  $x = 0,453$  oraz  $y = 0,4055$  (rys.4) [5].

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, iż widmo żarówki halogenowej jest widmem stałym w czasie (różnice są niezauważalne dla ludzkiego oka). Parametry świetlne stabilizują się w czasie krótszym niż czas przeprowadzenia pomiaru, wynoszący około 30 s i nie ulegają wyraźnym zmianom w zdefiniowanym czasie obserwacji.



Rys. 4. Zarejestrowane współczynniki chromatyczności żarówki halogenowej

Fig. 4. Registered chromaticity coefficients of halogen bulb

Zatem w środowisku świetlnym, którego specyfiką jest wymóg uzyskiwania bezpośrednio po włączeniu lampy stałych parametrów barwy promieniowanego przez źródło światła strumienia świetlnego oraz zdolności odwzorowania barw, żarówki halogenowe mogą być z powodzeniem stosowane.

### 3.Badania lampy fluorescencyjnej kompaktowej

Do następnych badań szczegółowych wyspecyfikowano świetlówkę kompaktową o mocy 20 W, także chętnie stosowaną w oświetleniu wnętrzym. Jej podstawowe dane foto-techniczne zestawiono w tabeli 2. Pomiar rozkładu widmowego badanego źródła światła wykonano bezpośrednio po włączeniu lampy, po 180 s oraz 360 s pracy źródła światła. Poza analizą widmową ocenie poddano zmiany współczynników chromatyczności x,y oraz temperatury barwowej  $T_b$ .

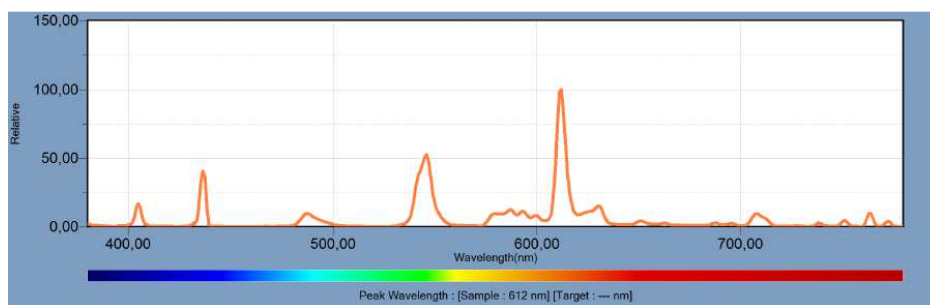
Uzyskany w wyniku pomiaru (bezpośrednio po włączeniu lampy) rozkład widmowy jest rozkładem pasmowym. Maksymalne wartości widmowej luminancji energetycznej zostały zaobserwowane dla fali o długości 546 nm ( $49,4 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ ) oraz 612 nm ( $94,2 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ ). Znaczące wartości widmowej luminancji energetycznej zostały odnotowane dla fali o długości 405 nm ( $12,6 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ ) oraz 436 nm ( $38,3 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ ). Zmierzona wartość temperatury barwowej wyniosła 2821 K (rys.5) [5].

Tabela 2. Dane techniczne lampy fluorescencyjnej kompaktowej [6]

Table 2. Technical specifications of compact fluorescent lamp [6]

Parametr foto-techniczny	Wartość
Moc źródła światła [W]	20
Napięcie robocze [V]	230
Strumień świetlny [lm]	1250
Typ budowy[-]	rurka spiralna
Temperatura barwowa [K]	2700
Barwa światła [-]	ciepła biel
Trzonek [-]	E27
Trwałość znamionowa [h]	6 000

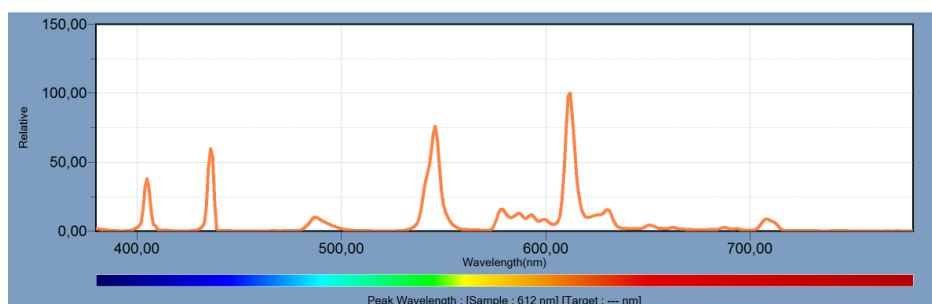
Po upływie 180 sekund zaobserwowano zmiany w widmie promieniowania. Zanotowano zanik pasm w obszarze fal o długości większej niż 720 nm. Analizując szczegółowo wyniki pomiarów można stwierdzić, że maksima wartości widmowej luminancji, tak jak w poprzednim przypadku odpowiadają długości fali 612 nm oraz 546 nm wynosząc odpowiednio  $106 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$  i  $80,5 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ . Zmierzona wartość temperatury barwowej wzrosła o 285 K i wyniosła 2821 K (rys.6) [5].



Rys. 5. Rozkład widmowy promieniowania lampy fluorescencyjnej bezpośrednio po załączeniu

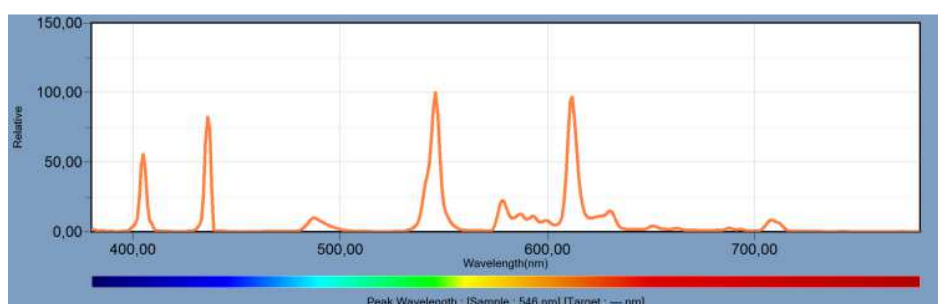
Fig. 5. Spectrum immediately after turning on

Analizując skład widmowy po 360 sekundach pracy lampy, zilustrowany na rysunku 7 [5], można wyprowadzić wniosek, iż widmo promieniowania ulega dalszym zmianom. Potwierdzają to uzyskane wartości widmowej luminancji energetycznej dla fal o długości 405 nm -  $42,3 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ , 436 nm -  $62,7 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ , 546 nm -  $77,1 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ , 612 nm -  $78,0 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ . Wartość temperatury barwowej wzrosła o 278 K i wyniosła 3099 K. Zmienny charakter widma daje podstawy do kolejnego wniosku: poziom oddawania barw Ra w krótkim czasie po załączeniu źródła światła nie jest stały.



Rys. 6. Rozkład widmowy promieniowania lampy fluorescencyjnej po upływie 180 sekund

Fig. 6. Spectrum after 180 seconds



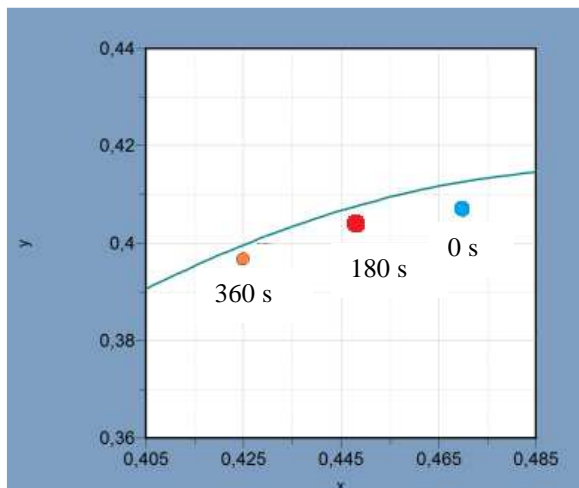
Rys. 7. Rozkład widmowy promieniowania lampy fluorescencyjnej po upływie 360 sekund

Fig. 7. Spectrum after 360 seconds

Dodatkowo analizie poddano wartości współczynników chromatyczności. Stwierdzono, że zmiana wartości  $x$  oraz  $y$  w czasie pomiaru następowała na drugim miejscu po przecinku. Początkowo wartości współczynników chromatyczności wynosiły  $x = 0,470$  a  $y = 0,407$ . Po upływie 360 s wartości te osiągnęły poziom  $x = 0,424$  oraz  $y = 0,400$  (rys.8).

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, iż widmo lampy fluorescencyjnej kompaktowej nie jest widmem stałym w czasie a zmiana barwy światła jest możliwa do wychwycenia dla ludzkiego oka. Parametry świetlne nie uzyskują stabilnych wartości w czasie przeprowadzenia pomiaru.

Zatem źródła fluorescencyjne nie powinny być stosowane w środowisku, którego specyfiką jest wymóg uzyskiwania bezpośrednio po włączeniu lampy stałych parametrów barwy promieniowanego przez źródło światła strumienia świetlnego oraz zdolności odwzorowania barw.



Rys. 8. Zarejestrowane współczynniki chromatyczności lampy fluorescencyjnej kompaktowej

Fig. 8. Registered chromaticity coefficients of compact fluorescent lamp

#### 4. Badania lampy elektroluminescencyjnej

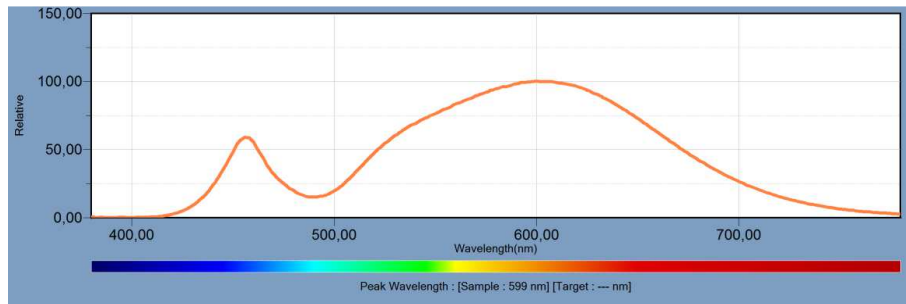
Do kolejnych badań szczegółowych wyspecyfikowano źródło półprzewodnikowe LED o mocy 9 W, stosowane także w oświetleniu wnętrzowym. Jego podstawowe dane foto-techniczne zestawiono w tabeli 3. Pomiar rozkładu widmowego badanego źródła światła wykonano bezpośrednio po włączeniu lampy, po 60 s oraz 180 s pracy źródła światła. Poza analizą widmową ocenę poddano również zmiany współczynników chromatyczności  $x, y$  oraz temperatury barwowej  $T_b$ .

Tabela 3. Dane techniczne źródła półprzewodnikowego LED

Table 3. Technical specifications of LED bulb

Parametr foto-techniczny	Wartość
Moc źródła światła [W]	9
Napięcie robocze [V]	230
Strumień świetlny [lm]	800
Typ budowy[-]	bańka matowa
Temperatura barwowa [K]	3000
Barwa światła [-]	ciepła biel
Trzonek [-]	E27
Trwałość znamionowa [h]	35 000

Uzyskany w wyniku pomiaru (bezpośrednio po włączeniu lampy) rozkład widmowy jest rozkładem ciągłym. Maksimum ( $7,37 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ ) wartości widmowej luminancji energetycznej zostało zaobserwowane dla fali o długości 599 nm. Ekstremum wartości widmowej luminancji energetycznej w obszarze barwy niebieskiej wynoszące  $4,37 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$  przypada na długość fali 456 nm. Zmierzona wartość temperatury barwowej wyniosła 3087 K (rys.9) [5].

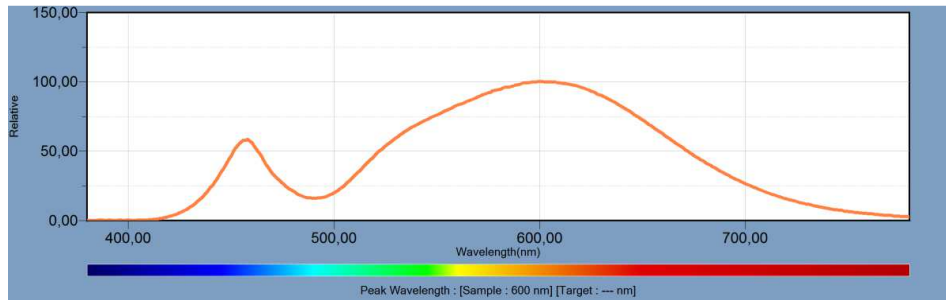


Rys. 9. Rozkład widmowy promieniowania źródła LED bezpośrednio po załączeniu

Fig. 9. Spectrum immediately after turning on

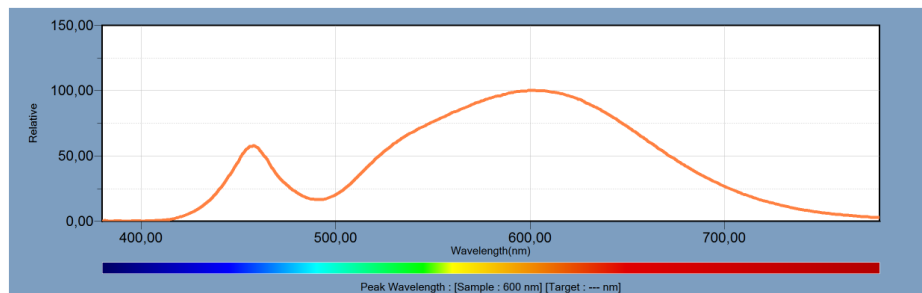
Po upływie 60 sekund widmo promieniowania źródła elektroluminescencyjnego nie zmieniło się znacząco. Analizując szczegółowo wyniki pomiarów można stwierdzić, że podobnie jak bezpośrednio po załączeniu, maksimum wartości widmowej luminancji energetycznej, wynoszące  $7,26 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ , odpowiada fali o długości 599 nm. Natomiast nowe ekstremum w obszarze barwy niebieskiej ( $4,22 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ ) zarejestrowano dla fali o długości 456 nm. Zmierzona wartość temperatury barwowej wzrosła o 2 K i wyniosła 3089 K (rys.10) [5].

Porównując wyniki analizy składu widmowego po 180 sekundach pracy lampy zilustrowane na rysunku 11 [5] z rys.9 oraz rys.10 można wyprowadzić wniosek, iż widmo promieniowania podczas pomiaru nie uległo zauważalnym zmianom. Potwierdzają to uzyskane wyniki, ponieważ maksimum ( $7,31 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ ) oraz ekstremum w obszarze barwy niebieskiej ( $4,20 \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot nm}$ ) wartości widmowej luminancji energetycznej zostało zaobserwowane odpowiednio dla fali o długości 599 nm oraz 459 nm. Wartość temperatury barwowej utrzymała się zasadniczo na poziomie 3089 K.



Rys. 10. Rozkład widmowy promieniowania źródła LED po upływie 60 sekund

Fig. 10. Spectrum after 60 seconds



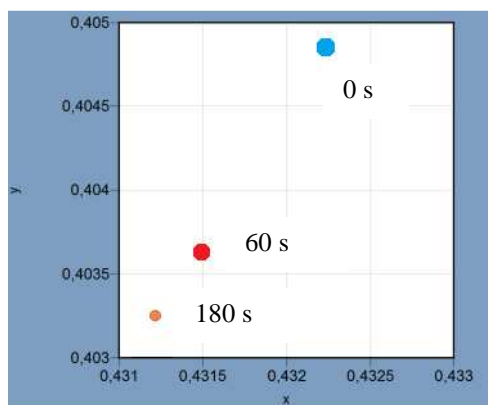
Rys. 11. Rozkład widmowy promieniowania źródła LED po upływie 180 sekund

Fig. 11. Spectrum after 180 seconds

Dodatkowo analizie poddano wartości współczynników chromatyczności. Stwierdzono, że zmiana wartości  $x$  oraz  $y$  w czasie pomiaru następowała się na trzecim miejscu po przecinku. Tak mała zmiana barwy światła jest niezauważalna dla ludzkiego oka. Zatem można przyjąć stałe wartości współczynników chromatyczności, wynoszące w przybliżeniu odpowiednio:  $x = 0,431$  oraz  $y = 0,404$  (rys.12).

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, iż widmo źródła LED jest widmem stałym w czasie (różnice są niezauważalne dla ludzkiego oka). Parametry świetlne stabilizują się w czasie krótszym niż czas przeprowadzenia pomiaru, wynoszący około 30 s i nie ulegają wyraźnym zmianom w zdefiniowanym czasie obserwacji.

Zatem w środowisku świetlnym, którego specyfiką jest wymóg uzyskiwania bezpośrednio po włączeniu lampy stałych parametrów barwy promieniowanego przez źródło światła strumienia świetlnego oraz zdolności odwzorowania barw, źródła półprzewodnikowe LED mogą być z powodzeniem stosowane.



Rys. 12. Zarejestrowane współczynniki chromatyczności źródła półprzewodnikowego LED [5]

Fig. 12. Registered chromaticity coefficients of LED bulb [5]

## 5. Podsumowanie

Porównując uzyskane wyniki pomiarów można stwierdzić, iż najkrótszy czas ustalania się parametrów świetlnych barwy posiada żarówka halogenowa oraz lampa elektroluminescencyjna. Czas stabilizacji jest krótszy niż 30 s potrzebne na przeprowadzenie pierwszego pomiaru. Obydwa typy źródeł charakteryzują się również stałością rozkładu widmowego w czasie oraz oddawaniem barw powyżej 80%, ponieważ zawierają składowe widmowej luminacji energetycznej z całego zakresu widzialnego. Można wysnuć wniosek, iż żarówka halogenowa oraz żarówka LED spełniają zadanie odwzorowywania szczegółów i barw w krótkim czasie od załączenia. Mogą być zatem wykorzystywane w pomieszczeniach typu magazyny, archiwa i inne wymagające szybkiego uzyskiwania pełnych parametrów świetlnym we wnętrzach.

Lampa fluorescencyjna kompaktowa, mimo iż spełnia warunki oddawania barw, nie uzyska stałości barwy emitowanego promieniowania optycznego w ciągu 6 minut zmieniając temperaturę barwową o ponad 500 K. Zanotowane wahania barwy emitowanego promieniowania optycznego w obszarze współczynnika x składowej chromatyczności mogą niekorzystnie wpływać na komfortowe rozpoznawanie barw przedmiotów pracy wzrokowej.

## Literatura

- [1] Wiśniewski A.: „Elektryczne źródła światła”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010.
- [2] Żagan W.: „Podstawy techniki świetlnej”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [3] Data Menagment Software CS-S10w Professional ver. 1.6. Instruction Manual,



KONICA MINOLTA

[4] SPECTRORADIOMETER CS-2000/CS-2000A. Instruction Manual, KONICA MINOLTA

[5] Maziarka J.: „Pomiary widma promieniowania wybranych źródeł światła za pomocą spektrometri”, praca dyplomowa, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2015r.

[6] Katalog firmy Philips, dostępny w Internecie: <http://www.lighting.philips.pl/> (data odczytu 20 stycznia 2015)

Praca została wykonana z wykorzystaniem aparatury zakupionej w wyniku realizacji Projektu: „Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo –badawczej Politechniki Rzeszowskiej”, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Projektu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013, Oś priorytetowa 1 – Konkurencja i innowacyjna gospodarka.

## ANALYSIS OF SPECTRUM OF SELECTED LIGHT SOURCES IN THE CATEGORY OF TIME STABILIZATION

### Summary

The article presents the results of radiation spectrum analysis of selected sources of light, typical for internal use, such as fluorescent compact light, LED light bulb and halogen light bulb. In the course of research changes occurring in the factorization of spectrum during the adopted time of observation have been analyzed. The time of observation conformed to the time needed for colour of analyzed sources of light to be stabilized. Series of spectral decompositions of energetic luminance have been registered: directly after analyzed sources of light have been put on, after a couple of minutes and after the photometric parameter of colour has been stabilized. Making use of the fact that spectral decomposition determines the colour temperature  $T_b$  of emitted light radiation and Colour Rendering Index  $R_a$ , a spectral analysis of respective light sources has been conducted. The aim of the analysis was to determine sources of light which allow for rapid differentiation of colour details of visual objects. The objects also need to be characterized by CRI of at least 80% after power has been supplied. Light sources with aforementioned parameters are of use in rooms where visual work necessitates reaching target value of light parameters in the shortest time possible (archives, warehouses, bathrooms). It has been ascertained that those requirements are only met by halogen bulbs and solid-state LED sources. They are characterized by radiation specter which is constant in time and contains all components of radiation. Values of light parameters connected with the emitted colour take less than 30 seconds to stabilize. Fluorescent sources which were being tested are not fit for purpose, in spite of good level of bringing out colours, due to lengthy time of stabilizing the colour.

**Keywords:** spectroradiometer, radiation specter, light sources, colour temperature

DOI: 10.7862/re.2015.28

*Tekst złożono w redakcji:* maj 2015

*Przyjęto do druku:* wrzesień 2015

Victor BUSER<sup>1</sup>  
Victorija YARMOLOVICH<sup>2</sup>

## MODELING AND IDENTIFICATION OF SYSTEMS WITH FRACTIONAL ORDER INTEGRAL AND DIFFERENTIAL

A universal model of fractional-order differential equation is proposed. It is derived in form hyper neuron, based on a representation of the solution of the equation by finite increments and a modified form of the Riemann-Liouville. Implemented method for identifying parameters of objects by fractional differential equations is described on the base hyper neuron and modified genetic algorithms. Accuracy of calculations is increased due to excluding of circular references and dynamic correction of the fractional integration error. This allows to use hyper neuron as inlined model of such objects in the digital control systems and in conjunction with genetic algorithm it is used for the identification of their parameters with high accuracy.

**Keywords:** fractional differential, fractional integral, hyper neuron, genetic algorithms, parameter identification.

### 1. Introduction

Real physical processes, that take place in nature and in the artificial technical systems and circumferences, appear to be dynamic systems, which mathematical models include differential equations of fractional order.

Thus while control of the heat transfer at delineated diffusion processes, convection it is rational to describe controlled object and regulators by fractional-order differential equations with order 0.5. In case the condensable or bubbling up Freon serves as heat (of cold) source, the drops of liquid and gas bubbles convert heat exchange ambient into the structure similar to fractal. In such structure the effects of abnormal sub- and super-diffusion [6], while it's describing the order of the differential equations differs from 0.5 in the general case. Unsteady-state diffusion takes place in the electro chemical capacitors (ECC),

---

<sup>1</sup> Author to correspondence: Victor Buser, Department EMSKU Odessa National Polytechnic University, Shevchenko Avenue, Odessa 65044, e-mail: victor.v.bousher@gmail.com

<sup>2</sup> Victorija Yarmolovich, Department TOOE Odessa National Polytechnic University

that gain acceptance at present time due to the ability of rapid charge and discharge at the kinetic energy recovery system of the electric cars (KERS), due to the electrodes void structure, the current strength depends on fractional derivative of the potential [7].

As a result, energy storage and energy output in the ECC, as in accumulators, is described by a combination of the integral and fractional integral equations [8]. For the described object class the usage of the traditional methods of research may end in significant errors while parameters identification and may lead to the mismatch of the dynamic and static indexes of the systems to the estimated indexes and as a consequence to the errors while synthesis of the controlling systems [8].

## 2. Study Materials

**Work objective** – elaboration of the universal model of fractional differential equation random order whether for the solution of equation by method of finite increments or for the analysis and identification of the parameters of the similar systems with application of the genetic algorithms and the models of such objects realization at the discrete-controlling systems.

The fractional integration is a special case of the fractional differential equation of the following form:

$$\dots a_2 D^{2+\mu} y + b_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 D^{1+\mu} y + b_1 \frac{dy}{dt} + a_0 D^\mu y + b_0 y = kx, \quad (1)$$

where  $D^\mu y$  – fractional derivative  $y$  of the order  $\mu$ .

So far as

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dy}{dt} \right), \quad D^{1+\mu} y = \frac{d}{dt} (D^\mu y), \quad D^{2+\mu} y = \frac{d^2}{dt^2} (D^\mu y) = \frac{d}{dt} (D^{1+\mu} y),$$

then, get over to the finite increments, for example, for the degree of order  $2+\mu$  we will deduce “fractional difference equation”:

$$D_i^\mu y = Kx_i - A_2 D_{i-2}^\mu y - B_2 y_{i-2} + A_1 D_{i-1}^\mu y + B_1 y_{i-1} - B_0 y_i, \quad (2)$$

Where

$$A_1 = \frac{2a_2 + a_1 \Delta t}{a_2 + a_1 \Delta t + a_0 \Delta t^2}; A_2 = \frac{a_2}{a_2 + a_1 \Delta t + a_0 \Delta t^2};$$

$$B_0 = \frac{b_2 + b_1 \Delta t + b_0 \Delta t^2}{a_2 + a_1 \Delta t + a_0 \Delta t^2}; B_1 = \frac{2b_2 + b_1 \Delta t}{a_2 + a_1 \Delta t + a_0 \Delta t^2}; B_2 = \frac{b_2}{a_2 + a_1 \Delta t + a_0 \Delta t^2};$$

$$K = \frac{k \Delta t^2}{a_2 + a_1 \Delta t + a_0 \Delta t^2}.$$

Target value of the output coordinate  $y_i$  can be found by method of fractional integration of the determinate value of the fractional derivative  $y_i = I^\mu (D_i^\mu y)$ . In the digital form the equation (2) can be assumed by schematic diagram shown at the figure 1.

It is obviously, that changing the quantity of the return couplings and recalculating the coefficients  $A_n, B_n$ , it is possible to solve equations of the degree order  $n + \mu$ .

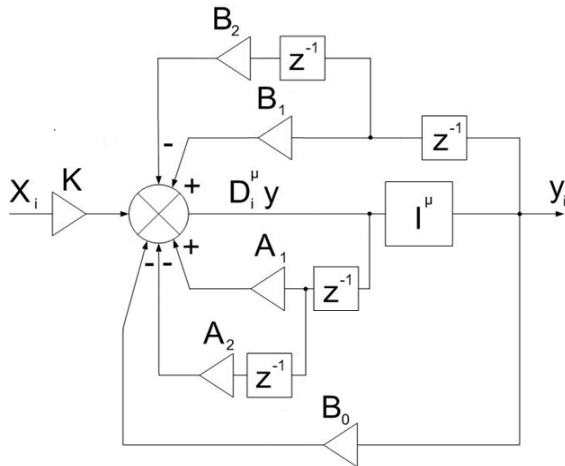


Fig. 1. Schematic diagram of the hyper neuron

Let us denote such ensemble of the components hyper neuron, the characteristics of what are close to the characteristics of the biological neurons as per the modern ideas [1]. However, while evaluation solution to the equation (2) on the  $i$ -step the problem occurs, connected to the null value of the output coordinate  $y_i$  for the calculation  $D_i^\mu y$  in the right side.

Let us write over (2) in the following mode:

$$\begin{cases} D_i^\mu y' = Kx_i - A_2 D_{i-2}^\mu y - B_2 y_{i-2} + A_1 D_{i-1}^\mu y + B_1 y_{i-1}, \\ D_i^\mu y = D_i^\mu y' - B_0 y_i. \end{cases} \quad (3)$$

Let us use for the solution search approximating function that is based on the modified digital form of the Riemann-Liouville [2]:

$$y_i = I^\mu (D_i^\mu y) \approx \sum_{j=1}^i k_{i-j+1}^\mu D_j^\mu y, \quad (4)$$

where  $k_n^\mu = \frac{\Delta t^\mu}{\Gamma(1+\mu)} (n^\mu - (n-1)^\mu)$ .

Then

$$y_i = \sum_{j=1}^{i-1} k_{i-j+1}^\mu D_j^\mu y + k_1 (D_i^\mu y' - B_0 y_i). \quad (5)$$

After generations we will receive formula for the revised figuring  $y_i$ :

$$y_i = \frac{\sum_{j=1}^{i-1} k_{i-j+1}^\mu D_j^\mu y + k_1 D_i^\mu y'}{1 + k_1 B_0}. \quad (6)$$

Resulting expression statement (3), (6) afford exclude circular reference while figuring signal output of the hyper neuron.

Proposed method is characterized by the first order accuracy relative to the step  $\Delta t$ , but absolute accuracy for the arbitrary signals is at 20...50 times less, then using initial form Riemann-Liouville.

The objects prescribed by the fractional differential equations are the various technological processes or devices during operation of what the convection and diffusion effects appear.

Normally it is sufficient to describe such effects in the equations of the order  $\mu = 0.5$ . However, in recent years the devices with porous laminated surface appeared and films with diverse pattern and characteristics of the micro pore at the varied depth appeared; especially while the diffusion of the charged particles.

Order of the equations govern the study of such structures behavior is determined by the extensional or surface dimension of the fractals and not only differs from 0,5 but also changes in transient process.

For the reckoning of the equation solution with the variable  $\mu$  let us accept, that for  $j$  instant of time the equation order is characterized by any  $\mu_j$ , and we will receive the following formulas from the (4) and (6):

For the reckoning of the fractional integral  $x(t)$ :

$$y_i = \sum_{j=1}^i k_{i-j+1}^{\mu_j} x_j, \quad (7)$$

Or for the reckoning of the solution for fractional differential equation:

$$y_i = \frac{\sum_{j=1}^{i-1} k_{i-j+1}^{\mu_j} D_j^{\mu} y + k_1^{\mu_i} D_i^{\mu} y'}{1 + k_1^{\mu_i} B_0}. \quad (8)$$

The certainty of such solution is unknown, as the theoretical basis of the fractional integrating with time-varying order  $I^{\mu(t)} f(t)$  is not formulated, however, when considering wander of the parameter  $\mu(t)$  such attitude to the reckoning is assumed logical. But it is necessary to try to estimate the accuracy of such reckoning.

Solution check can be founded on the following property of the fractional:

$$I^{\mu_1} (I^{\mu_2} (x)) = I^{\mu_1 + \mu_2} (x). \quad (9)$$

Taking  $\mu_2 = 1 - \mu_1$ , we will deduce

$$I^{\mu} (I^{1-\mu} (x(t))) = \int_0^t x(t) dt. \quad (10)$$

As the evaluation of the first-order integral for the analogue functions is admissible with high accuracy, thus the measure of inaccuracy  $\delta(t)$  can be evaluated for the consequent analysis of the fractional integrals (fig.2).

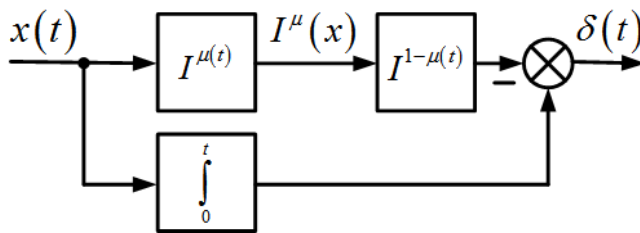


Fig. 2. Determination of the of the fractional integral calculation error

Deduced value of error  $\delta(t)$  for the every instant can be used for the dynamic correction of the reckoning of the fractional integrals by the method of correcting input signaling.

However the error arises in result of double fractional integration, i.e. each from two components inserts its part of error. For the correctional signal rearrangement we will use the fact, that when integrating the identical signals with

the fractional integrating continued order of the calculating error in case of different  $\mu$  vary, but in case of  $\mu$  and  $1 - \mu$  they coincide (fig.3).

It follows that, the inaccuracy can be reallocated with weight coefficient 0,5.

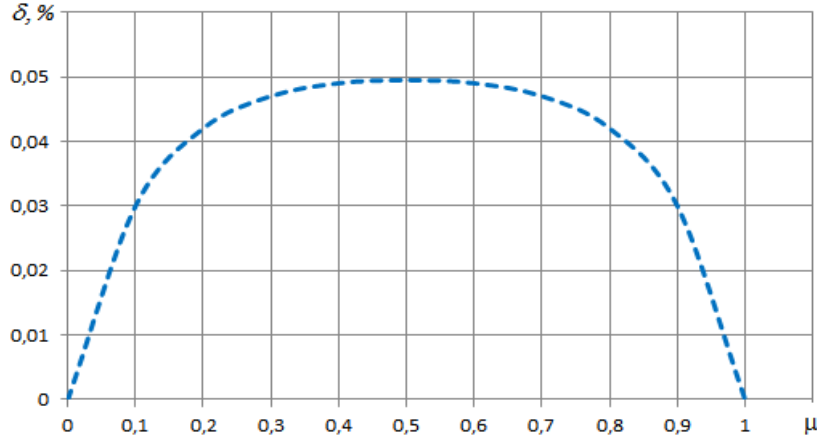


Fig. 3. Calculation error of the fractional integral with  $\mu = const$

As the correcting signal will be integrated, thus for it's origination let us differentil  $\delta(t)$ .

Let us give a signal to the input of the first fractional integrating element. For the check of the results obtained let us calculate fractional derivative of the inaccuracy with order  $1 - \mu$ , using the correspondence between the derivative and integral  $D^{1-\mu}(\delta) = \frac{d}{dt}(I^\mu(\delta))$ , and we will give it to the input of the second fractional integrating element.

Resulting arithmetic model of the calculating block for the fractional integral with assumed dynamic correction is provided at the figure 4. Corrected value of the fractional integral  $I_v^\mu(x)$  forms output signal of the block. Circuit «Test» allows comparing calculation errors without  $\delta$  correction and after  $\delta$  correction but it's not necessary when calculating the fractional integral.

With constant order of the fractional integrating the supposed dynamic correction cures totally the inaccuracy in case of arbitrary input (fig. 5).

On the figure 6, a is shown fractional integral calculation example in case of integration order wander, figure 6,b shows that when counting the dynamic correction the computational error is reduced more than in twenty times.

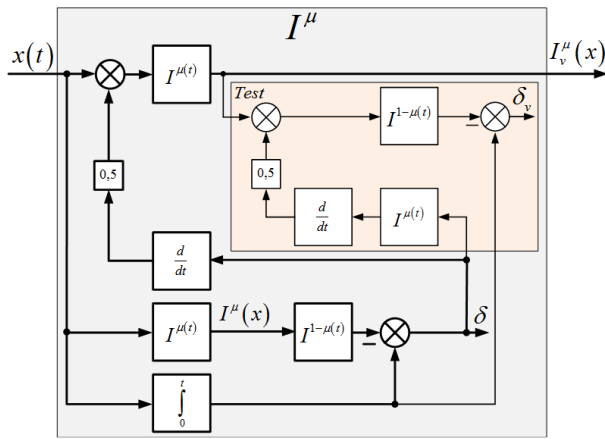


Fig. 4. Arithmetic model of the settlement block for the fractional integral with dynamic correction of inaccuracy

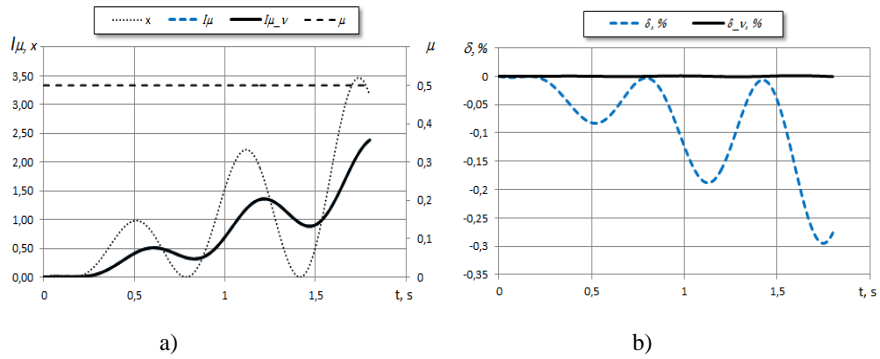


Fig. 5. Graphs of fractional integral variance (a) and error modify (b) with and without dynamic correction in case  $\mu = const$

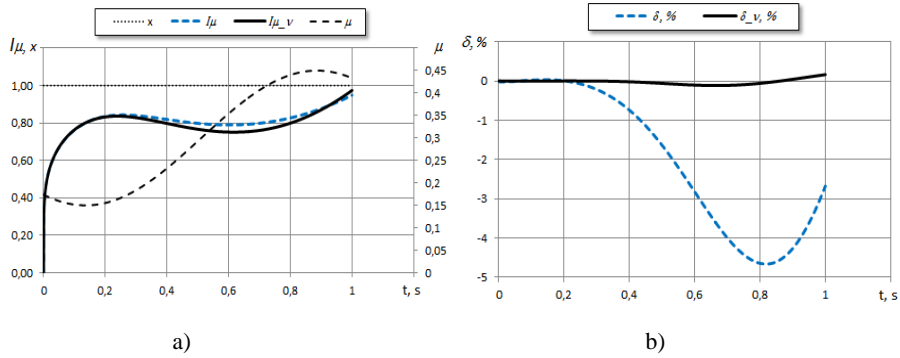


Fig. 6. Graphs of fractional integral variance (a) and error variance (b) with and without dynamic correction in case  $\mu = var$



Besides, with rapid change of the  $\mu$  solution without correction is characterized by the inaccuracy increasing through the amplitude, i.e. the unit can become structural-unstable. Dynamic correction enhances accuracy and stability of calculation significantly (fig. 7).

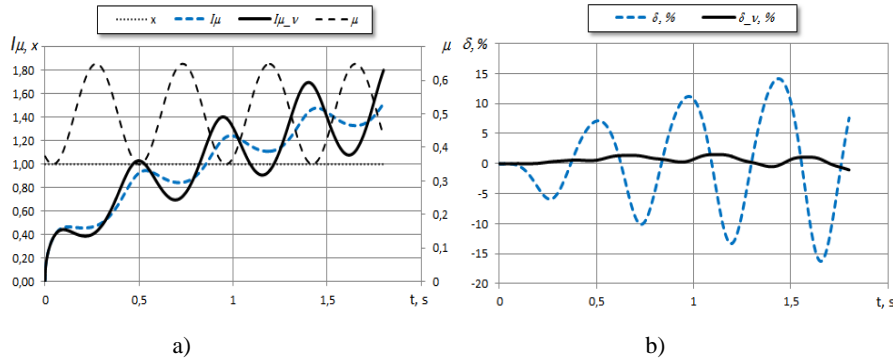


Fig.7. Graphs of variance in fractional integral (a) and error variance (b) in case of «high-frequency» vibrations  $\mu$

Hence estimated germ is deduced for the reckoning of the solutions for the fractional differential equations with time-variant order inter alios.

If transient functions received in the result of the research tests, thus genetic algorithms [3] can be used for identification of the objects parameters admissibly governed by the fractional differential equations (1),

From all their variety method of multipoint crossing 40% optimum specimen with insertion of 6% discarded specimen in following manner. Multipoint crossing chooses the germ of the genetic algorithm, that is implemented by the random variations of the instance characteristics  $\pm 5\%$  [1], for the population degeneration exclusion.

Deduced two derivatives substitute 40% of the discarded specimen. Another more 20% of the derivatives are deduced as averaging from the genes of the procreators, and one of the best specimen descendants deduced in the ancestor is the specimen, which parameters are determined by the gradient of the best specimen parameters modifications for the last several descents.

Figure 8 illustrates the results of the object identification, declared by the fractional differential equation with indexes  $a_0 = 0,35; a_1 = 0,175; b_1 = 2; b_2 = 0,006; \mu = 0,5$ . Indexes of the identified object  $a_0 = 0,39; a_1 = 0,173; b_1 = 7,5; b_2 = 0,006; \mu = 0,53$  force error retrieving 0,64%, mode of the transient order aligns with stated, that allows to use identified indexes for the further analysis and synthesis of the control systems.

Figure 9 illustrates the training processes – changing of values  $\mu$  and mean-squared error of the output signal of the best specimen is shown relative to the original signal  $F_{best}$  from the generation number  $Gen$ .

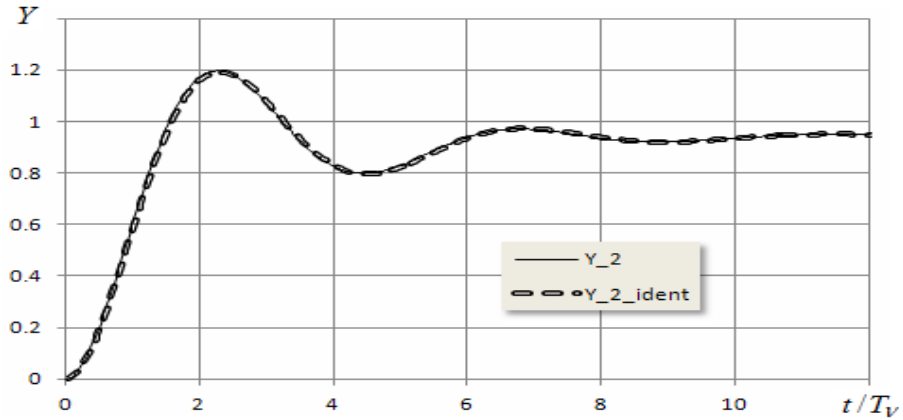


Fig. 8. Schedule of the transition processes for the initial and identified objects

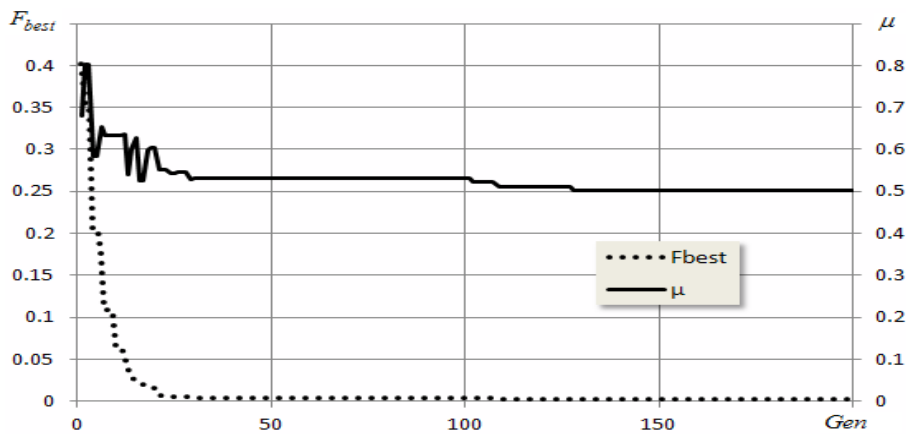


Fig. 9. Schedule of variance  $\mu$  and  $F_{best}$  in the training process

Developed methods of calculation and identification are used for the parameters identification for the ECC, which arithmetical model includes series-connected integrator, proportional and fractional integrating component with two groups of the parameters (for ECC charge and discharge):  $C_+$ ,  $C_-$  – ECC capacitance,  $R_+$ ,  $R_-$  – direct-current resistance,  $B_+$ ,  $B_-$ ,  $\mu_+$ ,  $\mu_-$  – diffusion coefficient and the integration order, describing diffusional and adsorptive features

of the double electrical layer. Differential equation in the operator form, explaining the voltage change on the ECC connecting devices  $U$  in the process of charge/discharge by the current  $I$  with interval  $t_{ch}$ , should be set down on the following mode:

$$U(p) = \left( R + \frac{1}{Cp} + \frac{1}{Bp^\mu} \right) I(p), \quad (11)$$

$$\mu(t) = \mu \left( A_\mu \cos \left( \pi \frac{t}{t_{ch}} + \varphi \right) + 1 \right) / 2, \quad (12)$$

Where  $A_\mu \in [0, 1]$ ,  $\varphi \in [-\pi, +\pi]$  – additional parameters.

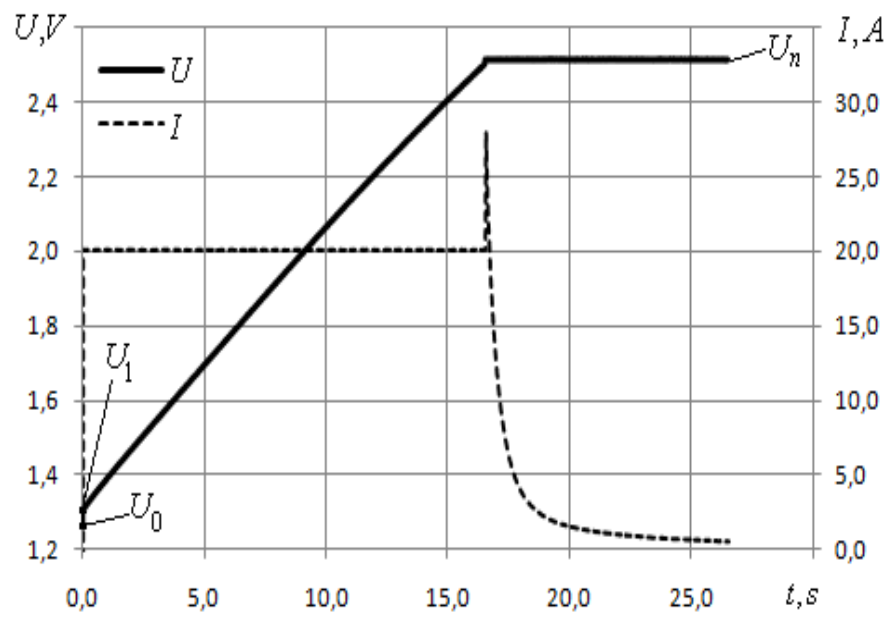
Such law of variation  $\mu$  with direct current of the charge/discharge corresponds also to the dependency  $\mu$  from the ECC voltage.

Fractional integral component as per it's features in the proposed model appears transitory between integral and proportional elements: it looks like an integral element in the transient processes and in the steady-state processes it looks like proportional element. Particularly, when the rectangular pulse is supplied to the lead terminal, output signal increases but not rectilinear, but in an exponential function and when the input signal is dropped till 0, the output signal drops to zero under the same law, instead of being stable. Such features are verified in the feed rates of the current step to the super condenser and when it's voltage is stabilized.

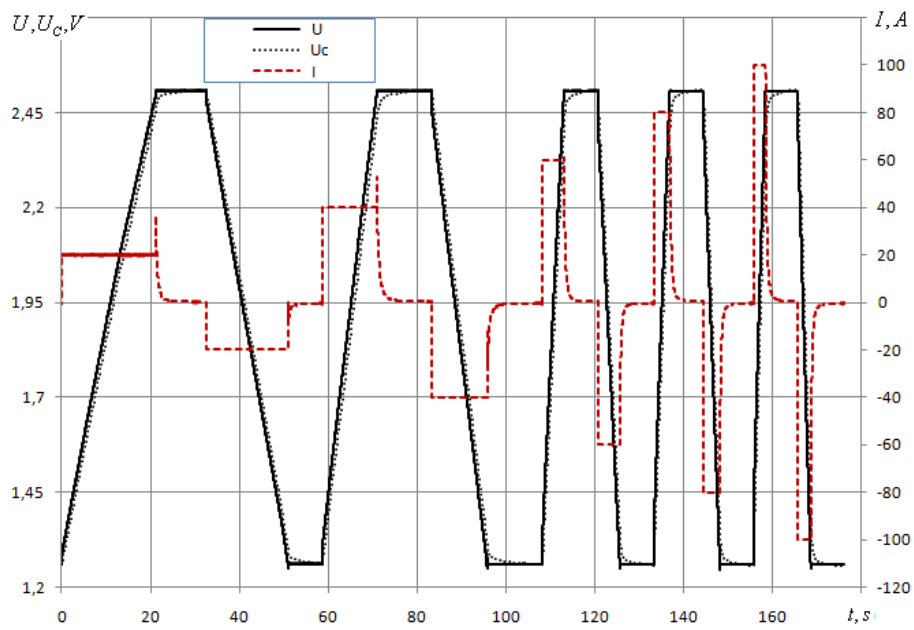
But in the steady state mode behavior of ECC is equivalent to the behavior of the standard condenser. Thus, if we supply a current step of the definite value to ECC and then over time, supporting a constant voltage, will reset the current to zero ( fig. 10, a), then step voltage at the initial time will be proportional to the internal resistance of ECC and the ratio between current integral and voltage change will be proportional to it's capacitance. Diffusion effects don't influence on the results of such metrics.

That is why testing and experimental data processing for the ECC parameters definition consist of several steps.

1. The test series of the current impulses of diverse pulse height for ECC charge and discharge is supplied on ECC with further voltage stabilization until the current becomes close to zero (fig. 10, b) and current and voltage measurements should be carried out with constant pitch  $\Delta t$  (units, ten milliseconds). The test series consists of the condenser charges/discharge cycles of the currents from 20 to 100 A, repeating several times for the further averaging results.



a)



b)

Fig. 10. ECC charge (a) in the cycles series of charge/discharge (b)

2. Based on current integral and voltage change ECC capacitance is determined :

$$C = \frac{\int_0^t I(t)dt}{\Delta U} \approx \frac{\sum_{i=1}^n I_i \Delta t}{U_n - U_1}; \quad (13)$$

3. As actually the current step intervenes for the  $k = 1 \dots 2$  intervals, thus after capacitance index calculation resistance value should be determined:

$$R = \frac{U_k - U_0 - \sum_{i=1}^k \frac{I_i \Delta t}{C}}{I_k - I_0}, \quad (14)$$

Parameters obtained allow to distinguish separate voltage components in the ECC: voltage drop on the active resistance, charging voltage of the capacitance and voltage loss in the diffusion layer. The graphs of the voltage change in ECC diffused layer are shown on the figure 11, demonstrating changing order of the fractional integration. Processing of the last compound allows to determine constraint  $\mu$  from the voltage and charge/discharge current, presented on the figure 12 for ECC with capacitance index 1800 F.

Except that in the process of the ECC identification with capacitance up to 300...400 F when this feature can be ignored. Voltage loss in the diffusion layer is close to the voltage loss on the active resistance. Standard error while describing the experimental data, does not exceed 0.0045 V (0.2 %  $U_{\max}$ ) for ECC with nominal voltage 2.5 V.

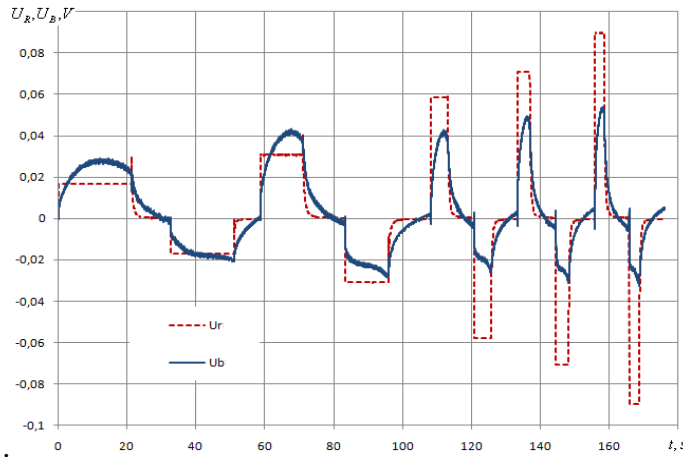


Fig. 11. Graphic charts of the voltage loss in the diffusion layer

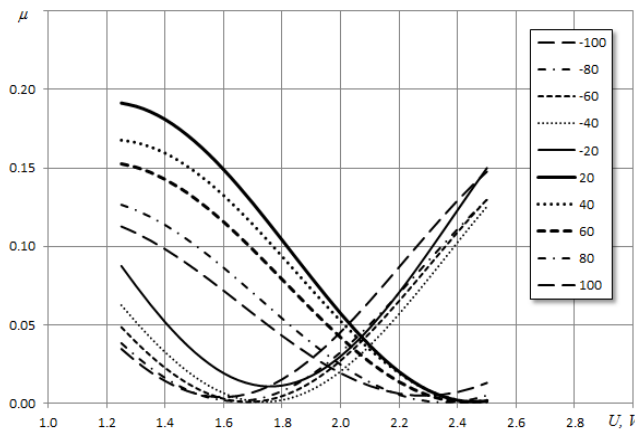


Fig. 12. Dependency graphs  $\mu = f(U, I)$

But when identifying ECC diffusion parameters of the high capacity (>1000 F) this feature should be taken into consideration, as the voltage loss in the diffusion layer exceeds voltage loss on the active resistance in 2...3 times.

As the result such correction allows describe ECC behavior not only with inaccuracy no less than 0,05...0,1 %  $U_{max}$ , but also allows us to obtain the graphs diagrams of the transient processes, that are equivalent by their behavior to the experiment on the whole interval of the charging and discharge ECC current (fig. 13).

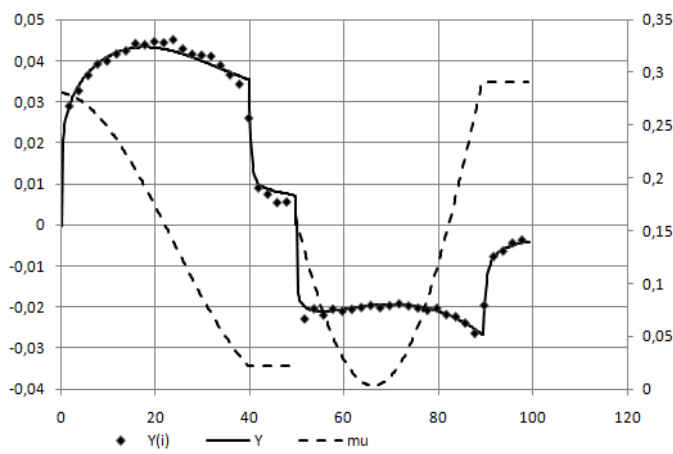


Fig. 13. Experiment graph diagram ( $U_i$ ) and nomogram charts ( $U$ ) of voltage loss in the diffusion layer of the ECC with capacitance 1800 F considering changes of  $\mu$  (dashed line)

## Conclusion.

In order to describe the behavior of the objects consisting of models of the fractional differential equations of random order, including the order variable in the transition process, the model of hyper neuron has been formulated, based on the method of finite increments application and modified discrete form of Riemann-Liouville. Accuracy of calculations is increased due to excluding of circular references and dynamic correction of the fractional integration error. This allows to use hyper neuron as inlined model of such objects in the digital control systems and in conjunction with genetic algorithm it is used for the identification of their parameters with high accuracy.

## References

- [1] Rutkowska D., Pilinski M., Rutkowski L. Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte, (1999), Naukowe PWN, Warszawa, pp. 452 (In Polish).
- [2] Busher V. V. The model of system with fractional integral and fractional differential in SIMULINK, (2011), Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy Publ., Kremenchuk, Vol. 4/2011, pp.138–142 (In Russian). [http://archive.mdct.ru/portal/natural/Ees/2011\\_4/140.pdf](http://archive.mdct.ru/portal/natural/Ees/2011_4/140.pdf)
- [3] Busher V. V. Evolution algorithms as method of identification of climate control system objects described by fractional equations, (2010), Electrotechnic and computing systems, Technica Publ., Kyev No02(78), pp.68–72 (In Russian). [archive.nbu.gov.ua/portal/natural/emeo/2011\\_78/068-072.pdf](http://archive.nbu.gov.ua/portal/natural/emeo/2011_78/068-072.pdf)
- [4] Busher V. V. Identification of the elements of climate systems of differential equations of fractional order, (2010), Elektromashynobud. ta elektroobladn., Technica Publ., Kyev, Vol. 75, pp.68–70 (In Russian). [archive.nbu.gov.ua/portal/natural/emeo/2010\\_75/068-070.pdf](http://archive.nbu.gov.ua/portal/natural/emeo/2010_75/068-070.pdf)
- [5] Uchaikin V. V. Fractional differential model of dynamic memory, (2001), Matematika y mekhanyka Publ., pp.14 (In Russian).
- [6] Uchaikin V. V. Anomalous Diffusion and Fractional Stable Distributions, (2003), Journal of Experimental and Theoretical Physics Publ., No. 4, pp.810-825 (In English).
- [7] Hyl'mutdynov A., Ushakov P., Hyl'metdynov M. Fractional operators: synthesis and implementation criteria, (2008), Nelyneynuy myr Publ., No. 8, pp.452-463 (In Russian).
- [8] Busher, V. V. Martynyuk V. V., Naydenko E. V. Energy indicators and parameters ultracapacitors in dynamic modes, (2012), Vymiryuval'na ta obchyslyuval'na tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh Publ., Khmel'nyts'kyy, . No. 1, pp.44-50 (In Russian). [archive.nbu.gov.ua/portal/Natural/Vtot/2012\\_1/31bus.pdf](http://archive.nbu.gov.ua/portal/Natural/Vtot/2012_1/31bus.pdf)
- [9] Busher V. V. Synthesis of process control systems with integrated fractional-differentiating properties, (2012), Vostochno-Evropeiskii Zhurnal Peredovykh Tekhnologii. Energoberegayushchie Tekhnologii i Oborudovanie Publ., Kharkov, Ukraine, Vol.4/3 (58), pp. 32–37 (In Russian). [archive.nbu.gov.ua/portal/natural/Vejpt/2012\\_4\\_3/...4.../32\\_37.pdf](http://archive.nbu.gov.ua/portal/natural/Vejpt/2012_4_3/...4.../32_37.pdf)

## MODELOWANIE I IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW SYSTEMÓW Z ELEMENTAMI CAŁKOWO-RÓŻNICZKOWYMI UŁAMKOWEGO RZĘDU

### Streszczenie

Zaproponowano uniwersalny model różniczkowego równania ułamkowego rzędu w postaci hyper neuronów, podstawową którego jest stosowanie metody przyrostów skończonych i modyfikowanej formy Riemann- Liouville do przedstawienia rozwiązania równania. Korzystając z hyper neuronów i modyfikowanych algorytmów genetycznych zrealizowana została metoda identyfikacji parametrów obiektu opisywanego ułamkowymi całkowo-różniczkowymi równaniami. Zaproponowana metoda dynamicznej korekcji obliczenia stanów nieustalonych, dla systemów ze zmiennym rzędem ułamkowego całkowania, zapewnia wyższą wiarygodność wyników. Opracowana metoda pozwala na modelowanie procesów w elektrochemicznych kondensatorach dużej pojemności z wysoką dokładnością.

**Słowa kluczowe:** różniczkowanie ułamkowe, całkowanie ułamkowe, hyper neuron, algorytmy genetyczne, identyfikacja parametrów

DOI: 10.7862/re.2015.29

*Tekst złożono w redakcji:* maj 2015

*Przyjęto do druku:* wrzesień 2015







Mariusz TROJNAR<sup>1</sup>

## KOMPUTEROWA ANALIZA OBWODÓW NIELINIOWYCH PRĄDU STAŁEGO

W artykule przedstawiono przykłady zastosowania wybranych programów komputerowych w analizie obwodów nieliniowych prądu stałego. W obliczeniach analitycznych, w celu wyznaczenia np. wartości prądów płynących w gałęziach obwodu i/lub napięć na elementach, stosowane są zazwyczaj metody graficzne. Metody te wymagają wykonywania dokładnych rysunków (charakterystyk prądowo-napięciowych elementów), tak aby otrzymane wyniki były poprawne (dokładne). Zastosowanie programów komputerowych do analizy obwodów nieliniowych przyczynia się do uzyskiwania pożądanych dokładności wyników końcowych, a także, w niektórych przypadkach, przyspiesza ich otrzymanie.

**Słowa kluczowe:** obwody nieliniowe, metody analizy, programy komputerowe

### 1. Wprowadzenie

#### 1.1. Zastosowanie komputerów w analizie obwodów elektrycznych

Komputery z odpowiednim oprogramowaniem wykorzystywane są w analizie obwodów elektrycznych od wielu lat i właściwie trudno byłoby sobie dzisiaj wyobrazić niekorzystanie z nich podczas obliczeń naukowych i dydaktycznych. Tym bardziej, że kolejne wersje programów zazwyczaj niosą ze sobą rozszerzenia funkcjonalności, pozwalając na obliczanie tego, co w przeszłości nie było możliwe. Programów, z których można skorzystać w analizach obwodów elektrycznych jest obecnie znacznie więcej niż np. kilkanaście lat temu.

Poprawnie przygotowany model obliczeniowy (obwód zawierający połączone ze sobą określone elementy lub układ równań wynikających z określonych praw) poddawany może być wielu różnym analizom, dając w rezultacie wyniki (np. wartości prądów w gałęziach obwodu czy napięć na jego elementach) uzyskane znacznie szybciej niż gdyby otrzymano je w wyniku klasycznego podejścia, przy wykorzystaniu długopisu, kalkulatora i kartki papieru.

---

<sup>1</sup> Mariusz Trojnar, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.; (17) 8651294, e-mail: trojnar@prz.edu.pl

Przestrzeń wykorzystania komputerów jest szeroka; mogą być także przydatne w analizie obwodów zawierających elementy nieliniowe. Pozostaje kwestia rozpoznania możliwości danego programu, przygotowania poprawnego zapisu układu równań lub obwodu złożonego z elementów odpowiadających schematowi wyjściowemu oraz wyboru rodzaju analizy i ustalenia określonych jej parametrów. Później następuje komputerowa symulacja obwodu i analiza otrzymanych wyników.

## 1.2. Metody analizy obwodów nieliniowych prądu stałego

Metody rozwiązywania obwodów nieliniowych prądu stałego to, jak już wspomniano, przede wszystkim metody graficzne (metoda charakterystyki zastępczej, metoda przecięcia charakterystyk), choć zastosowanie znajduje także metoda analityczna polegająca na rozwiązywaniu układu równań, wśród których zawarte są równania charakteryzujące elementy nieliniowe (charakterystyki prądowo-napięciowe). W obliczeniach zastosowanie znajduje też tw. Thevenina (dla liniowej części obwodu), dzięki czemu cały obwód może uprościć się na tyle, że stosunkowo łatwe staje się dokończenie obliczeń, w dowolny sposób, np. opierając się na jednej ze wspomnianych metod graficznych.

## 2. Obliczenia komputerowe

Przy zastosowaniu wybranych programów komputerowych (Multisim, Mathcad) przedstawiono rozwiązania trzech przykładów obliczeniowych, pokazując różne sposoby rozwiązania danego zadania.

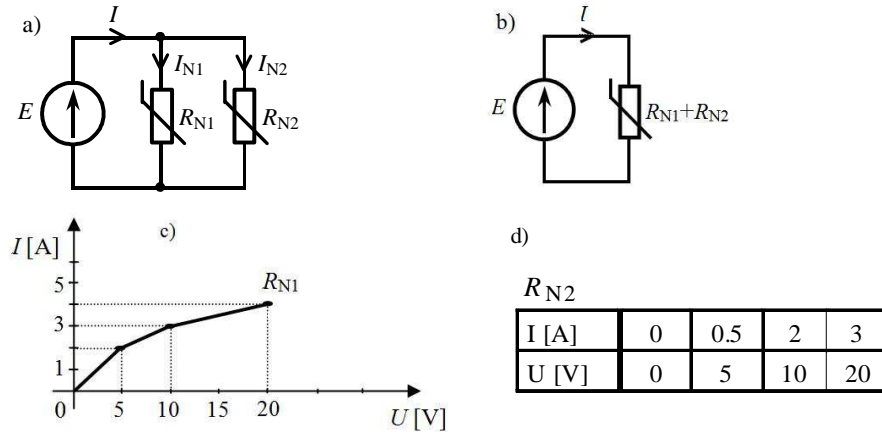
### 2.1. Przykład obliczeniowy I

W obwodzie jak na rys. 1a wyznaczyć wartość napięcia źródłowego  $E$ , przy której wartość prądu  $I$  wynosi 6,2A. Po określeniu wartości  $E$  wyznaczyć wartości prądów  $I_{N1}$  oraz  $I_{N2}$ , płynących przez elementy nieliniowe:  $R_{N1}$  oraz  $R_{N2}$ . Elementy nieliniowe opisano charakterystykami prądowo-napięciowymi w postaci wykresu ( $R_{N1}$ , rys. 1b) oraz w postaci tabeli ( $R_{N2}$ , rys. 1c) [4].

Do rozwiązania zadania zastosowano program Multisim [1], który jest wirtualnym narzędziem umożliwiającym tworzenie i symulację obwodów elektrycznych i elektronicznych; służy do komputerowej analizy układów analogowych i cyfrowych [2]. Program posiada bogatą bibliotekę modeli elementów i duże możliwości analizy. Zalety i wady programu Multisim oraz przykłady zastosowań można znaleźć np. w [2,3].

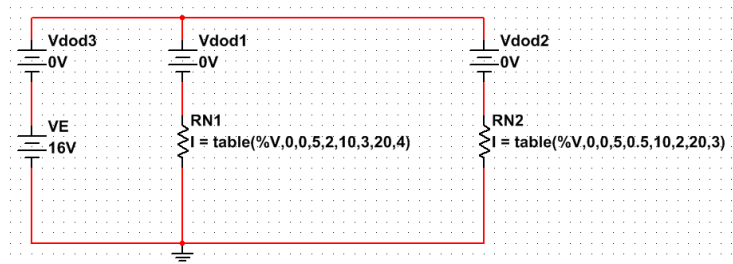
Na rys. 2 przedstawiono przygotowany w programie Multisim obwód, który składa się ze źródła zasilającego VE (element o nazwie DC\_Power), dwóch elementów nieliniowych RN1 oraz RN2 (elementy Non-Ideal Resistor) oraz trzech źródeł napięcia Vdod1, Vdod2 oraz Vdod3 (elementy DC\_Power) o war-

tości 0V, które dodatkowo dołączono w celu otrzymania poprawnych (co do znaku) wartości prądów. Elementy nieliniowe RN1 (rys. 3a) oraz RN2 ze względu na dane zadania (charakterystyki prądowo-napięciowe przedstawione na rys. 1b oraz rys. 1c) zadeklarowano jako prąd w funkcji napięcia I(V).



Rys. 1. Schemat rozważanego obwodu I (a), obwód po dodaniu do siebie charakterystyk elementów  $R_{N1}$  i  $R_{N2}$  (b) oraz charakterystyki prądowo-napięciowe elementów nieliniowych (c,d)

Fig. 1. Circuit I (a), circuit after adding characteristics of elements  $R_{N1}$  and  $R_{N2}$  (b) and current-voltage characteristics of non-linear elements (c,d)



Rys. 2. Schemat obwodu I w programie Multisim

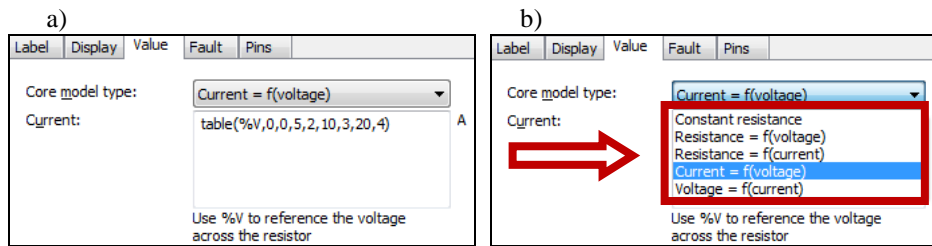
Fig. 2. Circuit I in Multisim program

Na rys. 3b przedstawiono możliwe do deklaracji, jako wartość elementu  $R_{N1}$  (tak też jest w przypadku elementu  $R_{N2}$ ), różne warianty: rezystancja o pewnej określonej stałej wartości, rezystancja w funkcji prądu lub w funkcji napięcia oraz zależność napięcia od prądu, jak również zależność prądu od napięcia, czyli to, co można wykorzystać na potrzeby rozwiązania powyższego zadania. Punkty charakterystyk prądowo-napięciowych elementów nieliniowych (rys. 1c, rys. 1d) wpisano więc w deklaracji elementów  $R_{N1}$  oraz  $R_{N2}$  rys. 2,

rys. 3a, rys. 3b), wykorzystując deklarację funkcji tabelarycznej (Table). W zapisie ogólnym

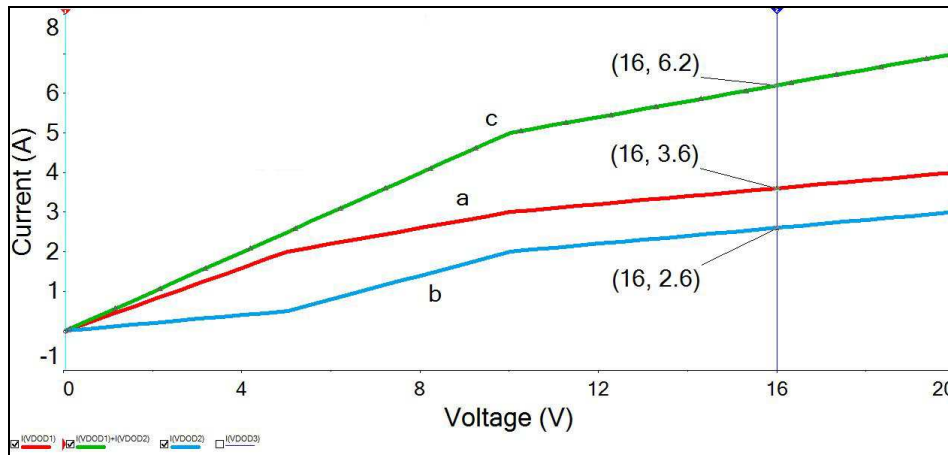
```
table(%V, NU1, NI1, NU2, NI2, NU3, NI3, NU4, NI4)
```

pierwsze współrzędne par punktów (charakterystyki prądowo-napięciowej) to wartości napięcia (NU1, NU2, NU3, NU4 itd.), drugie - odpowiadające im wartości prądów (NI1, NI2, NI3, NI4 itd.). Po wybraniu analizy DC Sweep (Simulate/Analyses and Simulation/DC Sweep) i ustaleniu jej parametrów, a następnie przeprowadzeniu symulacji, otrzymujemy wyniki przedstawione na rys. 4.



Rys. 3. Wybrany do analizy typ modelu elementu nieliniowego RN1 (a) oraz możliwe do zadeklarowania typy modelu elementu Non-Ideal Resistor w programie Multisim (b)

Fig. 3. Non-linear element RN1 type chosen for analysis (a) and possible model types of Non-Ideal Resistor in Multisim program (b)



Rys. 4. Charakterystyki prądowo-napięciowe: elementu nieliniowego RN1 (a), elementu nieliniowego RN2 (b), wypadkowa charakterystyka RN1+RN2 (c)

Fig. 4. Current-voltage characteristics: non-linear element RN1(a), non-linear element RN2 (b) and RN1+RN2 characteristics (c)

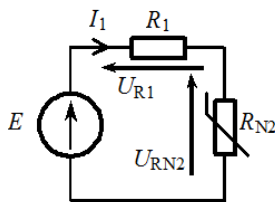
Krzywe a oraz b na rys. 4 przedstawiają charakterystyki elementów nieliniowych  $R_{N1}$  oraz  $R_{N2}$  (dane zadania). Wypadkowa charakterystyka c powstała w wyniku dodania do siebie charakterystyk a i b „przy stałym napięciu” (elementy  $R_{N1}$  i  $R_{N2}$  są połączone równolegle). Odczytana z rysunku (charakterystyka c) dla prądu  $I=6,2A$  wartość napięcia  $E=16V$ , jest zarazem wartością napięcia na każdym z połączonych równolegle elementów  $R_{N1}$  oraz  $R_{N2}$ . Odczytane wartości prądów (z charakterystyk a oraz b) dla napięcia  $E=16V$  wynoszą odpowiednio:  $I_{N1}=3,6A$  oraz  $I_{N2}=2,6A$ .

W powyższym przykładzie przede wszystkim chodziło o pokazanie możliwości, jakie stwarza program Multisim; zwłaszcza możliwości zapisu charakterystyki prądowo-napięciowej elementu nieliniowego w samym elemencie (rys. 3a), bez konieczności użycia np. źródła prądu sterowanego napięciem jako „elementu nieliniowego”, by móc zapisać podane w zadaniu charakterystyki prądowo-napięciowe elementów  $R_{N1}$  oraz  $R_{N2}$ , jak to np. pokazano w [4] (zadanie 1 w rozdz. 6.3).

Wyniki uzyskane w rezultacie symulacji obwodu w programie Multisim, można m.in. zapisać do pliku w formacie programu Microsoft Excel, i w różny sposób je przetwarzać.

## 2.2. Przykład obliczeniowy II

W obwodzie jak na rys. 5 wyznaczyć wartość prądu i napięć na elementach. Dane:  $E=60V$ ,  $R_1=16\Omega$ . Element nieliniowy  $R_{N2}$  opisany jest wielomianem  $U_{RN2}(I_{N2})=3+5 I_{N2}^2$ .



Rys. 5. Przykład obliczeniowy II

Fig. 5. Calculation example II

Do rozwiązania zadania zastosowano program Mathcad. W celu rozwiązania powyższego zadania można wykorzystać jedną z gotowych procedur numerycznych, a mianowicie blok Given-Find. Procedurę tę można stosować do rozwiązywania układów równań i nierówności zarówno liniowych, jak i nieliniowych. Podobnie jak inne procedury numeryczne blok wymaga podania wartości startowych poszukiwanych zmiennych. Następnie wpisujemy słowo

Given, które rozpoczyna blok równań i nierówności, a po wpisaniu wspomnianych równań i nierówności wpisujemy funkcję Find, która zwraca wektor wartości zmiennych, będących rozwiązaniem układu równań i nierówności [6]. Dane i równania wpisane zgodnie z powyższym opisem, a także rozwiązanie w programie Mathcad przedstawiono na rys. 6.

Dane zadania:	$E := 60$	$R1 := 16$
Wartość startowa poszukiwanej zmiennej:	$I1r := 0$	
	Given	
Układ równań do rozwiązania:	$E - (R1 \cdot I1r) - (3 + 0 \cdot I1r + 5 \cdot I1r^2) = 0$	
	$I1 := \text{Find}(I1r)$	
Rozwiązanie:	$I1 = 2.136$	
Pozostałe obliczenia:	$UR1 := R1 \cdot I1$	$UR1 = 34.181$
	$URN2 := 3 + 5 \cdot I1^2$	$URN2 = 25.819$

Rys. 6. Zawartość pliku w programie Mathcad zawierającego rozwiązanie przykładu obliczeniowego II

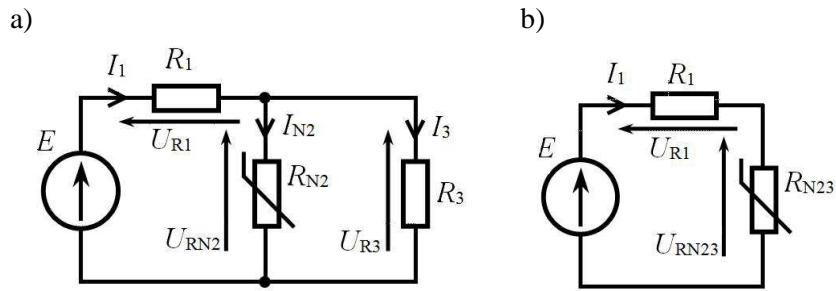
Fig. 6. File content in Multisim program including the solution of calculation example II

Jak widać, w prosty (i szybki) sposób otrzymano końcowe wyniki ( $I_1=2,136\text{A}$ ,  $U_{R1}=34,181\text{V}$ ,  $U_{RN2}=25,819\text{V}$ ). Jedyne co jest wymagane od użytkownika to elementarna wiedza dotycząca obsługi programu Mathcad oraz znajomość podstawowych praw elektrotechniki (prawo Ohma, prawa Kirchhoffa). Oczywiście, przykład jest bardzo prosty, ale ilustruje zasadę postępowania, którą można także odnieść do przykładów (obwodów) rozbudowanych. Przy wielu równaniach zawartych pomiędzy słowami Given oraz Find może się zdarzyć, że nie otrzymamy bezpośrednio rozwiązania (program go nie podaje); w celu uzyskania rozwiązania (o ile oczywiście istnieje) należy wówczas zmieniać wartości początkowe (startowe) poszukiwanych wielkości.

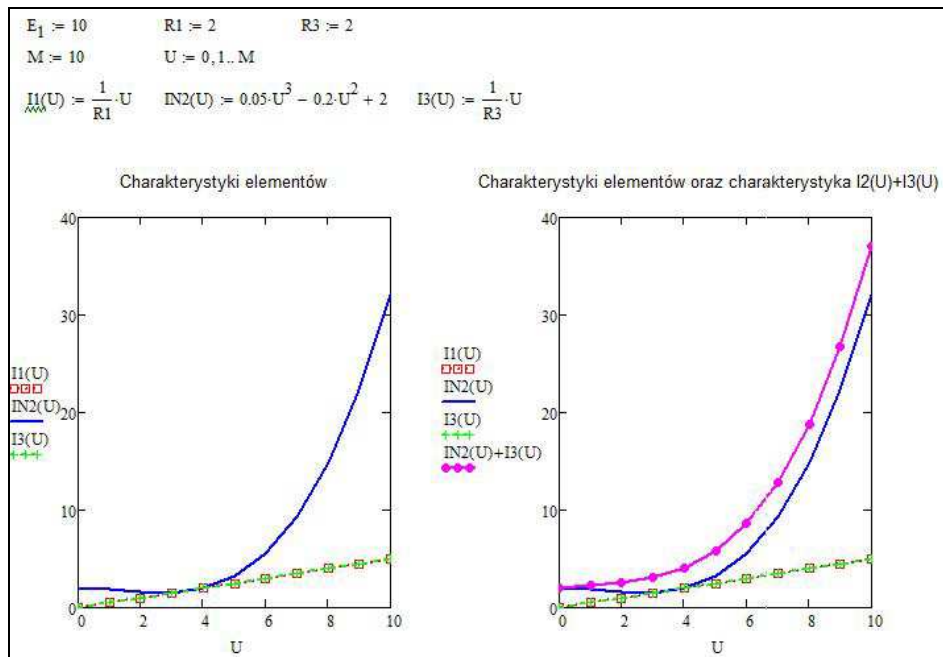
### 2.3. Przykład obliczeniowy III

W obwodzie jak na rys. 7a wyznaczyć wartości prądów  $I_1$ ,  $I_2$  oraz  $I_3$ , a także wartości napięć na elementach. Dane:  $E=10\text{V}$ ,  $R_1=2\Omega$ ,  $R_3=2\Omega$ . Element nieliniowy  $R_{N2}$  opisany jest wielomianem:  $I_{N2}(U_{RN2})=0,05U_{RN2}^3-0,2U_{RN2}^2+2$ .



Rys. 7. Schemat obwodu III (a) oraz obwód zawierający wypadkowy element  $R_{N23}$  (b)Fig. 7. Circuit III (a) and circuit including element  $R_{N23}$  (b)

Do rozwiązania zadania zastosowano metodę przecięcia charakterystyk przy użyciu programu Mathcad. W pierwszym kroku wykreślono charakterystyki  $I_1(U)$ ,  $I_{N2}(U)$  oraz  $I_3(U)$  (czyli charakterystyki prądowo-napięciowe elementów  $R_1$ ,  $R_{N2}$  oraz  $R_3$ ), a następnie dodano charakterystyki elementów połączonych równolegle (charakterystyki elementów  $R_{N2}$  oraz  $R_3$ ) otrzymując charakterystykę wypadkowego elementu  $R_{N23}$ . (rys. 8).



Rys. 8. Wykreślanie charakterystyk prądowo-napięciowych elementów obwodu III

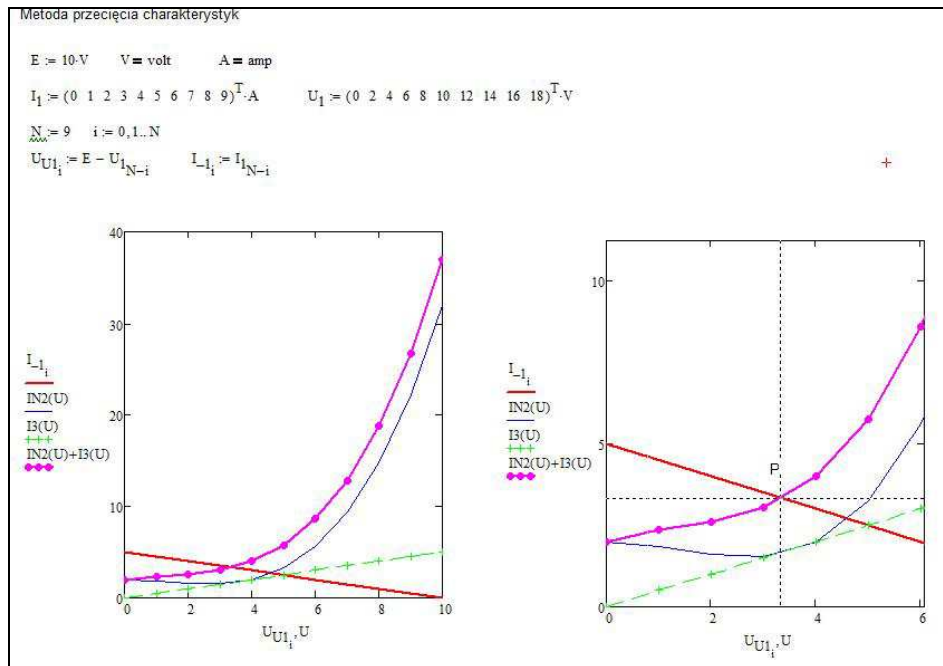
Fig. 8. Drawing the current-voltage characteristics of circuit III elements

Po uzyskaniu charakterystyki wypadkowego elementu  $R_{N23}$  obwód przyjmie postać przedstawioną na rys. 7b. W obwodzie tym, na podstawie II prawa Kirchhoffa, można zapisać równanie (1), które po przekształceniu i podstawieniu danych przyjmie postać (2).

$$E - R_1 I_1 = U_{RN23} \quad (1)$$

$$I_1 = -0,5U_{RN23} + 5 \quad (2)$$

Prosta o równaniu:  $-0,5 \cdot U + 5$  przechodzi przez dwa punkty leżące na osiach układu współrzędnych:  $(E, 0)$  oraz  $(0, E/R_1)$ , czyli punkty:  $(10, 0)$  oraz  $(0, 5)$ . Punkt przecięcia tej prostej z charakterystyką wypadkową połączenia równoległego elementów  $R_{N2}$  oraz  $R_3$  (punkt P na rys. 9) daje rozwiązanie: prąd  $I_1$  oraz napięcie  $U_{RN23}$ . W celu odczytania współrzędnych punktu P należy kliknąć prawym klawiszem myszy obszar wykresu, a następnie wybrać Trace – kolejnym kliknięciem wybieramy punkt przecięcia i odczytujemy współrzędne punktu P ( $I_1$  oraz  $U_{RN23}$ ). Na podstawie tych wartości obliczamy pozostałe poszukiwane wartości prądów i napięć w obwodzie.



Rys. 9. Ilustracja metody przecięcia charakterystyk

Fig. 9. Characteristics crossing method

Powyższe zadanie można także rozwiązać na podstawie układu równań (w oparciu o prawo Ohma i prawa Kirchhoffa) przy wykorzystaniu omówionej już wyżej procedury numerycznej (blok Given-Find). Poniżej jeden ze sposobów rozwiązania zadania (rys. 10). Otrzymane wyniki ( $I_1=3,32\text{A}$ ,  $I_{N2}=1,6392\text{A}$ ,  $I_3=1,681\text{A}$ ,  $U_{R1}=6,639\text{V}$ ,  $U_{N2}=3,361\text{V}$ ,  $U_{R3}=3,361\text{V}$ ) wyróżniono obramowaniem.

```

E := 10    R1 := 2    R3 := 2
Rozwiązanie:
I1r := 0    UN2r := 0    I3r := 0
Given
I1r - I3r - (2 - 0.2·UN2r2 + 0.05·UN2r3) = 0
E - R1·I1r - R3·I3r = 0
UN2r - R3·I3r = 0
( I1
  UN2
  I3 ) := Find(I1r, UN2r, I3r)    ( I1
  UN2
  I3 ) = ( 3.32
  3.361
  1.68 )
I1 = 3.32    UN2 = 3.361    I3 = 1.6805
Obliczenie pozostałych wartości:
IN2 := 2 - 0.2·UN22 + 0.05·UN23    UR1 := R1·I1    UR3 := UN2
IN2 = 1.639    UR1 = 6.639    UR3 = 3.361

```

Rys. 10. Wyznaczanie wartości prądów i napięć w obwodzie III za pomocą programu Mathcad

Fig. 10. Calculation of currents and voltage in circuit III using Mathcad program

### 3. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wybrane możliwości programów komputerowych: Multisim oraz Mathcad w kontekście ich zastosowania w analizie obwodów nieliniowych prądu stałego. Na podstawie analizy trzech obwodów zawierających elementy nieliniowe, których charakterystyki prądowo-napięciowe podano: w postaci graficznej, w tabeli lub w postaci wielomianu, zilustrowano różne sposoby deklaracji elementu nieliniowego i jego charakterystyki. Odbyło

się to: poprzez bezpośredni zapis punktów (współrzędnych) nieliniowej charakterystyki prądowo-napięciowej w samym elemencie w programie Multisim (przykład obliczeniowy I), poprzez zapis w postaci wielomianu w układzie równań i zastosowaniu jednej z procedur numerycznych w programie Mathcad (przykład obliczeniowy II, przykład obliczeniowy III) oraz jako postać graficzną w metodzie przecięcia charakterystyk zilustrowaną w programie Mathcad (przykład obliczeniowy III).

Przedstawione przykłady rozwiązań opisanych w artykule zadań nie są jedynymi możliwymi sposobami uzyskania końcowych wyników. Oczywiście jest, że każde z opisanych w artykule zadań można zupełnie inaczej rozwiązać, stosując także inne programy komputerowe. W artykule pokazano te możliwości programów Multisim oraz Mathcad, które (w zależności od stopnia skomplikowania obwodu) przyczyniają się lub mogą przyczyniać się do uzyskania, w sposób szybki i dokładny, końcowych wyników komputerowej analizy obwodów nieliniowych prądu stałego.

## Literatura

- [1] NI Multisim: Powerful Teaching, Research, and Circuit Design Software, <http://www.ni.com/multisim/> [dostęp: 3 kwietnia 2015r.].
- [2] Noga K.M., Radwański M.: Multisim. Technika cyfrowa w przykładach. Wydawnictwo BTC, Legionowo 2009.
- [3] Noga K., Radwański M.: Symulacja układów cyfrowych. Zastosowanie pakietu Multisim 10, Elektronika Praktyczna, nr 6, 2009, s. 72-77, <http://ep.com.pl/files/2501.pdf> [dostęp: 14 września 2015r.].
- [4] Szczepański A., Trojnar M.: Obwody i Sygnały. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2006.
- [5] Szczepański A., Trojnar M.: Obwody i Sygnały. Laboratorium komputerowe. Instrukcje do ćwiczeń (Wydanie III). Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2014.
- [6] Bodnar A., Dziewałtowski W., Ziębakowski T.: Mathcad. Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych z Informatyki. [http://www.tezet.ps.pl/PLIKI/MATHCAD/MATHCAD\\_instrukcja\\_uzupelniona.pdf](http://www.tezet.ps.pl/PLIKI/MATHCAD/MATHCAD_instrukcja_uzupelniona.pdf) [dostęp: 21 września 2015r.].
- [7] Regel W.: Mathcad. Przykłady zastosowań. Wydawnictwo MIKOM, Warszawa 2004.

## THE COMPUTER ANALYSIS OF DIRECT CURRENT NON-LINEAR CIRCUITS

### Summary

The article presents chosen possibilities of Multisim and Mathcad computer programs in the context of their application in the analysis of non-linear circuits of direct current. Three circuits including non-linear elements have been analyzed. Their current-voltage characteristics have been

presented graphically, in a table or in the form of a polynomial. On the basis of this analysis, different ways of declaration of non-linear element and its characteristic have been illustrated. This was done by direct recording of the coordinates of current-voltage non-linear characteristics in the very element using Multisim program (calculation example I). The second way was by recording in the form of polynomial in equations using one of the numerical procedures in Mathcad program (calculation example II, calculation example III) The third way was in the graphic form using characteristics crossing method illustrated in Mathcad program (calculation example III).

The presented examples of solutions of the tasks described in the article are not the only possible ways of obtaining the results. Obviously, each of the tasks described could be solved in other way using other computer programs. The article presents such possibilities of Multisim and Mathcad programs which (depending on the degree of complexity of the circuit) contribute to obtaining, in a fast and precise way, the final results of computer of direct current non-linear circuits.

**Keywords:** non-linear circuits, methods of analysis, computer programs

DOI: 10.7862/re.2015.30

*Tekst złożono w redakcji:* maj 2015

*Przyjęto do druku:* wrzesień 2015





Ivanna BUBELA<sup>1</sup>

## OPRACOWANIE WYNIKÓW LOSOWYCH OBSERWACJI Z PŁASKO-NORMALNYM ROZKŁADEM METODĄ STATYSTYK POZYCYJNYCH

W artykule zastosowano metodę statystyk pozycyjnych do opracowania obserwacji z płasko-normalnym rozkładem prawdopodobieństwa, który jest splotem rozkładów normalnego i jednostajnego. Zaproponowana metoda zapewnia mniejszą niepewność standardową wyniku w porównaniu do niepewności wartości średniej. Skuteczność metody zwiększa się, gdy wzrasta zawartość składnika jednostajnego. Realizacja metody nie wymaga skomplikowanych obliczeń. Przedstawiono wyniki badań metody - niepewność standardową w zależności od wzajemnej zawartości składników oraz liczby obserwacji.

**Słowa kluczowe:** niepewność, metoda statystyk pozycyjnych, macierz kowariacyjna, metoda Monte-Carlo.

### 1. Wstęp

Niezbędnym elementem pomiarów jest ocena niepewności uzyskanych wyników [1]. Często losowe obserwacje pomiarowe nie podlegają żadnemu „czystemu” rozkładowi (na przykład normalnemu, Laplace’a, jednostajnemu, etc.), dlatego należy zastosować rozkład, który jest splotem dwóch lub więcej typowych rozkładów. Przykładowo splotem dwóch typów rozkładu jest rozkład płasko-normalny. Kształt rozkładu sumy  $x = x_1 + x_2$  dwóch niezależnych zmiennych losowych  $x_1$  i  $x_2$  zależy od wartości tych zmiennych oraz od ich rozkładów  $p_1(x_1)$  i  $p_2(x_2)$ , a funkcja gęstości rozkładu opisana jest zależnością:

$$p(x) = \int_{-\infty}^{\infty} p_1(x - x_2) \cdot p_2(x_2) dx_2 = \int_{-\infty}^{\infty} p_1(x_1) \cdot p_2(x - x_1) dx_1 . \quad (1)$$

---

<sup>1</sup> Ivanna Bubela, doktorantka Narodowego Uniwersytetu „Politechnika Lwowska”, Ukraina, Lviv, ul. Stepan Bandera 12, 79013, 097-612-58-29, popovych.i@ukr.net



W szczególności, jeśli jedna ze zmiennych losowych, na przykład  $x_1$  ma rozkład normalny z wartością oczekiwaną  $m_n$  i odchyleniem standardowym  $\sigma_n$ , a druga zmienna losowa  $x_2$  ma rozkład jednostajny z wartością oczekiwaną  $m_r$  i zakresem zmienności  $a$ , wtedy rozkład  $x = x_1 + x_2$  może być opisany wzorem [2, 3, 4]:

$$p_{n,r}(x, m, a, \sigma) = \frac{F_n((x - m_x + a)/\sigma_n) - F_n((x - m_x - a)/\sigma_n)}{2a}, \quad (2)$$

gdzie  $F_n(x)$  - funkcja Laplace'a;  $m_x = m_n + m_r$  - wartość oczekiwana sumy. Rozkład prawdopodobieństwa (2) wykorzystywany jest przy obliczaniu niepewności wyników pomiarów metodami przybliżonymi [2-5] i nazywany jest „rozkładem płasko-normalnym” [2, 3].

Podstawą do wyznaczania najlepszych estymatorów z obserwacji o rozkładzie (2) jest znajomość zawartości składowych normalnej i jednostajnej w ich sumie. W praktyce zwykle nie ma takiej informacji a priori, wtedy do wyznaczenia najlepszego estymatora z minimalną niepewnością standardową wyniku może być zastosowana metoda statystyk pozycyjnych [6-8].

## 2. Metoda statystyk pozycyjnych

Zgodnie z tą metodą zasada wyznaczania najlepszych estymatorów położenia  $\hat{\mu}$  i szerokości  $\hat{\sigma}$  badanej próby losowej polega na wstępnym uporządkowaniu obserwacji:  $X_s = \text{sort}(X) = x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$ , a następnie na minimalizacji sumy kwadratów  $S_R^2$  odchyłeń  $v_k = x_{ref_k}' - x_{(k)} = \hat{\mu} + x_{ref_k} \cdot \hat{\sigma} - x_{(k)}$ , ( $m=0$ ,  $\sigma=0$ ) od obserwacji referencyjnych  $x_{ref_k}$ , odpowiadających wybranym rozkładom prawdopodobieństwa [6-8].

Parametry  $\hat{\mu}$  i  $\hat{\sigma}$  badanej próby obliczane są metodą ważonych najmniejszych kwadratów, która w zapisie macierzowym ma postać [7-9]:

$$(\hat{\mu}, \hat{\sigma})^T = (A^T \cdot W \cdot A)^{-1} A^T \cdot W \cdot X_s = REC \cdot X_s, \quad (3)$$

gdzie:  $A^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_{ref_1} & x_{ref_2} & \dots & x_{ref_n} \end{pmatrix}$  - macierz obserwacji referencyjnych,

$W = \text{COV}^{-1}$  - macierz wagowa, będąca odwrotnością macierzy kowariancji  $\text{COV}$  statystyk pozycyjnych,  $REC = (A^T \cdot W \cdot A)^{-1} A^T \cdot W$  - macierz rekonstrukcyjna.

Elementy macierzy kowariacyjnej COV są obliczane według wzoru [7-10]:

$$Cov_{k,l} = \iint_{x_j > x_k} s \cdot z \cdot p_{2_{k,l}}(s, z) ds dz - xref_k \cdot xref_l, \quad (4)$$

gdzie

$$p_{2_{k,l}}(s, z) = C(n, k, l) \cdot [F(s)]^{k-1} [F(z) - F(s)]^{l-k-1} [1 - F(z)]^{n-l} p(s) p(z) \quad (5)$$

jest łącznym rozkładem prawdopodobieństwa statystyk pozycyjnych  $k$ -tej ( $s$ ) i  $l$ -tej ( $z$ ) [10]:

$$C(n, k, l) = \frac{n!}{(n-l)!(l-k-1)!(k-1)!}. \quad (6)$$

Jeśli typ rozkładu a priori nie jest znany, to w celu wyznaczenia najlepszych estymatorów  $\hat{\mu}$  i  $\hat{\sigma}$  uporządkowane obserwacje wejściowe porównywane są z zestawem  $J$  ( $j=1, 2, \dots, J$ ) obserwacji referencyjnych  $xref_{1,j}, xref_{2,j}, xref_{3,j}, \dots, xref_{n,j}$ , odpowiadających przewidywanej gęstości rozkładów  $p_1(x), p_2(x), p_j(x), \dots, p_f(x)$  zmiennej losowej opisanej rozkładem (2) przy różnych proporcjach parametrów  $a$  i  $\sigma_n$ . Następnie poszukuje się najlepszej pary nieznanych parametrów  $\hat{\mu}, \hat{\sigma}$  z uwzględnieniem warunku najlepszego dopasowania zarejestrowanych obserwacji do obserwacji referencyjnych, to znaczy z warunku minimalnej wartości sumy kwadratów odchyleń reszkowych:

$$\min \left[ S_{R,j}^2 = \frac{\left( X_s - A_j \cdot (\hat{\mu}_j, \hat{\sigma}_j)^T \right)^T \cdot W_j \cdot \left( X_s - A_j \cdot (\hat{\mu}_j, \hat{\sigma}_j)^T \right)}{n-2} \right]. \quad (7)$$

Podstawowym problemem praktycznej realizacji przedstawionej wyżej metody jest złożoność obliczania macierzy kowariancji COV (zależności od (3) do (5)); oprócz tego dokładność obliczeń zmniejsza się wraz ze wzrostem liczby obserwacji  $n$ . Ten problem jest ważny, gdy liczba obserwacji i wartości składnika jednostajnego oraz normalnego mogą się zmieniać.

Celem prowadzonych badań jest:

- analiza możliwości zastosowania uproszczonej metody statystyk pozycyjnych;
- analiza skuteczności zaproponowanej metody i opracowanie badań statystyczną metodą Monte-Carlo.

### 3. Znormalizowany rozkład sumy zmiennych losowych o rozkładzie normalnym i jednostajnym

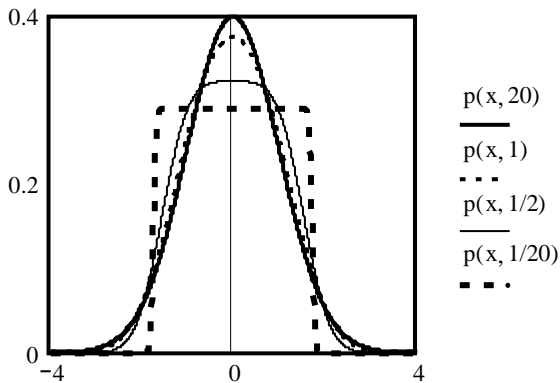
Aby zastosować metodę statystyk pozycyjnych podczas wyznaczania obserwacji referencyjnych, należy najpierw utworzyć macierz kowariancji, która używana jest wyraz z rozkładem unormowanej gęstości zmiennej losowej  $y = (x - m_x)/\sigma_x$  z  $m_x = 0$ ,  $\sigma_x = 1$ . W tym przypadku odchylenie standardowe sumy dwóch składników powinno być równe 1:  $\sigma_x = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_r^2} = \sqrt{\sigma_n^2 + a^2/3} = 1$ . Jeśli stosunek odchyłeń standardowych składowej normalnej i jednostajnej oznaczymy jako  $b = \sigma_n/\sigma_r = \sigma_n\sqrt{3}/a$ , wtedy z warunku  $\sigma_x = 1$  i zależności (2) otrzymujemy wartości parametrów rozrzutu obydwu rozkładów:

$$\text{dla normalnego } a = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1+b^2}}, \text{ oraz dla jednostajnego } \sigma_n = \frac{b}{\sqrt{1+b^2}}. \quad (8)$$

Wówczas znormalizowany rozkład sumy składników (2) zależy tylko od jednego parametru  $b$  i opisywany jest zależnością:

$$p_{n,r}(y,b) = \frac{\sqrt{1+b^2}}{2\sqrt{3}} \left[ F\left(y, \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1+b^2}}, \frac{b}{\sqrt{1+b^2}}\right) - F\left(y, -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1+b^2}}, \frac{b}{\sqrt{1+b^2}}\right) \right]. \quad (9)$$

Na rysunku 1 przedstawiono rozkład (9) dla różnych wartości parametru  $b$ .



Rys. 1. Gęstość rozkładu płasko-normalnego dla różnych wartości stosunku odchyłeń standardowych (parametru  $b$ ):  $b=20$ ; 1; 1/2; 1/20

Fig. 1. The density Flatten-Gaussian distribution for different ratio standard deviation of (parameter  $b$ ):  $b=20$ ; 1; 1/2; 1/20

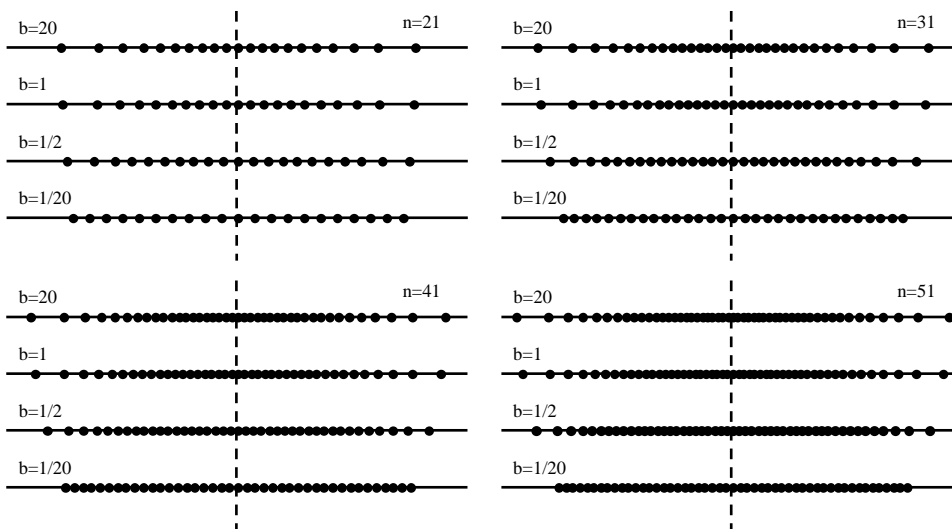
## 4. Określanie macierzy próbek referencyjnych

### 4.1. Obserwacje referencyjne

Do realizacji metody statystyk pozycyjnych potrzebne są obserwacje referencyjne ze znormalizowanym rozkładem (9) i dystrybuantą

$$F_{n,r}(y) = \int_{-\infty}^y p_{n,r}(y,b) dy .$$

Na rysunku 2 pokazane są obserwacje referencyjne dla kilku wartości liczby obserwacji  $n = 21, 31, 41$  i  $51$  i różnych wartości parametru  $b$  tj:  $b=20; 1; 1/2; 1/20$ . Jak wynika z rysunku obserwacje referencyjne przy  $b \geq 1/20$  praktycznie są zbieżne z obserwacjami mającymi rozkład normalny, a przy  $b \geq 20$  praktycznie odpowiadają obserwacjom posiadającym rozkład jednostajny.



Rys. 2. Przykłady zestawów referencyjnych próbek ( $n = 21, 31, 41$  i  $51$ ) odpowiadających płasko-normalnemu rozkładowi przy różnej wartości  $b = 20; 1; 1/2; 1/20$

Fig. 2. Examples of sets of sample observations ( $n=21, 31, 41$  and  $51$ ) corresponding to the density Flatten-Gaussian distribution with a different ratio of  $b=20; 1; 1/2; 1/20$

### 4.2. Macierz kowariancyjna

W celu uproszczenia obliczeń macierzy kowariancji zaproponowano wykorzystanie asymptotycznego przybliżenia dla wariancji i współczynników korelacji pomiędzy dwoma statystykami pozycyjnymi [7-10]. Do wyprowadzenia tych wzorów wykorzystano właściwości kwantyli  $x_{(\lambda_1)}$  i  $x_{(\lambda_2)}$  rzędu  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  próby

prostej, pobranej z populacji o rozkładzie  $p(x)$  (dystrybuanta  $F(x)$ ), które przy dużych  $n$  mają rozkład asymptotycznie normalny o parametrach [9-10]:

$$m_1 = x_{(\lambda,1)}, \quad m_2 = x_{(\lambda,2)}$$

$$\sigma_1^2 \approx \frac{\lambda_1(1-\lambda_1)}{n(p(x_{(\lambda_1)}))^2}, \quad \sigma_2^2 \approx \frac{\lambda_2(1-\lambda_2)}{n(p(x_{(\lambda_2)}))^2}, \quad \rho_{1,2} \approx \sqrt{\frac{\lambda_1(1-\lambda_2)}{\lambda_2(1-\lambda_1)}}, \quad (10)$$

Dla  $1 \leq k \leq n$  wartości  $\lambda_k$  są równe  $\lambda_k = k/(n+1)$  i w tym przypadku  $x_{ref_{j;k}} \approx x_{(\lambda,j;k)} = qF_j(\lambda_k) = F_j^{-1}(\lambda_k)$ . Wtedy na podstawie zależności (10) przybliżone wartości współczynników macierzy kowariancji mogą być obliczone z zależności:

$$Cov_{k-1,l-1} \approx \rho_k \cdot \sigma_k \cdot \sigma_l = \frac{1}{n(n+1)^2} \begin{cases} \frac{k \cdot (n-l+1)}{p_{n,r}(x_{(k-1)}, b) \cdot p_{n,r}(x_{(l-1)}, b)}, & l \geq k \\ \frac{l \cdot (n-k+1)}{p_{n,r}(x_{(k-1)}, b) \cdot p_{n,r}(x_{(l-1)}, b)}, & l < k \end{cases}. \quad (11)$$

## 5. Wyniki badań

Aby przetestować skuteczność proponowanej metody przeprowadzono badanie z wykorzystaniem metody Monte-Carlo. Przyjęto następujące wartości parametrów: liczba symulacji  $M = 10^5$ ; liczba obserwacji  $n$  wynosiła kolejno: 21, 31, 41 i 51 przy stosunku odchyłeń standardowych  $b$  równym: 20; 1; 1/2; 1/20; wartość oczekiwana  $m_x = 5$ , odchylenie standardowe  $\sigma_x = 0,1$ .

Na podstawie obliczonej macierzy (11) dla każdego rozkładu określano macierze  $REC_j$  (3) i wyznaczano wartości parametrów położenia  $\hat{\mu}_j$  i szerokości  $\hat{\sigma}_j$  oraz ich standardowe niepewności ze wzorów:

$$u_A(\hat{\mu}_j) = \sqrt{d_{0,0,j}^2 \cdot S_{R_j}^2}, \quad u_A(\hat{\sigma}_j) = \sqrt{d_{1,1,j}^2 \cdot S_{R_j}^2}, \quad (12)$$

gdzie  $d_{0,0,j}^2$ ,  $d_{1,1,j}^2$  są elementami diagonalnymi macierzy  $D_j$ :

$$D_j = (A_j^T \cdot W_j \cdot A_j)^{-1} = \begin{pmatrix} d_{0,0,j}^2 & 0 \\ 0 & d_{1,1,j}^2 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$S_{R_j}^2 = \frac{X_s^T \cdot MS2_j \cdot X_s}{n-2}, \quad (14)$$

gdzie  $S_{R_j}^2$  jest nieobciążonym estymatorem wariancji odchyłeń obserwacji referencyjnych od obserwacji wejściowych;

$$MS2_j = W_j \cdot (I - A_j \cdot D_j \cdot A_j^T \cdot W_j), \quad (15)$$

$MS2_j$  jest macierzą wagową, a  $I$  jest jednostkową macierzą diagonalną o wymiarze  $n \times n$  [7, 9].

Na podstawie uzyskanych wyników modelowania dla różnych wartości  $b$  wyznaczono:

- średnie niepewności standardowe parametrów  $\hat{\mu}$  i  $\hat{\sigma}$ :

$$\overline{u_A(\hat{\mu})} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M u_A^2(\hat{\mu}_i)}, \quad \overline{u_A(\hat{\sigma})} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M u_A^2(\hat{\sigma}_i)}. \quad (16)$$

- oraz odchylenia standardowe błędów tych parametrów:

$$s_{\Delta_{\hat{\mu}}} = \sqrt{\frac{1}{(M-1)} \sum_{i=1}^M (\hat{\mu}_i - m_x)^2}, \quad s_{\Delta_{\hat{\sigma}}} = \sqrt{\frac{1}{(M-1)} \sum_{i=1}^M (\hat{\sigma}_i - \sigma_x)^2}. \quad (17)$$

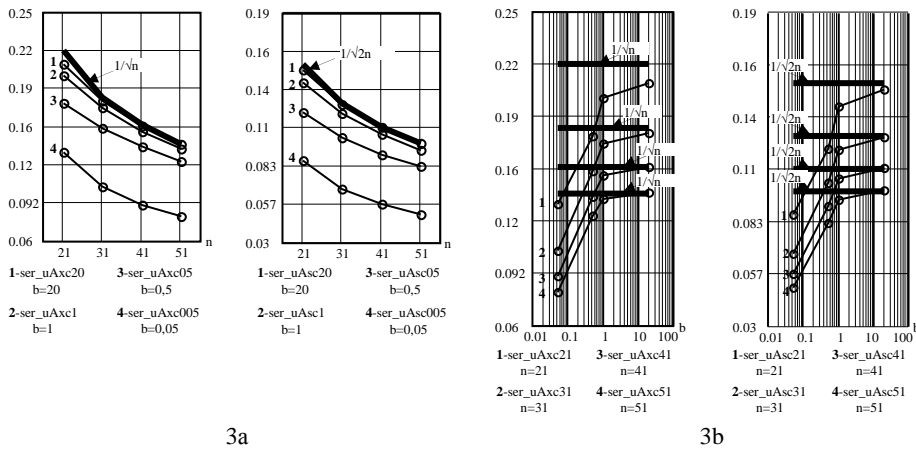
Dla  $b=20$ ;  $1$ ;  $1/2$ ;  $1/20$  oraz liczby obserwacji  $n = 21, 31, 41, 51$  wyniki obliczeń średnich wartości standardowej niepewności parametrów położenia i szerokości przedstawiono w skali logarytmicznej na rysunkach 3a i 3b, a na rysunku 4 przedstawiono wykresy zależności odchyłeń standardowych błędów tych parametrów od liczby obserwacji. Obliczone wartości wspomnianych parametrów podano także w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyki standardowej niepewności i standardowych odchyłeń błędów parametrów położenia i szerokości  $\hat{\mu}$  i  $\hat{\sigma}$  dla  $b = 20$ ;  $1$ ;  $1/2$ ;  $1/20$

Table 1. The characteristics of the standard uncertainties and standard deviation of errors of the location and width parameters  $\hat{\mu}$  i  $\hat{\sigma}$  at  $b = 20$ ;  $1$ ;  $1/2$ ;  $1/20$

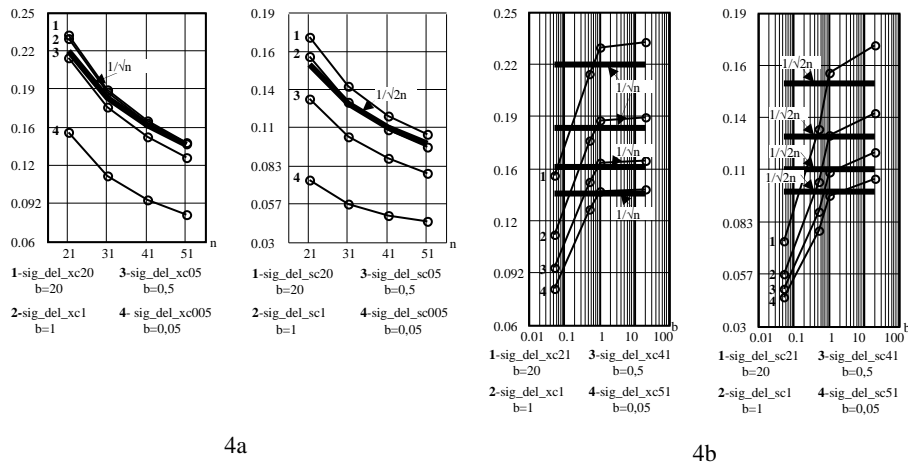
$b$	Wartość parametru położenia			Wartość parametru szerokości		
	$\overline{u_A(\hat{\mu})}$	$\frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$	$s_{\Delta_{\hat{\mu}}}$	$\overline{u_A(\hat{\sigma})}$	$\frac{\sigma_x}{\sqrt{2n}}$	$s_{\Delta_{\hat{\sigma}}}$
$1$	$2$	$3$	$4$	$5$	$6$	$7$
<i>Liczba obserwacji <math>n=21</math></i>						

$b=20$	0,02068	0,02182	0,02319	0,01507	0,01543	0,01736
$b=1$	0,01977		0,02283	0,01420		0,01597
$b=1/2$	0,01745		0,02123	0,01205		0,01307
$b=1/20$	0,01335		0,01506	0,00872		0,00734
<i>Liczba obserwacji <math>n=31</math></i>						
$b=20$	0,01768	0,01796	0,01858	0,01266	0,01270	0,01390
$b=1$	0,01702		0,01842	0,01199		0,01276
$b=1/2$	0,01532		0,01718	0,01032		0,01037
$b=1/20$	0,01052		0,01151	0,00672		0,00566
<i>Liczba obserwacji <math>n=41</math></i>						
$b=20$	0,01558	0,01562	0,01598	0,01106	0,01104	0,01187
$b=1$	0,01510		0,01583	0,01053		0,01089
$b=1/2$	0,01382		0,01470	0,00916		0,00889
$b=1/20$	0,00901		0,00950	0,00566		0,00492
<i>Liczba obserwacji <math>n=51</math></i>						
$b=20$	0,01405	0,01400	0,01423	0,00992	0,00990	0,01055
$b=1$	0,01367		0,01411	0,00947		0,00965
$b=1/2$	0,01263		0,01302	0,00828		0,00787
$b=1/20$	0,00804		0,00823	0,00500		0,00450
<p><i>Notatka: 1 - stosunek odchyleń standardowych składowej normalnej do prostokątnej; 2, 5 - średnia niepewność standardową; 3, 6 - teoretyczna wartość niepewności; 4, 7 - odchylenie standardowe błędu.</i></p>						



Rys. 3. Zależności wartości średnich niepewności standardowej i teoretyczne wartości niepewności parametrów położenia (a) i szerokości (b) od liczby obserwacji  $n=21, 31, 41$  i  $51$  dla  $b=20; 1; 1/2; 1/20$

Fig. 3. Depending on the mean value of the standard uncertainty and theoretical uncertainties location and width parameters at  $b=20; 1; 1/2; 1/20$  of the number of observations  $n=21, 31, 41$  and  $51$



Rys. 4. Zależności odchylenia standardowego błędów i teoretyczne wartości niepewności parametrów położenia (a) i szerokości (b) od liczby obserwacji  $n=21, 31, 41$  i  $51$  dla  $b=20; 1; 1/2; 1/20$

Fig. 4. Depending the standard deviation of the error and theoretical uncertainties location and width parameters at  $b=20; 1; 1/2; 1/20$  of the number of observations  $n=21, 31, 41$  and  $51$

## 6. Podsumowanie

W zagadnieniach opracowania wyników losowych obserwacji wartości poszukiwanych parametrów mogą być wyrażone dokładnie (z minimalną standardową niepewnością) tylko w przypadku znajomości rozkładu prawdopodobieństwa tych obserwacji. Metoda statystyk pozycyjnych nie wymaga a priori wiedzy o zawartości składowych mających płasko-normalny rozkład prawdopodobieństwa. Ponieważ metoda ta bazuje na porównaniu danych wejściowych z zestawem wartości referencyjnych, którymi są wartości oczekiwane statystyk pozycyjnych, zapewnia automatyczny wybór najlepszych parametrów położenia i szerokości. Skuteczność metody statystyk pozycyjnych zwiększa się przy wzroście w obserwacjach wejściowych składnika o rozkładzie jednostajnym.

Zaproponowana metoda obliczania macierzy kowariancji, która jest niezbędna do realizacji metody, jest prosta i wystarczająco dokładna. Jest to bardzo ważne gdy liczba obserwacji nie jest znana a priori i nie jest możliwe wcześniejsze przygotowanie macierzy potrzebnych do opracowania danych. Dlatego macierze te należy obliczać w procesie opracowywania obserwacji.

Ocena zaproponowanej metody przeprowadzona przy pomocy metody Monte-Carlo dała pozytywny wynik i potwierdziła jej skuteczność.



## Literatura

- [1] Guide of the Expression of Uncertainty in Measurement. International Organisation for Standardisation. Switzerland, 1993, 1995. 2007, s. 1-13.
- [2] Blázquez J, García-Berrocal A, Montalvo C, Balbás M. The coverage factor in a Flatten–Gaussian distribution. *Metrologia*, vol. 45 (2008), s. 503-506.
- [3] Dietrich C. F.: Uncertainty, Calibration and Probability. The Statistics of Scientific and Industrial Measurement. Second Edition 1991. The Adam Hilger Series on Measurement Science and Technology, s. 535.
- [4] Fotowicz P. Metody obliczania współczynnika rozszerzenia w oparciu o spłot rozkładu prostokątnego z normalnym. *PAK* nr 4 (2004), s. 13-16.
- [5] Fotowicz P. Wykorzystanie rozkładu płasko-normalnego przy obliczaniu niepewności pomiaru. *PAK*, nr 6 (2011), s. 595-598.
- [6] Dorozhovets. M. Doslidzhennya zastosuvannya zrazkovykh vybirok dlya otsinyuvannya rezultatu vymiryuvannya ta jeho standartnoyi nepevnosti. *Vidbir i obrobka inform.* Vyp. 28 (104), 2008.
- [7] Dorozhovets. M. Opracowanie wyników obserwacji bazujące na przybliżonej metodzie statystyk pozycyjnych. *Pomiary Automatyka, Kontrola*, nr 6, 2014, s. 391-394.
- [8] Dorozhovets M, Popovych I. Opratsyuvannya rezultativ sposterezhennya na osnovi nablyzhenoho metodu poryadkovykh statystyk. *Vymiryual'na tekhnika ta metrolohiya.* № 75, 2014, s. 8-12.
- [9] Kendal M.G., Stuart A. *The Advanced Theory of Statistics.* Charles Griffin & Co. Ltd. London, 1966.
- [10] Fisz M. *Probability Theory and Mathematical Statistics.* John Willey & Sons, London, 1963.

## PROCESSING OF THE OBSERVATIONS RESULTS WITH THE FLATTEN-GAUSSIAN DISTRIBUTION BY THE ORDER STATISTICS METHOD

### Summary

In the article the method based on order statistics for processing of the observations, which is the sum of observations with normal and uniform distributions, is proposed. This method gives a smaller standard uncertainty of the result compared to a standard uncertainty of a mean value. The efficiency of the method increases with the content of the uniform component. The implementation of the method does not require complicated calculations. The research results of method, which are the standard uncertainty depending on the relative content of components and the number of observations, are presented.

**Keywords:** uncertainty, method of order statistics, covariance matrix, Monte-Carlo method

DOI: 10.7862/re.2015.31

*Tekst złożono w redakcji:* maj 2015

*Przyjęto do druku:* wrzesień 2015

Veronika HERASYMENKO<sup>1</sup>  
Oleh SEHEDA<sup>2</sup>  
Bohdan STADNYK<sup>3</sup>

## THE FEATURES OF FLAME TEMPERATURE MEASUREMENT

The flame temperature measurement gives the understanding of combustion processes and is important for the temperature control systems. In this paper the review and analyze of the methods of flame temperature measurement are represented. Each of them is effective under certain condition. Nowadays the method of Raman-scattering is promising in this field. It pretends to avoid some of the errors in other existing techniques.

**Keywords:** Raman scattering, contact and non-contact methods, the issues of the measurement, Stokes line, anti-Stokes line.

### 1. Introduction

Approximately 30% of all measurements in research and industry are the temperature measurements, because of their role in understanding physical, chemical and biological processes. Flame temperature measurement is important for solving such problems, as research and optimization of combustion processes in metallurgical furnaces, internal combustion engines, reaction engine etc.

### 2. The issues of flame temperature measurement

In the range of high temperatures the accuracy and reliability of measurement results are strongly reduced. There are several reasons for this. First, the flame doesn't remain in the complete thermodynamic equilibrium. A large amount of energy is released during the process of burning. It is unevenly distributed on degrees of freedom of molecules. Therefore we can speak

---

<sup>1</sup> Corresponding author: Veronika Herasymenko, Lviv Polytechnic National University, Stefana Bandery 12, Lviv Oblast, Ukraine, 79000, herasymenkoveronika@gmail.com

<sup>2</sup> Oleh Sehed, Lviv Polytechnic National University, Stefana Bandery 12, Lviv Oblast, Ukraine, 79000

<sup>3</sup> Bohdan Stadnyk, Lviv Polytechnic National University, Stefana Bandery 12, Lviv Oblast, Ukraine, 79000

separately of three values of energy and temperatures, which correspond to the effective rotation, vibration and translation energies of the molecules. Second, the flame contains active substances such as free radicals OH and CH, which can react with any surface placed into the flame. The heat released during the reaction can heat the surface to a temperature higher than the temperature of the flame. Also a wide temperature range, temperature gradient and dynamics of combustion processes are typical for flame. Phenomenon of chemiluminescence is undesirable during the temperature measurement.

The presence of such amount of undesirable effects on measurement explains the existence of a number of different methods and measurement tools. Each of them is effective under certain condition. Thus, successful measurement of temperature depends on correct choice of measurement method. In this case “successful measurement” means a measurement with a high reliability of the results and their accuracy. The purpose of this work is therefore to review and analyze the use of existing temperature measurement methods to measure the flame temperature.

### **3. Review of basic existing methods for flame temperature measurement**

#### **3.1. Contact methods**

Contact devices, such as thermocouples, resistance thermometers and others, which are widely used to measure the temperature of solids, aren't effective in flame temperature measurement since most of them cannot withstand temperatures higher than 1500°C. Some thermocouples of refractory alloys are used in measurements up to 3000°C, but at such a high temperatures there are additional errors compared to the solids temperature measurement. These errors are caused by significant radiation losses, catalytic effect on combustion process, distortion of temperature field, device inertia and so on [1, 2]. To minimize the negative effect of these factors a use of thermocouple with the least size of junction and low emissivity of surface is recommended [1]. With the help of contact devices, for example thermocouple, the local temperature can be measured in the volume proportion to approximately ten diameters junction. For the temperature fields research a matrix of thermocouples must be used. This leads to measurement complication and increased costs, but in case of flame temperature measurement, allows to explore the temperature fields and increases the reliability of measurements. Among other advantages of this method the facility of use and reasonable price should be mentioned [3].

### 3.2 Non-contact methods

The advantages of non-contact methods of flame temperature measurement include the lack of influence on the object which temperature is measured, high accuracy and the possibility of use for a wide temperature range. The disadvantages include: problems of the point of measurement determination in a volume; measured value usually represents the mean temperature for several intervals; the equipment for optical temperature measurements is comparatively cumbersome, expensive and sensitive to thermal and mechanical damage.

Non-contact methods of flame temperature measurement are divided into active and passive. The passive methods incorporate:

- the brightness pyrometry method, two-colour pyrometric techniques;
- the inversion technique of spectral lines;
- the absorption and emission techniques;
- the method of absolute intensity of a spectral line;
- the method of relative intensity of spectral lines (Ornstein method).

The biggest disadvantage of pyrometric technique use is a necessity of emissivity or its change with the wavelength and its dependence of the flame thickness [4]. It is necessary to bring in the exemplary substances, for example, sodium, lithium or thallium etc. for the inversion technique of spectral lines. Additional sources of error come from the presence of solid particles in the flame: soot, liquid drops or solid crystals; light refraction on the boundary of flame etc. [5]. The absorption and emission techniques are used to study unstable flames and short processes [5]. The application of these methods must be preceded by spectral research of the object for detailed analysis of emitting properties of the medium.

Active methods are based on the object's irradiation by monochromatic light (laser) and analysis of the reflected signal. Those methods include:

- the interference method;
- the method of laser-induced fluorescence;
- the method of Raman-scattering [6,7];
- the acoustic method [6].

The equipment for these methods is more cumbersome and more expensive (because of the laser price) compared to the passive methods.

### 3.3 Raman scattering

Promising and popular in various fields (criminalistics, medicine, industry and others) is nowadays the Raman scattering spectroscopy. It's used to identify the chemical components or to investigate the intramolecular interactions.

The sample is illuminated with monochromatic light, usually with laser beam. Particles of light react with the molecules of the investigated sample. The

spectrum of the reflected radiation contains Rayleigh lines (on the laser wavelength) and unique spectral lines with the frequency shift: Stokes and anti-Stokes lines. If part of the energy excites the vibrations of molecules, the scattered radiation is shifted to a lower frequency than the frequency of the laser light (Stokes shift). If the molecule gives back the vibration energy, the scattered radiation is shifted to the higher frequency (anti-Stokes shift). The temperature ( $T$ ) is determined by the ratio of the intensities of Stokes ( $I_s$ ) and anti-Stokes components ( $I_{as}$ ) (1) [8]:

$$\frac{I_s}{I_{as}} = \left[ \frac{\nu_i - \nu_0}{\nu_i + \nu_0} \right]^4 \exp \frac{h c \nu_0}{k T} \quad (1)$$

where:  $\nu_i$  – laser frequency,  $\nu_0$  – Raman shift; ( $\nu_i = 1/\lambda_i, \nu_0 = 1/\lambda_0$ ),  
 $h$  – Plank constant,  
 $k$  – Boltzmann constant,  
 $c$  – speed of the light.

The temperature of the object  $T$  can be determined by the formula (2) [9]:

$$T = \frac{h c \nu_0}{k \ln I \frac{I_s}{I_{as}} - 4 k \ln \frac{\nu_i - \nu_0}{\nu_i + \nu_0}} \quad (2)$$

The main advantages of this method are the following: the facility in preparing the sample, a large volume of received information, a small spectrum distortion by the surrounding atmosphere and a weak Raman spectrum of glass, which is good for using the protective glasses.

#### 4. Conclusions

The represented list of the flame temperature measurement methods isn't exhaustive. And none of them is universal. Often the reliable measurement results require additional information, for example, emissivity, internal flame characteristics. There may be a need to bring in additional control substances or equipment that could substantially distort the flame temperature field. While choosing a measurement method it is necessary to consider the radiation spectrum of the flame, the measurement conditions and the temporal characteristics of combustion process. The existence of a large amount of measurement influences constrains to use at least two different methods. In this case a degree of a coincidence of measurement results can serve as a criterion of their reliability.

## Bibliography

- [1] Butler B.W., Shannon K.S.: A review of error associated with thermocouple temperature measurement in fire environments, 2nd International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress, 2003.
- [2] Gill W., Donaldson A.B., Lucero R.E., Yilmaz N.: Problems encountered in fluctuating flame temperature measurements by thermocouple, *Sensors*, 8, pp.7882-7893, 2008.
- [3] Teplinsky M.V., Yagodnikov D.A.: Digital processing and analysis of results visualization of fire tests of the model rocket solid-fuel engine, *Vestnik MHTU Baumana*, no.3, 2005, p.34-41.
- [4] Gutschwager B., Hartmann J., Hollandt J.: Strahlungsthermometrie – Temperaturen berührungslos messen, Auszug aus atp-Sonderheft 6/2006 Systeme und Lösungen zur berührungslosen Temperaturmessung, pp.1-14.
- [5] Gaydon A.G., Wolfhard H.G.: *Flames, their structure, radiation and temperature: (3rd edition)* London: Chapman and Hall Limited, 1970.
- [6] Meier W., Stopper U.: Experimental study of industrial gas turbine flames including quantification of pressure influence on flow field, fuel/air premixing and flame shape, *Combustion and Flame*, vol.160, no.10, 2013, p.2103-2118.
- [7] Atakan B., Hartlieb A.T., Kohse-Höinghaus K.: Temperature measurement in fuel-rich non-sooting low-pressure hydrocarbon flames, *Applied Physics B*, vol.70, no.3, 2000, pp.435-445.
- [8] Moore D.S., McGrane S.D.: *Raman temperature measurement*, IOP Science, 2014
- [9] Sehedá O., Stadnyk B., Yatsyshyn S.: Metrology of Temperature Transducer based on Raman Effect, *Sensors & Transducers Journal*, Vol. 177, Issue 6, June 2010, pp.78-84.

## CECHY POMIARU TEMPERATURY PŁOMIENIA

### Streszczenie

Pomiar temperatury płomienia pozwala zrozumieć procesy spalania i jest ważnym dla systemów kontroli temperatury. W artykule przedstawiona jest analiza metod pomiaru temperatury płomienia. Każda z nich jest skuteczna przy spełnieniu pewnych warunków. W tej dziedzinie metoda rozpraszania ramanowskiego jest obecnie obiecująca. Wspomniana metoda pozwala uniknąć niektórych błędów charakterystycznych dla innych technik

**Słowa kluczowe:** rozpraszanie ramanowskiego, metody kontaktowe i niekontaktowe, problemy pomiaru, pasma stokesowskie i antystokesowskie.

DOI: 10.7862/re.2015.32

*Tekst złożono w redakcji:* maj 2015

*Przyjęto do druku:* wrzesień 2015







Olha OLESKIV<sup>1</sup>  
Ihor MYKYTYN<sup>2</sup>

## METROLOGICAL VERIFICATION OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

This article presents the features of functioning the cyber-physical systems and their components. The possibility to connect measuring devices of electrical quantities, measuring devices of non-electrical quantities, and sensors with data interface to cyber-physical systems components is considered. The analysis opportunity of sensors possible accession to embedded system control is examined. The classification by the sensors output signal type is considered. On the basis of the sensors classification concluded that the cyber-physical systems is most expedient to use intelligent sensors. According to the results of the analysis of the cyber-physical system characteristics and components a multilevel remote metrological verification of cyber-physical systems is proposed. With the proposed algorithm the cyber-physical system components can be verified at the request of any component, subsystem or system as a whole. Also a person can initiate a metrological testing process, if there is suspicion of incorrect operation or its time for cyber-physical system routine verification.

**Keywords:** measuring instrument, software, metrological verification, cyber-physical system, embedded system control, intelligent sensor

### 1. Introduction

At present time informational technologies cover almost all spheres of human activity and they are the most important factor in innovation. Facilities with the embedded system control (ESC), which are combined with each other via global network, perform many new functions and actions that can partially or completely eliminate human from the process activity. Every year the real and virtual worlds are becoming closer to each other forming technical base of cyber-physical systems (CPS). CPS usually are complex systems which components may be located at great distance from one another.

---

<sup>1</sup> Corresponding author: Olha Oleskiv, Department of Information Measurement Technology, Lviv Polytechnic, Lukasha str. 5, Lviv, 79012, Ukraine, Tel.: +38-068-035-45-90, E-mail: olha.oleskiv@ukr.net

<sup>2</sup> Ihor Mykytyn, Department of Information Measurement Technology, Lviv Polytechnic, Stepan Bandera str. 12, Lviv, 79013, Ukraine, Tel.: +38-0322-44-17-56, E-mail: mykytynip@ukr.net

They combine information, software, electronic, optical, mechanical and other physical components that "communicate" via the Internet in real time [1, 2]. CPS performs processing of information and functions of monitoring and control equipment. CPS infrastructure mainly consists of subsystems, which electronic components are implemented through ESC [3] and get information about the environment through sensors and measuring device (MD) and can influence it through actuators (Fig. 1).

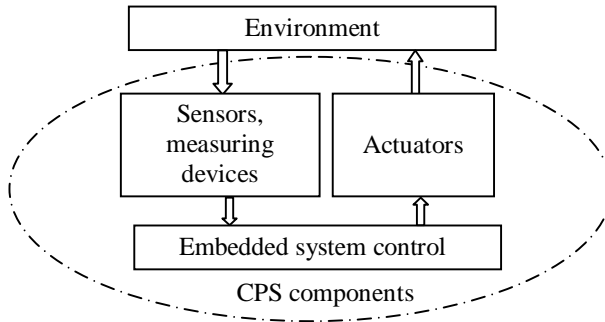


Fig. 1. Block diagram of CPS components

Rys. 1. Schemat blokowy komponentów CPS

With the widespread use of microprocessor and microcontroller technology the basic processing of measurement results such as averaging, approximation, filtering, interpolation, Fourier transform, etc. are implemented mainly by software.

If measuring information incorrectly displays the characteristics of the object of the environment (error measurement results exceed acceptable values), the effect of the actuators on the object may be incorrect. This can lead to incorrect functioning of CPS and undesirable consequences and sometimes can be dangerous to human life. Therefore, to ensure the proper functioning of CPS important components, the development of methods, techniques and remote metrological verification of sensors, measuring devices and software is important.

## 2. Analysis possibility of metrological verification of sensors and measuring devices of cyber-physical systems

Figure 2 shows the block diagram to connect measuring devices of electrical quantities, measuring devices of non-electrical quantities, and sensors with data interface to CPS components. For metrological verification of MD electrical quantities (voltmeters, ammeters, etc.) is necessary to submit

exemplary input signal. There are a number of exemplary means of voltage, current and frequency reproduction, etc. [4], which are small and can be integrated into the CPS. If the sensor is verified then the appropriate physical quantity of known value should be submitted for input. In most cases this requires complex and bulky equipment, for example, the verification of temperature sensor requires reference temperature points, high-precision thermostats and so on.

That's why the remote metrological verification of MD electrical quantities is much easier compared to sensors. Besides sensors metrological verification is not always possible verify remotely.

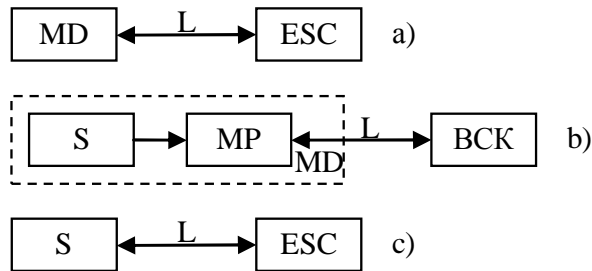


Fig. 2. Block diagrams of connection: a) MD electrical quantities, b) MD non-electrical quantities and c) sensors to CPS components, where MD - measuring device; L- link; ESC - embedded system control; S - sensor; MP - measuring part

Rys. 2. Schemat blokowy połączenia: a) MD wielkości elektrycznych, b) MD wielkości nieelektrycznych i c) czujniki do elementów CPS, gdzie MD - urządzenia pomiarowe; L- połączenie; ESC - wbudowany system sterowania; S - czujnik; MP - część pomiarowa

For remote verifying of software the cyber-physical systems are the best because they are connected to the Internet and access to them and to the software that serves them are available. It is only necessary to provide a software service that allows starting the review process.

On the other hand the analysis opportunity of sensors possible accession to ESC is interesting, which made it possible to significantly simplify measurement of CPS. Classification by the sensors output signal type: analog sensors; digital sensors; binary sensors; impulsive sensors, intellectual sensors.

The output signal of analog sensors is a continuous physical quantity (preferably electric). The advantage of analog sensors is the simplicity of their implementation. The disadvantage is that the connection of such sensors to the measuring system must use additional measuring equipment [4].

Digital, binary and impulse sensors can be directly connected to ESC if they have a digital and frequency input. Intelligent sensors easily connected to ESC using industrial networking protocols Profibus, Foundation Fieldbus and others.

Intelligent sensors (IS) have a number of properties that significantly distinguish them from other types of sensors. They can automatically choose measuring range, carry out algorithmic correction of the measurement results, operate in a dialogue with the central control system, take decisions, transfer measurement results in digital form, as well as alarms and others. IS can conduct self-tuning, self-testing and self-examination [5, 6].

IS performing necessary conversion of measurement data and mathematical processing of measurement results. Therefore, the use of IS enables to release ESC from storage and processing of a large number of intermediate data. Given the above information allows considering the optimal use of IS in CPS.

### 3. Multilevel metrological verification of cyber-physical systems

Metrological verification of CPS is a fairly complicated procedure, given the fact that cyber-physical components combined into one system for pursuing a particular task and can be located in any corner of the globe. Taking into consideration such a specificity of CPS as "measuring device" the multilevel metrological verification of CPS is proposed. Metrological verification of CPS should occur at all stages of operation starting with verification of sensors by controlling components of CPS, self-testing of intelligent sensors and finishing with a total test of CPS which is given by the controlling person, if there are doubts about the correctness or CPS functioning or its time for CPS routine verification. Based on the analysis the multi-process verification of CPS is proposed (Fig. 3).

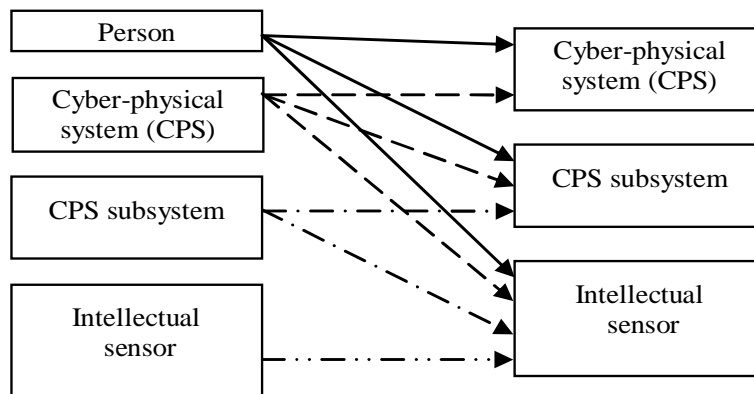


Fig. 3. Multilevel metrological verification of CPS

Rys. 3. Wielopoziomowa weryfikacja metrologiczna CPS

Metrological verification of CPS takes place at all levels: system; subsystem; intelligent sensors. At the system level initiation metrological verification is run by the system itself. If metrological verification of lower level elements(subsystems, intelligent sensors) is performed at the same time , it will be suspended, because the priority belongs to the system level. If the metrological verification of CPS error is not detected, the system will conduct further work as usual until the next verification. If the verification errors are found, the CPS will try to correct them. In case of a successful error correction CPS will continue its work in a normal mode. Otherwise, the information about place and time of error will be transferred to the user interface. CPS will turn on safe mode and staff will take care of correcting errors. After that CPS will be restored in a normal mode.

CPS subsystem controls and distributes tasks between ISs and actuators. Initiating verification subsystem can take place in CPS or subsystem. If the metrological verification of lower level elements (intelligent sensors), is being performed it will be suspended. If the verification has already started there is no need to perform another one. Initiation of metrological verification of ISs can take place in CPS, subsystem or ISs itself. The staff will be involved in verifying CPS elements only when CPS can not correct the errors encountered during the inspection. In other cases, the metrological verification will be performed automatically.

#### **4. Conclusions**

On the basis of the sensors classification concluded that CPS is most expedient to use intelligent sensors as they do not require the use of additional measuring devices; they are able to conduct basic processing of measurement results, self-tuning and self-diagnostics, they work with a variety of data interfaces and etc. IS can conduct periodic metrological verification of its sensors using the built extent of physical quantities.

The software verification of CPS can be implemented remotely, as CPS is connected to the Internet. It is only necessary to provide a software service that allows starting the review process.

According to the results of the analysis of CPS characteristics and components a multi remote metrological verification of CPS is proposed. With the proposed algorithm the CPS components can be verified at the request of any component, subsystem or system as a whole. Also a person can initiate a metrological testing process, if there is suspicion of incorrect operation or its time for CPS routine verification.

## Bibliography

- [1] Jiafu Wan, Hehua Yan, Hui Suo, Fang Li, Advances in Cyber-Physical Systems Research, KSII Transactions On Internet And Information Systems, vol. 5, no. 11, November 2011. – pp. 1891-1908.
- [2] Alvaro A. Cardenas, Ricardo Moreno, Cyber-Physical Systems Security for the Smart Grid, [http://csrc.nist.gov/news\\_events/cps-workshop/cps-workshop\\_abstract-8\\_cardenas.pdf](http://csrc.nist.gov/news_events/cps-workshop/cps-workshop_abstract-8_cardenas.pdf)
- [3] Catsoulis J. Designing embedded hardware.– O'Reilly, 2005, pp. 26-29.
- [4] E. Polishchuk, et al., Metrology and Measurement Means, Beskyd-Bit, Lviv, 2003 (In Ukrainian)
- [5] Gerard C.M. Meijer, Smart sensor systems, WILEY, 2008, ([http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9780470866924\\_sample\\_383509.pdf](http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9780470866924_sample_383509.pdf)).
- [6] Ajay Mahajan, Christopher Oesch, Haricharan Padmanaban, Lucas Utterback, Sanjeevi Chitikeshi, Fernando Figueroa. Physical and Virtual Intelligent Sensors for Integrated Health Management Systems /International journal on smart sensing and intelligent systems, Vol. 5, No. 3, September 2012. – pp. 559-575.

## METROLOGICZNA WERYFIKACJA SYSTEMÓW CYBER-FIZYCZNYCH

### Streszczenie

W artykule opisano specyfikę systemów cyber-fizycznych i ich komponentów. Przedstawiono schemat blokowy, łączący przyrząd pomiarowy wielkości elektrycznych, przyrząd pomiarowy wielkości nieelektrycznych oraz czujniki z interfejsem danych z systemem cyber-fizycznym. Przedstawiono klasyfikację systemów według typu sygnału wyjściowego czujników. Na podstawie klasyfikacji czujników autorzy doszli do wniosku, że systemy cyber-fizyczne najlepiej współpracują z czujnikami inteligentnymi. Biorąc pod uwagę wyniki analizy cech systemów cyber-fizycznych i ich komponentów, zaproponowano wielopoziomą weryfikację metrologiczną tych systemów. Zgodnie z proponowanym algorytmem elementy systemów cyber-fizycznych mogą być weryfikowane na wniosek jakiegokolwiek komponentu, podsystemu lub systemu jako całości. Również człowiek może zainicjować proces testowania metrologicznego, jeśli istnieje podejrzenie nieprawidłowej pracy lub nadszedł okres rutynowej kontroli systemów cyber-fizycznych.

**Słowa kluczowe:** przyrząd pomiarowy, oprogramowanie, kontrola metrologiczna, system cyber-fizyczny, wbudowany system sterowania, czujnik inteligentny.

DOI: 10.7862/re.2015.33

*Tekst złożono w redakcji:* maj 2015

*Przyjęto do druku:* wrzesień 2015

## Informacje dodatkowe

1. Lista recenzentów współpracujących będzie opublikowana w numerze 292 Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej, Elektrotechnika z. 34 (4/2015) oraz zamieszczona na stronie internetowej:  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika/>
2. Zasady recenzowania są udostępnione na stronie internetowej:  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/zasady-recenzowania/>
3. Informacje dla autorów artykułów są udostępnione na stronie internetowej:  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/informacje-dla-autorow/>
4. Formularz recenzji jest udostępniony na stronie internetowej:  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika/>
5. Instrukcja dla autorów omawiająca szczegółowo strukturę artykułu, jego układ, sposób przygotowywania materiału ilustracyjnego i piśmiennictwa jest zamieszczona na stronach internetowych:  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/instrukcja-dla-autorow/>  
oraz  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika/>  
w zakładce „Instrukcja dla autorów”.
6. Dane kontaktowe do redakcji czasopisma, adresy pocztowe i e-mail do przesłania artykułów oraz dane kontaktowe do wydawcy są podane na stronie internetowej (Komitet Redakcyjny):  
<http://oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika/>