

# NEURONOWY STEROWNIK DO DEZYNFEKCJI TULEI PAPIEROWYCH PROMIENIAMI UV-C

Grzegorz KŁOSOWSKI, Tomasz RYMARCZYK

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano koncepcję nowego rozwiązania w zakresie możliwości wykorzystania technologii naświetlania tulei papierowych promieniami UV o właściwościach bakterioobójczych, opracowanego w celu uzyskania znacząco ulepszanego wyrobu pozbawionego zanieczyszczeń mikrobiologicznych, pod kątem zastosowań w branży spożywczej. Do budowy sterownika wykorzystano sztuczne sieci neuronowe.

**Słowa kluczowe:** sterowanie, modelowanie, predykcja, sztuczne sieci neuronowe

## 1. Wprowadzenie

Istnieją dziedziny życia, w których szczególne znaczenie przywiązuje się do zagadnień związanych z czystością i aseptycznością. W pierwszej kolejności, do tego rodzaju dziedzin zaliczyć należy ochronę zdrowia i przetwórstwo żywności, jednak spektrum zastosowań metod zapewniających sterylność jest o wiele większe [1].

W niniejszym artykule zaprezentowano przykład zastosowania promieniowania ultrafioletowego do dezynfekcji tulei papierowych. Tuleje papierowe znajdują zastosowanie między innymi do nawijania papierów higienicznych, ale także folii spożywczej czy papieru śniadaniowego. Są także wykorzystywane jako cylindryczne opakowania na chipsy, cukierki i inne produkty spożywcze. Fakt ten determinuje potrzebę przeprowadzenia badań nad nową technologią dezynfekowania tulei (rur) papierowych, mającą na celu uzyskanie znacząco ulepszanego wyrobu (tulei papierowych) pozbawionego zanieczyszczeń mikrobiologicznych.

Do znanych sposobów dezynfekcji należą metody: termiczne, fizyczne, chemiczne i fizyko-chemiczne [2]. Ponieważ tuleje wykonywane są z papieru lub tektury, termiczne i chemiczne metody dezynfekcji nie mają do nich zastosowania. Zarówno wysoka temperatura jak płynne środki chemiczne naraziłyby tuleje na uszkodzenia. W tej sytuacji pozostają metody fizyczne, czyli para wodna i promieniowanie ultrafioletowe. Para wodna nie nadaje się także do dezynfekcji papieru i tektury, więc dalsze rozważania będą dotyczyć promieni UV.

Metody dezynfekcji przy pomocy promieni ultrafioletowych są powszechnie stosowane w następujących obszarach:

- szpitale (bloki operacyjne, gabinety zabiegowe, gabinety opatrunkowe, sale chorych, izby przyjęć, izolatki, brudowniki [3, 4],
- przychodnie (gabinety lekarskie i zabiegowe),
- laboratoria [5],
- apteki,
- przemysł farmaceutyczny, spożywczo-przetwórczy, kosmetyczny [6],
- hotelarstwo i gastronomia.

Promieniowanie ultrafioletowe UV należy do falowego promieniowania elektromagnetycznego, podobnie jak promieniowanie rentgenowskie, fale radiowe czy światło. Dla praktycznego zastosowania spektrum promieniowania UV zostało podzielone na trzy grupy:

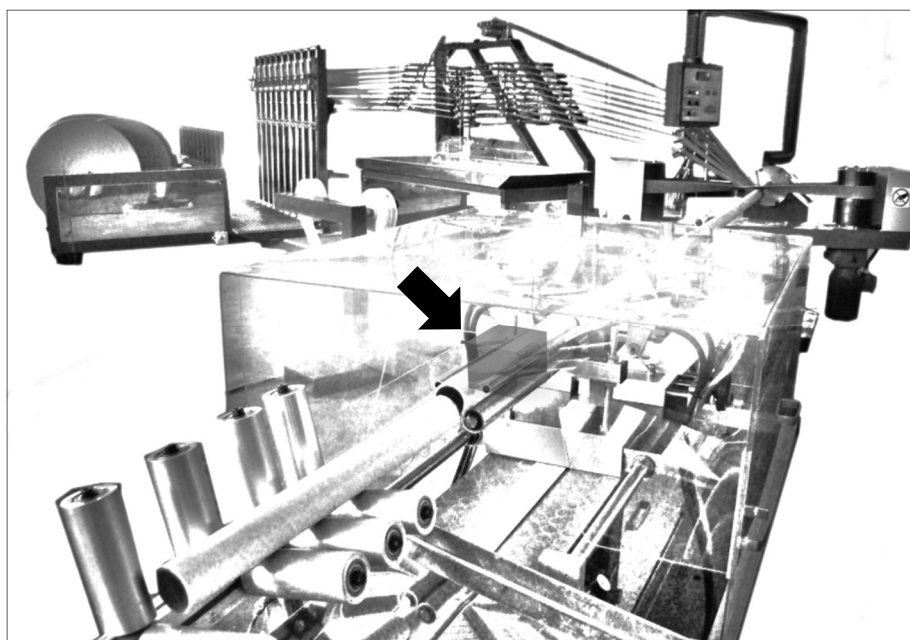
- UV-A - długofalowe 400 nm - 315 nm
- UV-B - średniofalowe 315 nm - 280 nm
- UV-C - krótkofalowe 280 nm - 100 nm

Promieniowanie grupy UV-A występuje w promieniach słońca i odpowiada za procesy fotochemiczne oraz pigmentaryzacyjne. Efekt erytemalny jest tu znikomy. Promieniowanie grupy UV-B znalazło podstawowe zastosowanie w terapiach. Ten rodzaj promieniowania wytwarza prowitaminę D, a także generuje efekt pigmentaryzacji i erytemalny (oparzenia skóry). Promieniowanie grupy UV-C posiada mocny efekt bakterio- i zarodkobójczy [7]. Powoduje oparzenia skóry i zapalenie spojówek (efekt koniunktywalny).

W niniejszym opracowaniu zaprezentowano koncepcję urządzenia, które w oparciu o sterowanie sieciami neuronowymi dynamicznie steruje procesem dezynfekcji tulei papierowych promieniami UV-C w trakcie ich wytwarzania [8].

## 2. Przedmiot badań

Przedmiotem badań jest maszyna technologiczna typu tulejarka, wyposażona w urządzenie umożliwiające efektywne i optymalne eliminowanie bakterii i drobnoustrojów z powierzchni produkowanych rur papierowych (rys. 1).



Rys. 1. Widok tulejarki z zamontowanym urządzeniem dezynfekującym tuleje  
Źródło: opracowanie własne

Tuleje papierowe wykonuje się na specjalnych maszynach zwanych tulejarkami. Aby zapewnić likwidację min. 85% drobnoustrojów z produkowanej tulei, na tulejarce zamontowane będzie urządzenie dezynfekujące, zawierające między innymi lampy bakteriobójcze emitujące promieniowanie UV-C. Zadaniem urządzenia jest wyeliminowanie większości drobnoustrojów z produkowanych tulei. Lampy UV-C montowane będą przed zespołem odcinającym tulejarki.

Celem badań było opracowanie uniwersalnego i adaptacyjnego urządzenia dezynfekującego tuleje promieniami UV-C, które można będzie montować na tulejarkach różnego rodzaju, wytwarzających rury papierowe o różnych średnicach i grubościach ścianek.

Adaptacyjność sterowanego urządzenia dezynfekującego jest konieczna z uwagi na płynne zmiany parametrów pracy tulejarki. Problemem sterowania polega na odpowiednim doborze następujących, powiązanych ze sobą parametrów procesu:

1. Prędkość kąтова tulei
2. Prędkość liniowa tulei
3. Odległość lamp (palników) UV-C od powierzchni tulei
4. Ilość jednocześnie świecących lamp UV-C w urządzeniu
5. Stopień zużycia lamp UV-C
6. Moc lamp UV-C.

Prędkość obrotowa i liniowa wytwarzanej tulei zależy od wielu czynników, w tym np. od rodzaju i jakości użytego papieru, kleju, temperatury otoczenia, wilgotności powietrza itd., stąd dwa pierwsze z powyższych parametrów mogą się dynamicznie zmieniać w trakcie procesu.

Parametry 3-6 z powyższego zestawienia powinny być dobrane tak, aby zapewnić destrukcję drobnoustrojów na poziomie minimum 85%, a jednocześnie optymalizować zużycie energii elektrycznej, zużycie palników UV oraz nie narażać otoczenia na działanie promieni UV poprzez nadmierną (zbędną) emisję promieniowania UV. Promieniowanie UV-C może mieć niekorzystny wpływ na zdrowie człowieka nawet poprzez napromieniowanie powietrza, stąd nie należy wykorzystywać palników w sposób nadmiarowy [9].

Zakłada się, że urządzenie będzie wyposażone w dwie lub więcej lamp UV, które będą włączane razem lub pojedynczo – w zależności od dwóch pierwszych parametrów procesu.

### **3. Opis badań**

Jak już wcześniej wspomniano, celem badań było opracowanie urządzenia zdolnego do eliminacji co najmniej 85% bakterii z powierzchni obracającej się tulei. Skuteczność eliminacji drobnoustrojów zależy od dwóch czynników: czasu naświetlania i natężenia promieniowania UV-C.

Aby opracować skuteczny sterownik dopasowujący natężenie promieniowania do szybkości obrotowej i kątovej (a tym samym czasu ekspozycji) tulei należało najpierw ustalić charakterystykę emisji palnika bakteriobójczego w zależności od odległości od powierzchni odkażanej.

Do badań użyto lampy bakteriobójczej bezpośredniego działania NBV 30 PL z licznikiem czasu pracy bez wyświetlacza (rys. 2). Dane techniczne urządzenia były następujące:

- napięcie zasilania: 230 V 50 Hz

- pobór mocy: 40 VA
- element emitujący promieniowanie UV-C: 1x30W
- trwałość promiennika : 8000 h
- klasa zabezpieczenia ppor.: I
- typ obudowy : IP 20
- rodzaj pracy: ciągła
- wymiary kopuły: 925 x 85 x 135 mm
- masa kopuły: 3 kg



Rys. 2. Lamp bakteriobójcza bezpośredniego działania NBV 30 PL

Do pomiarów użyto miernika natężenia napromienienia bakteriobójczego UVB-20 (rys. 3). Urządzenie posiada świadectwo typu nadane przez Główny Urząd Miar. Miernik napromienienia bakteriobójczego spełnia normy:

- PN 79/T 06588 "Promieniowanie nadfioletowe. Nazwy, określenia, jednostki."
- PN 79/T 06590 "Mierniki promieniowania nadfioletowego."

Przeznaczony jest do pomiaru natężenia napromienienia bakteriobójczego w zakresie  $0,1 \text{ mW/m}^2 \div 19,99 \text{ W/m}^2$ . Szczególnie użyteczny jest przy badaniu emisji palników bakteriobójczych i określania stopnia ich zużycia.

Czułość spektralna sondy pomiarowej miernika skorygowana jest do względnej skuteczności bakteriobójczej wg PN 79 / T 06588: "Promieniowanie nadfioletowe. Nazwy, określenia, jednostki."

Odczyt wartości mierzonej dokonywany jest na wyświetlaczu ciekłokrystalicznym bezpośrednio w  $\text{mW/m}^2$  lub  $\text{W/m}^2$ .

Parametry techniczne miernika:

- zakresy pomiarowe:  $0,1 \div 199,9 \text{ mW/m}^2$ ;  $1 \div 1999 \text{ mW/m}^2$ ;  $0,01 \div 19,99 \text{ Wm}^2$
- błąd podstawowy miernika dla źródła rtęciowego UV-standard:  $< 5\%$
- wymiary gabarytowe: 150 x 80 x 30 mm
- zakres temperatury pracy:  $10 \div 40^\circ\text{C}$



Rys. 3. Miernik napromienienia bakteriobójczego UVB-20

Tab. 1. Dawki promieniowania UV-C potrzebne do zabicia wybranych drobnoustrojów

| Rodzaje drobnoustrojów | Dawka energii promieniowania ultrafioletowego UV-C w $[\text{mWs/cm}^2]$ potrzebna do procentowej likwidacji drobnoustrojów |            |
|------------------------|---|------------|
| <b>Bakterie</b>        | <b>90%</b>  | <b>99%</b> |
| Escherichia coli       | 3,00  | 6,60       |
| Salmonella enteritidis | 4,00  | 7,60       |
| <b>Pleśnie</b>         | <b>90%</b>  | <b>99%</b> |
| Aspergillus flavus     | 60,00   | 99,00      |
| Mucor racemosus B      | 17,00   | 35,20      |
| Penicillium expansum   | 13,00   | 22,00      |
| Rhizopus nigricans     | 11,10   | 22,00      |
| <b>Pierwotniaki</b>    | <b>90%</b>  | <b>99%</b> |
| Chlorella Vulgaris     | 13,00   | 22,00      |

|                            |            |            |
|----------------------------|------------|------------|
| Nematode Eggs              | 45,00      | 92,00      |
| Paramecium                 | 11,00      | 20,00      |
| <b>Wirusy</b>              | <b>90%</b> | <b>99%</b> |
| Bacteriophage - E. Coli    | 2,60       | 6,60       |
| Poliovirus - Poliomyelitis | 3,15       | 6,60       |
| <b>Drożdże</b>             | <b>90%</b> | <b>99%</b> |
| Brewers yeast              | 3,30       | 6,60       |
| Common yeast cake          | 6,00       | 13,20      |
| Saccharomyces carevisiae   | 6,00       | 13,20      |

Źródło: <http://www.americanairandwater.com/uv-facts/uv-dosage.htm> - dostęp 5.01.2018

### 3.1. Pomiary natężenia UV-C w zależności od odległości od powierzchni naświetlanej

Wynikiem pomiaru dokonanego miernikiem natężenia napromienienia bakteriobójczego była gęstość powierzchniowa strumienia energetycznego promieniowania [mW/cm<sup>2</sup>] oszacowanego według biologicznej skuteczności niszczenia drobnoustrojów. Zmierzona wartość określa natężenie napromienienia destrukcyjnie wpływającego na drobnoustroje, niezależnie od rozkładu widmowego użytego promiennika UV. Aby określić czas ekspozycji mikroorganizmów na napromienianej płaszczyźnie, należało podzielić wymagane napromienienie (gęstość powierzchniową dawki) podaną w tabeli 1 przez zmierzona wartość natężenia podaną na rysunku 4. Dotyczy to jednak tylko płaszczyzny pomiarowej o równomiernym rozkładzie gęstości strumienia energetycznego bez uwzględnienia drobnoustrojów znajdujących się w ciągłym ruchu wraz z powietrzem.

Aby uzyskać realną wartość natężenia promieniowania na powierzchni obrotowego walca (odkazanej tulei), należy uwzględnić takie czynniki jak: ilość źródeł promieniowania UVC, tłumienie wynikające z odbicia promieni w lustrach, krzywiznę walca. Poniższa formuła (1) określa sposób wyliczania natężenia promieniowania UV-C w obudowie lustrzanej o kształcie kwadratu [10] przedstawionej na rysunku 5.

$$F_h = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{X}{\sqrt{1+X^2}} ATAN \left( \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} ATAN \left( \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right] \quad (1)$$

gdzie: X – wysokość/x; Y – długość/x; x – prostopadła odległość od ściany lustra.

Zakładając, że:

$\vartheta$  – współczynnik tłumienia lustra. Przyjęto  $\vartheta = 0,75$

$\lambda$  – współczynnik osłabienia natężenia promieniowania wynikający z walcowego kształtu powierzchni naświetlanej. Przyjęto  $\lambda = 0,8$

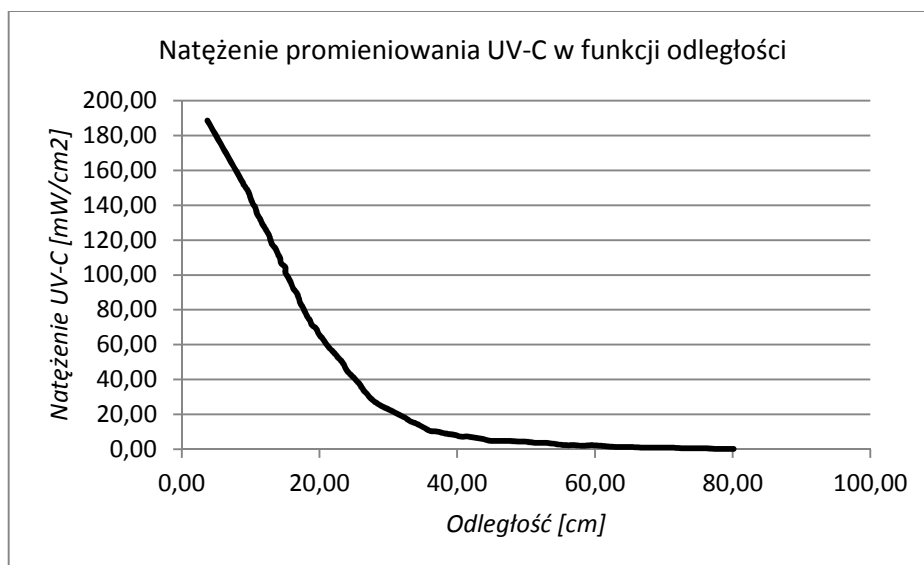
x – odległość powierzchni tulei od palnika UV

otrzymujemy:

$$F = \frac{F_1 + F_2}{2} \quad - \text{ natężenie promieniowania UVC dla całej powierzchni tulei}$$

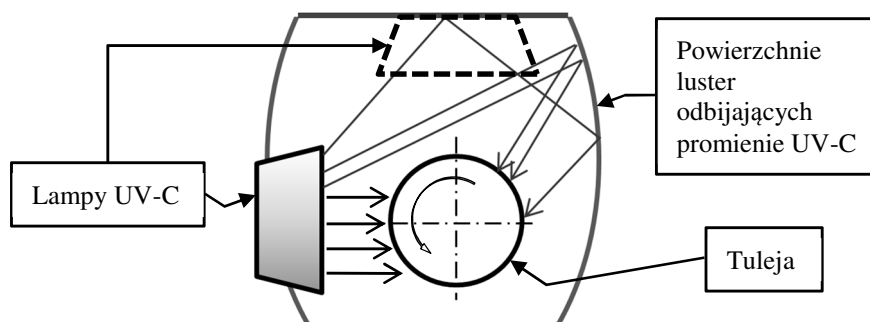
$$F_1 = \lambda x \quad - \text{ natężenie promieniowania UVC na połowie tulei od strony palnika}$$

$$F_2 = \vartheta F_1 = \vartheta \lambda x \quad - \text{ natężenie promieniowania UVC na połowie tulei po przeciwnej stronie palnika}$$



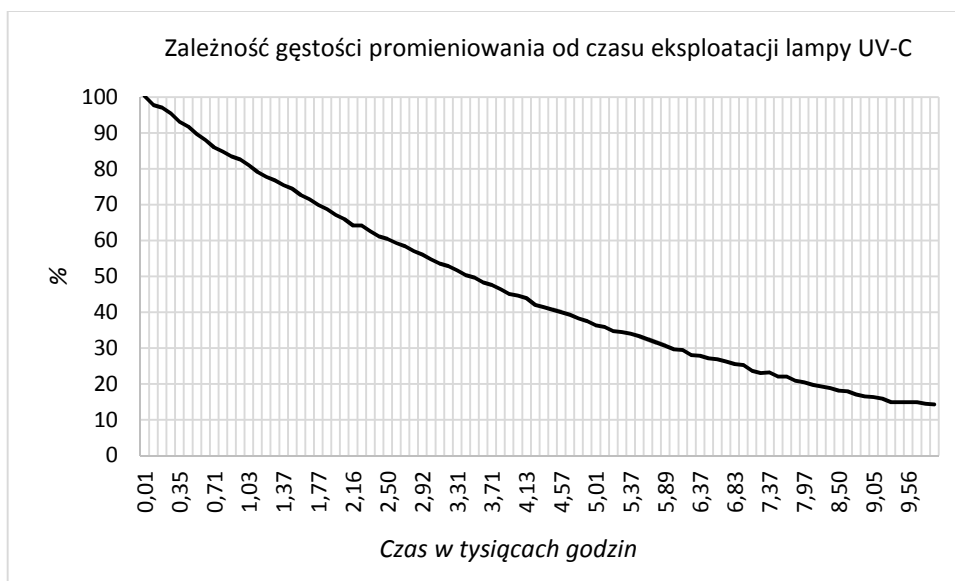
Rys. 4. Charakterystyka emisji palnika bakteriobójczego w zależności od odległości od powierzchni odkażanej  
Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 5 przedstawiono schemat urządzenia do dezynfekcji tulei promieniami UV-C.



Rys. 5. Schemat urządzenia w układzie Lampy UVC – Obudowa lustrzana – Tuleja  
Źródło: opracowanie własne

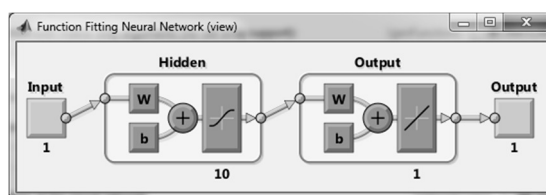
Na rysunku 6 przedstawiono zależność wydajności (gęstości mocy) promiennika UV-C od czasu jego eksploatacji. Jak widać - lampa wyglądająca na sprawną przy ocenie wzrokowej (emisja w zakresie widzialnym), może już niemal całkowicie utracić zdolność radiacji w zakresie ultrafioletu.



Rys. 6. Zależność gęstości mocy promieniowania lampy bakteriobójczej od czasu eksploatacji  
Źródło: dane producenta

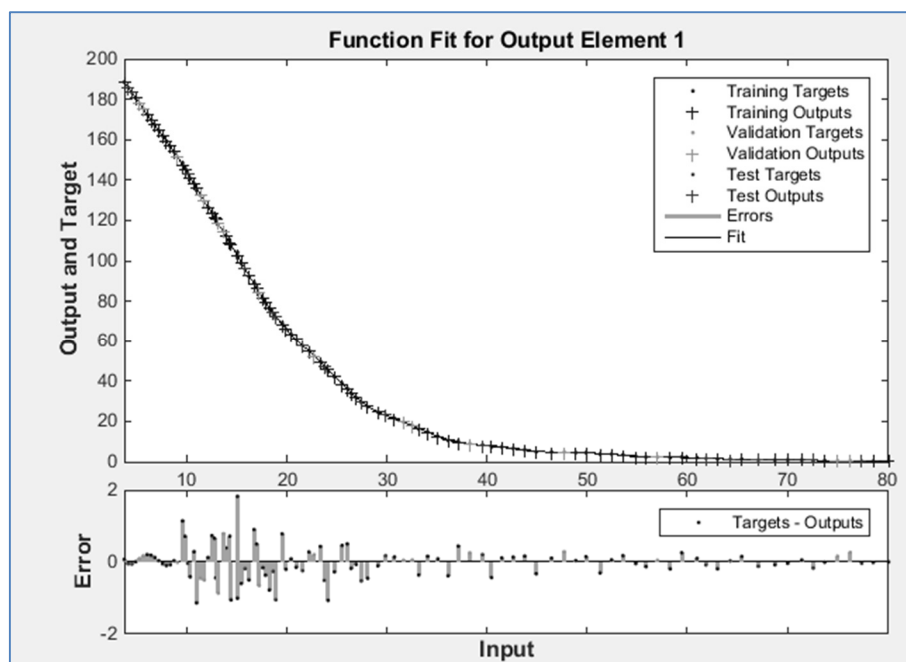
#### 4. Modelowanie sztucznej sieci neuronowej w celu predykcji natężenia promieniowania UV-C w zależności od odległości

W wyniku przeprowadzenia serii pomiarów uzyskano informacje zawarte w charakterystyce przedstawionej za pomocą rysunku 4. W oparciu o te dane opracowano model sieci neuronowej w postaci perceptronu wielowarstwowego, którego celem była predykcja natężenia promieniowania UV-C w funkcji odległości. Na rysunku 7 zaprezentowano schemat sieci neuronowej z jednym wejściem, dziesięcioma neuronami w warstwie ukrytej i jednym neuronem wyjściowym. Wejściem jest odległość lampy od powierzchni tulei, wyjściem - natężenie promieniowania UV-C.



Rys. 7. Schemat sieci neuronowej  
Źródło: badania własne

Na rysunku 8 przedstawiono wykres przebiegu procesu uczenia sieci neuronowej. Widać, że początkowo duży błąd został zredukowany w trakcie procesu uczenia, by ostatecznie osiągnąć wartości bliskie zeru.



Rys. 8. Przebieg procesu uczenia sieci neuronowej – wykres błędu bezwzględnego  
Źródło: badania własne

## 5. Modelowanie sztucznej sieci neuronowej do predykcji spadku natężenia promieniowania UV-C w zależności od stopnia zużycia palnika

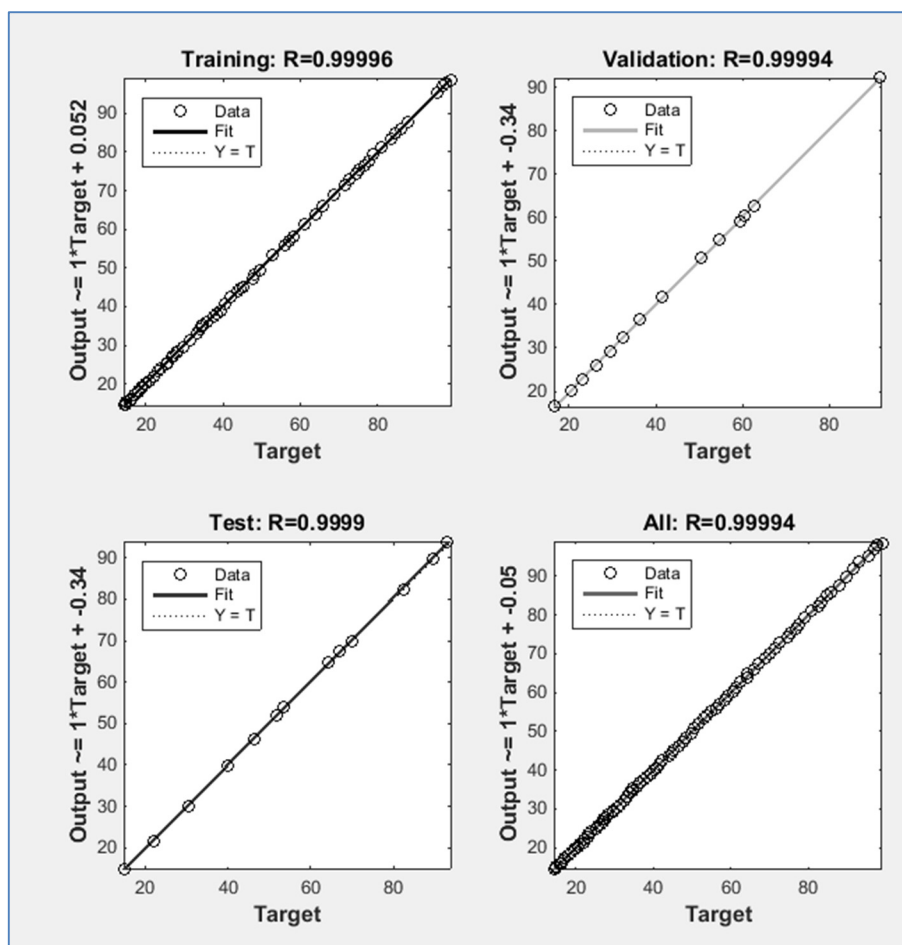
W oparciu o zależność gęstości mocy promieniowania lampy bakteriobójczej od czasu eksploatacji (rys. 6) opracowano model sieci neuronowej w postaci perceptronu wielowarstwowego, którego celem jest predykcja współczynnika spadku natężenia promieniowania UV-C w funkcji czasu użytkowania palnika. Schemat sieci neuronowej jest analogiczny jak na rysunku 7. Jest to sieć z jednym wejściem, dziesięcioma neuronami w warstwie ukrytej i jednym neuronem wyjściowym. Wejściem jest wiek (zużycie) lampy, wyjściem - natężenie promieniowania UV-C.

Na rysunku 9 widzimy wykresy regresji dla procesów uczenia, walidacji i testowania. Jak widać, regresja jest bliska wartości jeden, co świadczy o wysokiej korelacji między wynikami a wzorcami, a tym samym o dobrej skuteczności sieci neuronowej.

## 6. Eksperymenty symulacyjne

System predykcyjny ma 3 wejścia: prędkość liniową tulei [cm/s], dystans lampy UV-C od powierzchni tulei [cm] i zużycie lampy [h]. System przelicza prędkość liniową na czas naświetlania. Dystans lampa-tuleja sieć neuronowa zamienia na wartość natężenia promieniowania UV-C. Zużycie lampy, inna sieć neuronowa przekształca na współczynnik osłabienia natężenia promieniowania. Te wszystkie informacje trafiają do modułu, który przelicza je na jeden wskaźnik dawki promieniowania [ $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ]=[ $\text{mWs}/\text{cm}^2$ ]. Jest nim liczba rzeczywiŃta. Jeśli wskaźnik jest większy od 1 wtedy cel, jakim jest eliminacja drobnoustrojów w założonej procentowo ilości, zostaje osiągnięty.



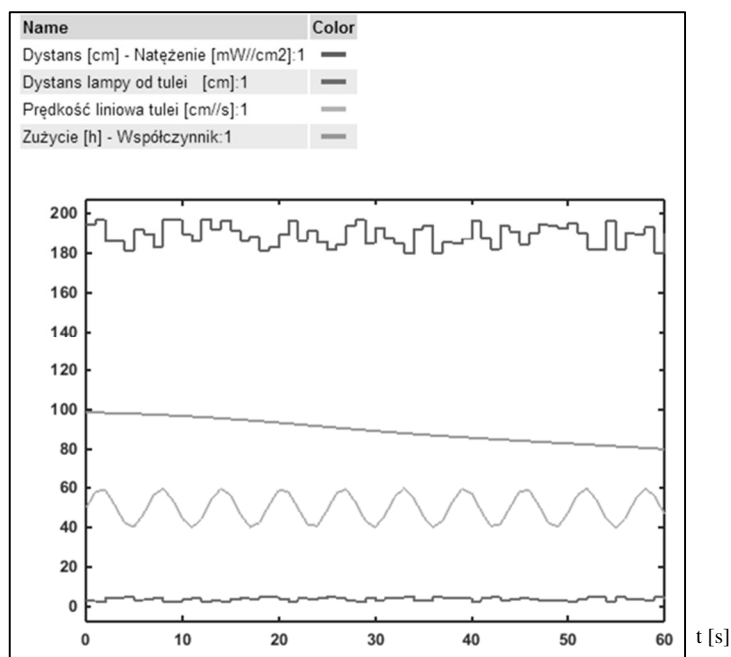


Rys. 9. Regresja dla procesów uczenia, walidacji i testowania  
Źródło: badania własne

W celu ostatecznej walidacji opracowanych sterowników przeprowadzono eksperymenty symulacyjne.

Założenia eksperymentu:

| L.p. | Parametr  | Wartość                           |
|------|---|-----------------------------------|
| 1.   | Czas symulacji [s]                              | 60 jednostek czasu [s]            |
| 2.   | Prędkość liniowa tulei [cm/s]                   | 50 +/-10 (Bias: 50, Amplituda 10) |
| 3.   | Dystans lampy od tulei [cm]                     | losowo; od 2 do 5                 |
| 4.   | Zużycie lampy UV-C; 1sek. = 160h                | od 0 do 9600 godzin               |
| 5.   | Zakładana dawka letalna w mWs/cm <sup>2</sup> ; | D = 140;                          |
| 6.   | Ilość lamp                                      | 1                                 |



Rys. 10. Wykres zmian parametrów w trakcie symulacji  
Źródło: badania własne

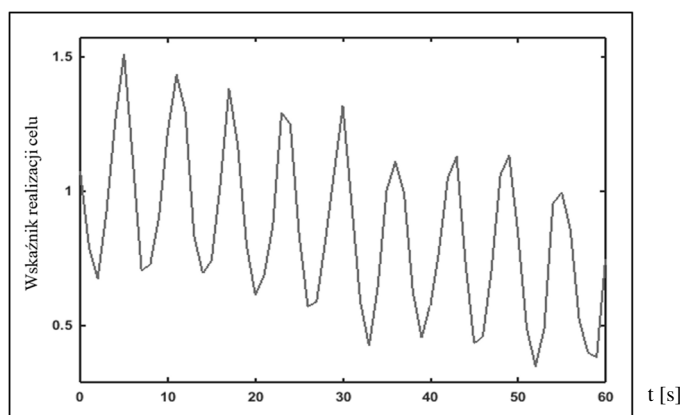
Rysunek 10 prezentuje przebiegi wartości natężenia promieniowania UV-C na powierzchni tulei [mW/cm<sup>2</sup>], dystans lampy od tulei [cm], prędkość liniową tulei [cm/s] i współczynnik zużycia palnika UV-C. Wszystkie wartości zostały zaprogramowane w taki sposób aby zmieniały się w określonych granicach i przebiegach, w trakcie symulacji. Czas symulacji ustawiono na 60 sekund, jednak z uwagi na zastosowanie współczynnika zużycia palnika, każda sekunda oznacza tu 160h pracy lampy. W ten sposób po 60 sekundach, symulowane zużycie lampy wynosi 9600 godzin, czyli ponad rok. Pierwszy od góry przebieg prezentuje natężenie promieniowania w czasie procesu.

Z rysunek 11 wynika, że zaproponowane w eksperymencie nr 2 działania zapobiegawcze odniosły skutek. Wskaźnik realizacji celu dezynfekcji fluktuował, jednak nigdy nie spadł poniżej zera. Oznacza to, że założone parametry w określonym okresie użytkowania lampy były prawidłowe, a palnik UV-C spełniał swoje zadanie. Powyższe wyniki potwierdzają skuteczność opracowanego sterownika.

#### 4. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano koncepcję neuronowego sterownika urządzenia do dezynfekcji tulei papierowych promieniami ultrafioletowymi UV-C.

Rozwiązania sprzętowe w zakresie układu naświetlania tulei promieniami UV-C zostaną zintegrowane z podstawowym narzędziem do produkcji tulei tekturowych – tzw. tulejarką. Po przeprowadzeniu spiralnego/równoległego zawijania wielu wstęp papieru na trzpień w procesie produkcji powstaje tuleja, która w tym miejscu będzie poddawana naświetlaniu. Lampy montowane będą przed zespołem odcinającym tulejarki, a za ich działanie



Rys. 11. Wykres zmian wartości wskaźnika realizacji celu  
Źródło: badania własne

odpowiadać będzie, opracowany w ramach opisanych badań, sterownik sprzężony w układzie: maszyna - sterownik - lampy.

Opracowany sterownik może zostać wdrożony w formie oprogramowania na komputerze PC lub innych platformach programistycznych typu Open Hardware (np. Arduino, Raspberry Pi itd.). Jest to opcja ekonomiczna i elastyczna (funkcjonalność sterownika można zmieniać zależnie od potrzeb i możliwości finansowych). Implementacja algorytmu sterowania w formie oprogramowania daje możliwość wdrożenia sterownika w już istniejącym w przedsiębiorstwie układzie sterowania, minimalnym kosztem i nakładem czasu.

Dzięki modularnej architekturze sterownik programowy jest skalowalny (tzn. ma możliwość łatwego dostosowania funkcjonalności do konkretnych zadań, możliwość zrezygnowania ze sztucznej inteligencji w prostszych rozwiązaniach) oraz elastyczny (możliwość współpracy z różnymi typami maszyn, magistral komunikacyjnych i serwonapędów). Implementacja sterowania numerycznego na komputerze PC daje szerokie pole do rozbudowy układu sterowania (np. integracja z rozproszonymi systemami sterowania, zaawansowane funkcje wizualizacji).

## Literatura

1. Are E. V. et al.: The effect of hydrogen peroxide produced during ultraviolet disinfection of CHO cell culture media. *Process Biochemistry*, 2017, 61: 147-155.
2. Ali S. et al.: Comparison of two whole-room ultraviolet irradiation systems for enhanced disinfection of contaminated hospital patient rooms. *Journal of Hospital Infection*, 2017, 97.2: 180-184.
3. Penno K., Jandarov R. A.: Sopirala, Madhuri M. Effect of automated ultraviolet C-emitting device on decontamination of hospital rooms with and without real-time observation of terminal room disinfection. *American journal of infection control*, 2017, 45.11: 1208-1213.
4. Curtis G. L. et al.: Reduction of Particles in the Operating Room using Ultraviolet Air Disinfection and Recirculation Units. *The Journal of arthroplasty*, 2017.
5. Kaur Samra R, Vasant Bhide S.: Comparative evaluation of dimensional stability of impression materials from developing countries and developed countries after disinfection with different immersion disinfectant systems and ultraviolet chamber. *The*

- Saudi Dental Journal [serial online]. November 25, 2017; Available from: ScienceDirect, Ipswich, MA. Accessed January 7, 2018.
6. Sobhani H., Shokouhmand H.: Effects of number of low-pressure ultraviolet lamps on disinfection performance of a water reactor. *Journal of Water Process Engineering*, 2017, 20: 97-105.
  7. Green C. et al: Pulsed-xenon ultraviolet light disinfection in a burn unit: Impact on environmental bioburden, multidrug-resistant organism acquisition and healthcare associated infections. *Burns*, 2017, 43.2: 388-396.
  8. Xu L. et al.: Mechanisms of ultraviolet disinfection and chlorination of *Escherichia coli*: Culturability, membrane permeability, metabolism, and genetic damage. *Journal of Environmental Sciences*, 2017.
  9. Xu C., Rangaiah, G. P., Zhao, X. S.: Application of Artificial Neural Network and Genetic Programming in Modeling and Optimization of Ultraviolet Water Disinfection Reactors. *Chemical Engineering Communications*, 2015, 202(11), 1415-1424.
  10. Kowalski W. et al.: Mathematical modeling of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection. *Quantitative Microbiology* 2.3 (2000): 249-270.

Dr inż. Grzegorz KŁOSOWSKI  
Katedra Organizacji Przedsiębiorstwa  
Politechnika Lubelska  
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38 D  
tel./fax: (0-81) 5384567  
e-mail: g.klosowski@pollub.pl

Dr inż. Tomasz RYMARCZYK  
Centrum Badawczo-Rozwojowe  
Netrix S.A.  
20-148, Lublin, Związkowa 26  
tel./fax: (0-81) 748-08-34  
e-mail: tomasz@rymarczyk.com