

ZASTOSOWANIE SIECI NEURONOWYCH DO OKREŚLANIA STANU OBCIĄŻENIA WIRNIKA NOŚNEGO

dr inż. **Jarosław STANISŁAWSKI**
Instytut Lotnictwa

Zastosowanie sieci neuronowej umożliwi, na podstawie łatwiej dostępnych danych pomiarowych jak prędkość lotu oraz wychylenia sterownic, określanie wartości parametrów trudniejszych do pomiaru, które w czasie normalnej eksploatacji śmigłowca nie są rejestrowane. Zadanie bieżącej kontroli obciążeń wirnika oraz oceny poziomu zapasu do osiągnięcia ograniczeń eksploatacyjnych może przejąć sieć neuronowa. Wyniki działania wytrenowanych sieci neuronowych wyznaczających amplitudy i wartości średnie momentu sterowania łopatką i momentu gnącego korpus piasty przedstawiono w formie wykresów rozrzutu wartości obliczeniowych w zestawieniu z wartościami oszacowania danego parametru dokonanego przez sieć.

1. WPROWADZENIE

Eksploatacja śmigłowców z zachowaniem wysokiego poziomu bezpieczeństwa jest jednym z ważniejszych wymagań użytkowników. Niebezpieczne stany lotu mogą zaistnieć w różnych okolicznościach w wyniku wystąpienia awarii sprzętu lub błędu pilota. Prawidłowa ocena granic obwiedni bezpiecznych stanów lotu może być utrudniona dla załóg śmigłowców, zwłaszcza w lotach w pobliżu przeszkód terenowych lub w trudnych warunkach atmosferycznych. Do generacji informacji pomagających pilotowi w prawidłowej ocenie stanu lotu i bezpiecznym sterowaniu śmigłowcem mogą być wykorzystane sieci neuronowe.

Sieci neuronowe można określić jako metodę modelowania pozwalającą odwzorować bardzo złożone funkcje z uwzględnieniem zależności nieliniowych i wielowymiarowych [1], [2]. Istotną cechą sieci neuronowych jest zdolność konstruowania modelu zjawiska, uczenia się w trakcie treningu, na podstawie dostępnego zbioru danych. Duże możliwości wykorzystania sieci neuronowych potwierdzają przykłady ich zastosowania. W oparciu o sieć neuronową opracowano dla śmigłowca SH-60 czujnik małych prędkości lotu [3] działający w zakresie pomiarowym, gdzie wskazania prędkościomierza ciśnieniowego są zawodne. Wykorzystując zapisy wychyleń sterownic oraz momentu na wale wirnika przy wykonywaniu lotów z małą prędkością w różnych azymutach (do przodu, do tyłu, na boki, kierunki pośrednie) uzyskano dane do treningu sieci określającej prędkość i kierunek przemieszczania się śmigłowca. Podobnie wykorzystano sieć neuronową do wskazywania prędkości lotu i kątów ślizgu dla śmigłowca Lynx [4]. Sieć neuronowa stanowiła również podstawę czujnika umożliwiającego oszacowanie w czasie lotu trudno mierzalnego parametru, jakim jest ciężar śmigłowca [5]. Podczas badań w locie śmigłowca SW-4 sieć neuronową zastosowano do modelowania obciążeń zespołu mocowania przekładni głównej na podstawie wybranych parametrów stanu lotu [6].

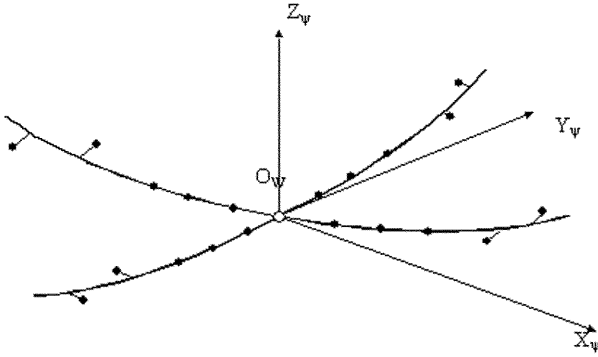
W artykule przedstawiono wyniki treningu sieci neuronowych, których zadaniem było oszacowanie wartości składowych obciążenia elementów wirnika na podstawie danych z układu niewirującego: wybranych parametrów lotu i wychyleń tarczy sterującej. Do treningu sieci wykorzystano zbiory danych otrzymane po przeprowadzeniu obliczeń symulacyjnych obciążeń wirnika nośnego śmigłowca PZL Sokół w zadanych ustalonych stanach lotu.

2. MODEL WIRNIKA NOŚNEGO

Model wirnika nośnego tworzą łopaty wraz z ramionami główicy. W algorytmie obliczeniowym zrealizowano analizę wielołopatową, gdzie dla danej chwili czasu wyznaczane są parametry ruchu i obciążenia łopat znajdujących się na różnych azymutach tarczy wirnika. Po zsumowaniu oddziaływań od wszystkich łopat określone jest obciążenie wału wirnika dla tej chwili czasu. Model fizyczny wirnika przedstawiono na rysunku 1.

W modelu ciągły rozkład masy rzeczywistej łopaty zastąpiono układem mas skupionych zaczepionych w środkach ciężkości segmentów łopaty. Masy skupione połączono z odcinkami odkształcalnej osi sprężystej, która może jednocześnie podlegać skręcaniu oraz zginaniu w płaszczyznach ciągu i obrotów. W stanie nieodkształconym oś sprężysta pokrywa się z osią przekreślenia łopaty. Łopata jest

połącz ona z przegubową głowicą z uwzględnieniem sprzężenia kinematycznego wahań i przekręceń.



Rys.1. Model fizyczny wirnika nośnego z masami skupionymi segmentów łopat

Model matematyczny tworzą równania ruchu odkształcalnej osi sprężystej, które można wyprowadzić wykorzystując równania Lagrange'a

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{q}_i} \right) - \frac{\delta T}{\delta q_i} + \frac{\delta U}{\delta q_i} = Q_i \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

gdzie

T – energia kinetyczna układu,

U – energia potencjalna układu,

q_i – współrzędna uogólniona,

Q_i – siła uogólniona,

n – liczba współrzędnych uogólnionych.

Energia potencjalna osi sprężystej podlegającej zginaniu w dwóch płaszczyznach oraz skręcaniu wynosi:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EJ_Y \left(\frac{d^2 z}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^L EJ_Z \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^L GJ_X \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)^2 dx, \quad (2)$$

a energia kinetyczna osi sprężystej o ciągłym rozkładzie masy:

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L m(x) V_Y^2(x) dx + \frac{1}{2} \int_0^L m(x) V_Z^2(x) dx + \frac{1}{2} \int_0^L I_X(x) \Omega_\varphi^2(x) dx. \quad (3)$$

W przypadku wirującej łopaty w równaniach ruchu osi sprężystej należy uwzględnić usztywniający efekt odśrodkowych sił bezwładności [1]. Wydatek odśrodkowych sił bezwładności działający na element dx wirującej, odkształconej osi sprężystej i zmniejszający jej zginanie wynosi:

- w płaszczyźnie ciągu $p_{z_\Omega} = \frac{d}{dx} \left(N \frac{dz}{dx} \right), \quad (4)$

- w płaszczyźnie obrotów $p_{y_\Omega} = \frac{d}{dx} \left(N \frac{dy}{dx} \right) - m(x) \omega^2 y, \quad (5)$

gdzie

$$N = \int_r^R m(x) \omega^2 x dx \quad \text{– siła odśrodkowa działająca w przekroju położonym w odległości } r \text{ od osi wału wirnika.}$$

Po podstawieniu zależności (2)+(5) do równania (1) oraz po wykonaniu działań można uzyskać równania ruchu osi sprężystej w poniższej postaci:

$$\int_0^R m(x) \ddot{y} dx + \int_0^R \left\{ \frac{d^2}{dx^2} \left[EJ_Z \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right) \right] - \frac{d}{dx} \left(N \frac{dy}{dx} \right) + m(x) \omega^2 y \right\} dx = \int_0^R (F_{Y_{ZEW}} - F_{Y_B}) dx \quad (6a)$$

$$\int_0^R m(x) \ddot{z} dx + \int_0^R \left\{ \frac{d^2}{dx^2} \left[EJ_Y \left(\frac{d^2 z}{dx^2} \right) \right] - \frac{d}{dx} \left(N \frac{dz}{dx} \right) \right\} dx = \int_0^R (F_{Z_{ZEW}} - F_{Z_B}) dx \quad (6b)$$

$$\int_0^R I_X(x) \ddot{\varphi} dx + \int_0^R \frac{d}{dx} \left[GJ_X \left(\frac{d\varphi}{dx} \right) \right] dx = \int_0^R (M_{S_{ZEW}} - M_{S_B}) dx \quad (6c)$$

gdzie

$F_{Y_{ZEW}}, F_{Z_{ZEW}}, M_{S_{ZEW}}$ – siły tnące i moment skręcający obciążenia zewnętrznego działające na odcinek dx osi sprężystej,

$F_{Y_B}, F_{Z_B}, M_{S_B}$ – siły bezwładności i skręcający moment sił bezwładności pomniejszone odpowiednio o składniki $m\ddot{y}, m\ddot{z}, I_X \ddot{\varphi}$ działające na odcinek dx osi.

Układ równań (6) opisujący drgania osi o ciągłym rozkładzie mas można rozwiązać metodą Galerkin'a zgodnie, z którą przyjmuje się, że odkształcenia osi sprężystej y, z, φ są równe sumie składowych odkształceń pochodzących od uwzględnianych postaci drgań własnych osi:

$$\begin{aligned} y(x,t) &= \sum_{i1=1}^{I1} \rho_{i1}(t) y_{i1}(x), \\ z(x,t) &= \sum_{i2=1}^{I2} \delta_{i2}(t) z_{i2}(x), \\ \varphi(x,t) &= \sum_{i3=1}^{I3} \eta_{i3}(t) \varphi_{i3}(x) \end{aligned} \quad (7a)$$

gdzie

$y_{i1}, z_{i2}, \varphi_{i3}$ – uwzględniane postacie drgań własnych odpowiednio giętych w płaszczyźnie obrotów, giętych w płaszczyźnie ciągu oraz skrętnych;

$\rho_{i1}, \delta_{i2}, \eta_{i3}$ – zmienne w czasie wagi poszczególnych postaci własnych, których wartości są wyznaczone przy rozwiązywaniu równań ruchu;

$I1, I2, I3$ – liczby uwzględnianych postaci giętych w płaszczyźnie obrotów, giętych w płaszczyźnie ciągu oraz skrętnych

Podobnie wykorzystując postacie własne można wyznaczyć pochodne po czasie odkształceń osi sprężystej:

$$\begin{aligned} \dot{y}(x,t) &= \sum_{i1=1}^{I1} \dot{\rho}_{i1}(t) y_{i1}(x), \\ \dot{z}(x,t) &= \sum_{i2=1}^{I2} \dot{\delta}_{i2}(t) z_{i2}(x), \\ \dot{\varphi}(x,t) &= \sum_{i3=1}^{I3} \dot{\eta}_{i3}(t) \varphi_{i3}(x) \end{aligned} \quad (7b)$$

$$\begin{aligned}\ddot{y}(x,t) &= \sum_{i1=1}^{I1} \ddot{p}_{i1}(t)y_{i1}(x), \\ \ddot{z}(x,t) &= \sum_{i2=1}^{I2} \ddot{\delta}_{i2}(t)z_{i2}(x), \\ \ddot{\varphi}(x,t) &= \sum_{i3=1}^{I3} \ddot{\eta}_{i3}(t)\varphi_{i3}(x)\end{aligned}\quad (7c)$$

Po podstawieniu związków (7) do równań (6) i następnie po przemnożeniu kolejno:

- równania (6a) przez postać drgań y_{i10} , gdzie $i10 = 1, \dots, I1$;
 - równania (6b) przez postać drgań z_{i20} , gdzie $i20 = 1, \dots, I2$;
 - równania (6c) przez postać drgań φ_{i30} , gdzie $i30 = 1, \dots, I3$
- w otrzymanych wyrażeniach pomijane są składniki zawierające te iloczyny postaci własnych, które są równe zero na podstawie warunku ortogonalności:

$$\int_0^R \zeta_i \zeta_{i0} dx = 0 \quad \text{dla } i \neq i0.$$

Po wykorzystaniu warunku ortogonalności postaci własnych każde z równań (6) można przekształcić w układ równań, w którym poszczególne równania opisują ruch drgający ekwiwalentnej struktury o jednym stopniu swobody, przy czym częstość drgań własnych struktury jest równa częstości jednej z uwzględnianych postaci własnych łopaty.

Po przekształceniach i wprowadzeniu oznaczeń dla pochodnych wzdłuż długości łopaty

$$\frac{d}{dx} = ', \quad \frac{d^2}{dx^2} = ''$$

równania (6) można przedstawić w następującej postaci:

$$\begin{aligned}\ddot{p}_{i1} + \rho_{i1} \frac{\int_0^R \left\{ \left[EJ_Z (y_{i1})'''' \right] + m(x)\omega^2 y_{i1} - \left[N (y_{i1})' \right]' \right\} y_{i1} dx}{\int_0^R m(x)(y_{i1})^2 dx} = \\ = \frac{\int_0^R (F_{Y_{ZEW}} - F_{Y_B}) y_{i1} dx}{\int_0^R m(x)(y_{i1})^2 dx},\end{aligned}\quad (8a)$$

gdzie $i1 = 1, \dots, I1$

$$\begin{aligned}\ddot{\delta}_{i2} + \delta_{i2} \frac{\int_0^R \left\{ \left[EJ_Y (z_{i2})'''' \right] - \left[N (z_{i2})' \right]' \right\} z_{i2} dx}{\int_0^R m(x)(z_{i2})^2 dx} = \\ = \frac{\int_0^R (F_{Z_{ZEW}} - F_{Z_B}) z_{i2} dx}{\int_0^R m(x)(z_{i2})^2 dx},\end{aligned}\quad (8b)$$

gdzie $i2 = 1, \dots, I2$

$$\ddot{\eta}_{i3} + \eta_{i3} \frac{\int_0^R \left\{ \left[GJ_X (\varphi_{i3})' \right]' \right\} \varphi_{i3} dx}{\int_0^R I_X(x)(\varphi_{i3})^2 dx} = \frac{\int_0^R (M_{S_{ZEW}} - M_{S_B}) \varphi_{i3} dx}{\int_0^R I_X(x)(\varphi_{i3})^2 dx},\quad (8c)$$

gdzie $i3 = 1, \dots, I3$

W równaniach (8) wyrażenia stojące przy ρ_{i1} , δ_{i2} , η_{i3} są równe kwadratowi częstości odpowiednich postaci własnych p_{i1}^2 , f_{i2}^2 , v_{i3}^2 zginania w dwóch płaszczyznach oraz skręcania łopaty. Wyrażenia po prawych stronach równań (8) określają siły uogólnione dla uwzględnianych postaci własnych. Równania (8) można zapisać w prostszej formie:

$$\ddot{p}_{i1} + \rho_{i1} p_{i1}^2 = Q_{Y_{i1}}, \quad i_1 = 1, \dots, I_1 \quad (9a)$$

$$\ddot{\delta}_{i2} + \delta_{i2} f_{i2}^2 = Q_{Z_{i2}}, \quad i_2 = 1, \dots, I_2 \quad (9b)$$

$$\ddot{\eta}_{i3} + \eta_{i3} v_{i3}^2 = Q_{\varphi_{i3}}, \quad i_3 = 1, \dots, I_3 \quad (9c)$$

gdzie

$Q_{Y_{i1}}, Q_{Z_{i2}}, Q_{\varphi_{i3}}$ – siły uogólnione dla branych pod uwagę postaci własnych.

Uwzględniając zastąpienie ciągłego rozkładu masy rzeczywistej łopaty przez dyskretny układ mas skupionych modelu należy zastąpić całki w wyrażeniach określających siły uogólnione w równaniach (8) przez sumowanie po masach dyskretnych rozpatrywanego modelu łopaty:

$$Q_{Y_{i1}} = \frac{\sum_{j=1}^J (F_{Y_{ZEW}} - F_{Y_B})_j (y_{i1})_j}{\sum_{j=1}^J m_j (y_{i1})_j^2}, \quad (10a)$$

$$Q_{Z_{i2}} = \frac{\sum_{j=1}^J (F_{Z_{ZEW}} - F_{Z_B})_j (z_{i2})_j}{\sum_{j=1}^J m_j (z_{i2})_j^2}, \quad (10b)$$

$$Q_{\varphi_{i3}} = \frac{\sum_{j=1}^J (M_{S_{ZEW}} - M_{S_B})_j (\varphi_{i3})_j}{\sum_{j=1}^J I_{X_j} (\varphi_{i3})_j^2}, \quad (10c)$$

gdzie

J – liczba mas skupionych modelu łopaty wirnika nośnego.

Równania ruchu (9) ekwiwalentnych mas o jednym stopniu swobody można rozwiązać metodą Runge-Kutty.

Obliczając siły uogólnione dla poszczególnych postaci własnych łopaty w zależnościach (10) uwzględniono siły bezwładności, siły aerodynamiczne oraz oddziaływania od tłumików wahań łopat w płaszczyźnie obrotów. Wyznaczenie sił bezwładności działających na segment łopaty wymaga określenia przyspieszeń masy skupionej segmentu. Położenie masy skupionej i -tego segmentu l -tej łopaty względem środka masy śmigłowca można określić następująco (rys. 2.):

$$\vec{r}_{M_{i1}} = \vec{r}_{WN} + \vec{r}_{Li}, \quad (11)$$

gdzie

\vec{r}_{WN} – wektor położenia środka głowicy wirnika względem środka masy śmigłowca,

\vec{r}_{Li} – wektor położenia masy skupionej segmentu łopaty względem środka głowicy.

Składowe wektora \vec{r}_{Li} położenia masy skupionej segmentu, określone w układzie niewirującym, zaczepionym w środku głowicy wirnika O_W wynoszą:

$$x_{Li} = x_{Li}^* \cdot \cos \Psi - y_{Li}^* \cdot \sin \Psi \quad (12a)$$

$$y_{Li} = x_{Li}^* \cdot \sin \Psi + y_{Li}^* \cdot \cos \Psi \quad (12b)$$

$$z_{Li} = z_{Li}^* \quad (12c)$$

gdzie składowe wektora $\vec{r}_{Li}^* = [x_{Li}^*, y_{Li}^*, z_{Li}^*]$ położenia masy skupionej segmentu łopaty w układzie wirującym $O_W X_L Y_L Z_L$ związanym z łopatą są następujące:

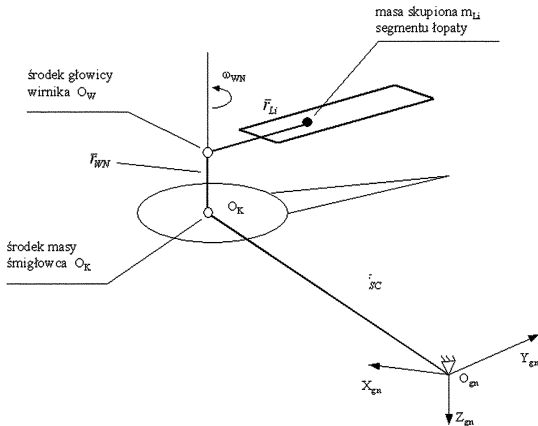
$$x_{Li}^* = x_i - e_i \gamma_i - f_i \alpha_i \quad (13a)$$

$$y_{Li}^* = y_i + e_i - f_i \Phi_i \quad (13b)$$

$$z_{Li}^* = z_i + e_i \Phi_i + f_i \quad (13c)$$

gdzie

- x_i – położenie masy skupionej segmentu wzdłuż łopaty przy nieodkształconej osi sprężystej,
- y_i, z_i, Φ_i – odkształcenia osi sprężystej łopaty: ugięcia w płaszczyźnie obrotów i ciągu oraz skręcenie,
- e_i, f_i – współrzędne określające położenie masy skupionej segmentu względem nieodkształconej osi sprężystej odpowiednio w płaszczyźnie obrotów i płaszczyźnie ciągu,
- α_i, γ_i – kąty ugięć osi sprężystej w płaszczyźnie ciągu i płaszczyźnie obrotów.



Rys. 2. Położenie masy skupionej segmentu łopaty wirnika nośnego

W przypadku śmigłowca poruszającego się w przestrzeni prędkość masy skupionej segmentu łopaty można wyznaczyć zgodnie z poniższą zależnością:

$$\vec{V}_{M_{Li}} = \vec{V}_{SC} + \vec{\Omega}_k \times (\vec{r}_{WN} + \vec{r}_{Li}) + \vec{\Omega}_{WN} \times \vec{r}_{Li} + \frac{\delta \vec{r}_{Li}^*}{\delta t}, \quad (14)$$

gdzie

$\vec{\Omega}_k$ – prędkość kątowa kadłuba śmigłowca,

$\vec{\Omega}_{WN} = [0, 0, \omega_{WN}]$ – prędkość kątowa wału wirnika nośnego,

$\frac{\delta \vec{r}_{Li}^*}{\delta t}$ – wektor prędkości masy skupionej segmentu łopaty względem układu $O_W X_L Y_L Z_L$ związanego z łopatą, jego składowe zgodnie z zależnościami (13) wynoszą:

$$\dot{x}_{Li}^* = -e_i \dot{\gamma}_i - f_i \dot{\alpha}_i \quad (15a)$$

$$\dot{y}_{Li}^* = \dot{y}_i - f_i \dot{\Phi}_i \quad (15b)$$

$$\dot{z}_{Li}^* = \dot{z}_i + e_i \dot{\Phi}_i \quad (15c)$$

Różniczkując zależność (14) otrzymamy wektor przyspieszeń bezwzględnych masy skupionej segmentu łopaty wirnika z uwzględnieniem ruchów sztywnego kadłuba:

$$\begin{aligned} \vec{P}_{M_{Li}} = & \vec{P}_{SC} + \vec{\Omega}_k \times [\vec{r}_{WN} + \vec{r}_{Li}] + \\ & + \vec{\Omega}_k \times \vec{\Omega}_k \times [\vec{r}_{WN} + \vec{r}_{Li}] + 2\vec{\Omega}_k \times \left[\vec{\Omega}_{WN} \times \vec{r}_{Li} + \frac{\delta \vec{r}_{Li}^*}{\delta t} \right] + \\ & + 2\vec{\Omega}_{WN} \times \frac{\delta \vec{r}_{Li}^*}{\delta t} + \dot{\vec{\Omega}}_{WN} \times \vec{r}_{Li} + \vec{\Omega}_{WN} \times \vec{\Omega}_{WN} \times \vec{r}_{Li} + \frac{\delta^2 \vec{r}_{Li}^*}{\delta t^2} \end{aligned} \quad (16)$$

gdzie

$\frac{\delta^2 \vec{r}_{Li}^*}{\delta t^2}$ – wektor przyspieszeń masy skupionej segmentu łopaty względem układu $O_W X_L Y_L Z_L$ związanego z łopatą, jego składowe zgodnie z zależnościami (15) wynoszą:

$$\ddot{x}_{Li}^* = -e_i \ddot{\gamma}_i - f_i \ddot{\alpha}_i \quad (17a)$$

$$\ddot{y}_{Li}^* = \ddot{y}_i - f_i \ddot{\Phi}_i \quad (17b)$$

$$\ddot{z}_{Li}^* = \ddot{z}_i + e_i \ddot{\Phi}_i \quad (17c)$$

Równanie (16) opisuje przyspieszenia punktu łopaty dla ogólnego przypadku ruchu śmigłowca.

Siły aerodynamiczne działające na segment łopaty w danym położeniu azymutalnym na tarczy wirnika są wyznaczone przy wykorzystaniu teorii elementu łopaty. Lokalny kąt natarcia α jest zależny od chwilowych warunków opływu profilu łopaty:

$$\alpha = \varphi - \arctg \left(\frac{v_Z}{v_X} \right) \quad (18)$$

v_Z, v_X – składowe pionowa i pozioma opływu profilu łopaty,

φ – chwilowy kąt nastawienia elementu łopaty:

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_x \cos \omega t + \varphi_y \sin \omega t + \varphi_s - \kappa \beta, \quad (19)$$

gdzie

φ_0 – skok ogólny,

φ_x, φ_y – skok cykliczny przechylenia i pochylenia,

φ_s – odkształcenie skrętne łopaty w danym przekroju,

κ – współczynnik wahań i przegięć,

β – chwilowy kąt wahań łopaty wokół przegubu poziomego.

Zmienne w czasie współczynniki aerodynamiczne c_x, c_z, c_m elementu łopaty wyznaczano z uwzględnieniem niestacjonarności opływu na podstawie charakterystyk statycznych profili łopaty wirnika. Niestacjonarność opływu elementu łopaty wynika z ciągłych zmian kąta natarcia α w trakcie obrotu wirnika przy jednoczesnych zmianach liczby Macha M i zmianach kąta skosu napływu strug Λ na element łopaty.

3. OBLICZENIOWE OBCIĄŻENIA ELEMENTÓW WIRNIKA NOŚNEGO

Wielkość obciążeń działających na wirnik śmigłowca zależy w głównej mierze od parametrów lotu oraz położenia układu sterowania skokiem ogólnym i cyklicznym.

Przewidywanym zadaniem sieci neuronowej będzie odwzorowanie zależności funkcyjnej między branym pod uwagę rodzajem obciążenia R_{obc-i}

$$R_{obc-i} = f_i (V_x, V_z, \alpha_w, \theta_x, \theta_y, \varphi_0)$$

a składowymi swobodnego napływu na tarczę wirnika:

poziomą V_x i pionową V_z , kątem pochylenia osi wału wirnika α_w , kątem przechylenia θ_x i kątem pochylenia θ_y tarczy sterującej oraz skokiem ogólnym φ_0 łopat wirnika.

Obciążenia wirnika nośnego wyznaczano dla następujących przedziałów zmienności argumentów:

- prędkość pozioma V_x od 60 do 230 km/h;
- prędkość pionowa V_z od -4 do 4 m/s;
- kąt pochylenia osi wału α_w od -10° do 8° ;
- kąt przechylenia tarczy sterującej θ_x od $-4,5^\circ$ do $1,5^\circ$;
- kąt pochylenia tarczy sterującej θ_y od -6° do 6° ;
- skok ogólny łopat wirnika φ_0 od 14° do 26° .

Dla wartości kąta pochylenia osi wału wirnika α_w uwzględniono kąt zaklinowania wału względem pionu montażowego, w przypadku śmigłowca PZL Sokół, wynoszący $-4,5^\circ$.

Skok ogólny podano względem przekroju w osi wału ($r=0$), dla skoku określanego względem przekroju łopaty na promieniu $r=0,75R$ wielkość o należy zmniejszyć φ_0 skręcenie geometryczne łopaty między przekrojami $r=0$ oraz $r=0,75R$ wynoszące $8,5^\circ$.

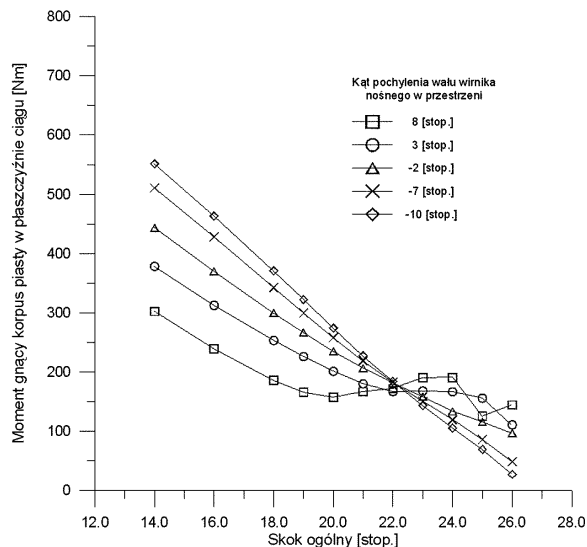
Obciążenia wyznaczano dla modelu izolowanego wirnika w warunkach quasi-statycznych zachowując niezmiennie w przestrzeni położenie osi obracającego się wirnika.

W poszczególnych przypadkach obliczenia symulacyjne prowadzono dla czasu odpowiadającego dziewięciu obrotom wirnika. Pierwsze osiem obrotów wirnika przeznaczono na zanik warunków początkowych. Wyniki obliczeń z dziewiątego obrotu wirnika przyjmowano jako dane do treningu sieci.

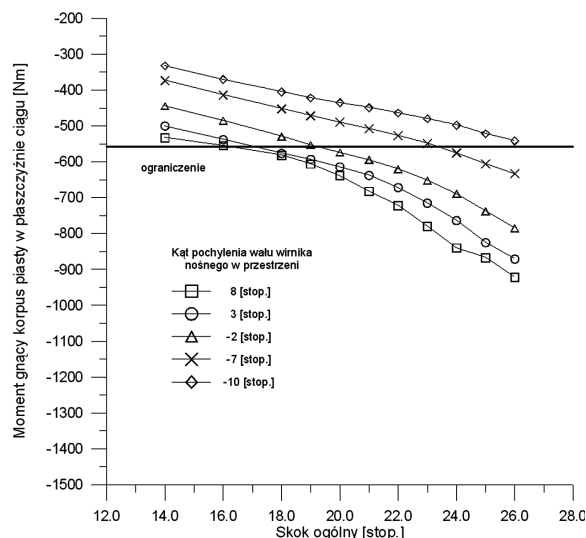
Założono, że w trakcie obliczeń zachowana jest stała wartość prędkości kątowej wirnika. W czasie obrotu wału obciążenia ulegają zmianom w sposób ciągły przy stałych wychyleniach układu sterowania i niezmiennych parametrach lotu. Jako dane określające jedno zdarzenie w zbiorze do treningu sieci, dla poszczególnych rodzajów obciążeń, podawano wartości maksymalne, minimalne, średnie oraz amplitudy występujące w trakcie jednego obrotu wału wirnika.

Przykładowe wyniki obliczeń obciążeń wirnika, przy prędkości lotu $v=180$ km/h, dla momentu gnącego korpus piasty w płaszczyźnie ciągu na promieniu $r=0,5$ m pokazano na rysunkach 3÷6 oraz dla momentu sterowania łopatą na rysunkach 7÷10. Zmiany wartości maksymalnych, minimalnych, średnich i amplitud w trakcie jednego obrotu wirnika przedstawiono w zależności od skoku ogólnego łopat oraz kąta pochylenia osi wału wirnika. Dla wybranych przypadków lotu z prędkością $v=180$ km/h zmiany warunków opływu i odkształceń łopaty przedstawiono na rysunkach 11÷14, gdzie przy skoku ogólnym $\varphi_0=25^\circ$ (podawany dla $r=0$), kątach pochylenia wału $\alpha_{wal}=-10^\circ$ (nurkowanie) i $\alpha_{wal}=3^\circ$ (zadzieranie) pokazano położenia strefy oderwań oraz rozkład kąta skręcenia łopaty na tarczy wirnika.

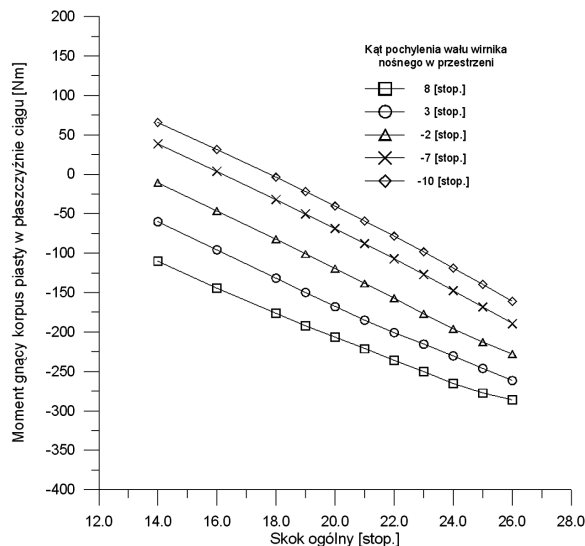
Rys. 5. Zmiany momentu gnącego korpus piasty wirnika nośnego w płaszczyźnie ciągu na promieniu $r=0,5$ m w zależności od skoku ogólnego i pochylenia osi wału wirnika względem pionu; wartości średnie w czasie jednego obrotu wirnika, warunki quasi-statyczne przy prędkości lotu $V=180$ km/h

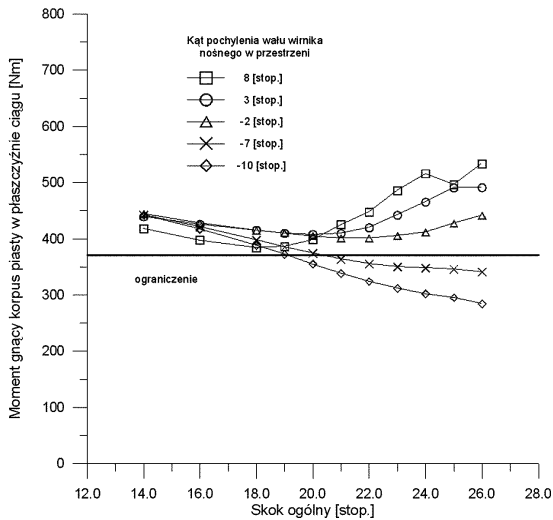


Rys. 3. Zmiany momentu gnącego korpus piasty wirnika nośnego w płaszczyźnie ciągu na promieniu $r=0,5$ m w zależności od skoku ogólnego i pochylenia osi wału wirnika względem pionu; wartości maksymalne w czasie jednego obrotu wirnika, warunki quasi-statyczne przy prędkości lotu $V=180$ km/h

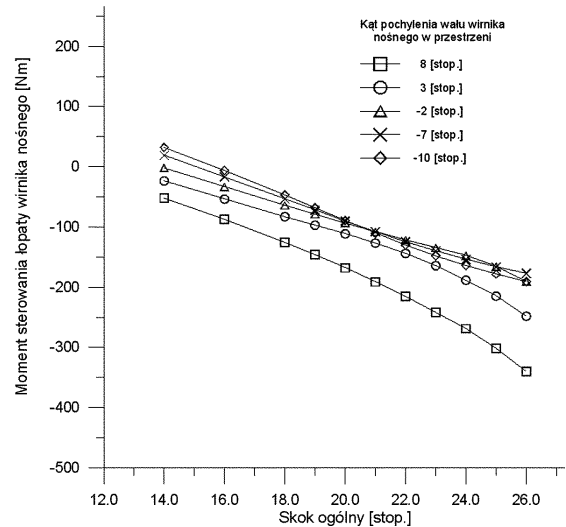


Rys. 4. Zmiany momentu gnącego korpus piasty wirnika nośnego w płaszczyźnie ciągu na promieniu $r=0,5$ m w zależności od skoku ogólnego i pochylenia osi wału wirnika względem pionu; wartości minimalne w czasie jednego obrotu wirnika, warunki quasi-statyczne przy prędkości lotu $V=180$ km/h

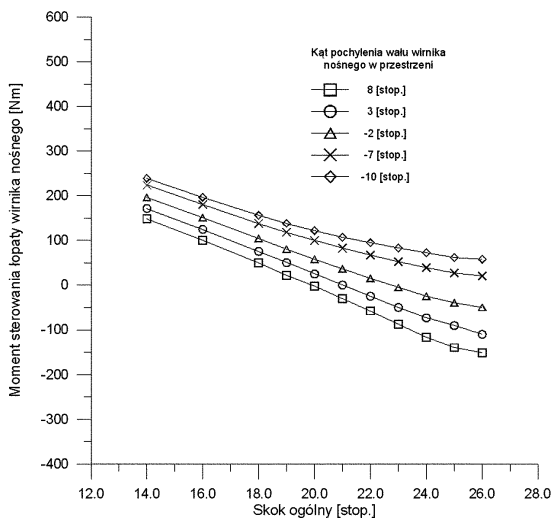




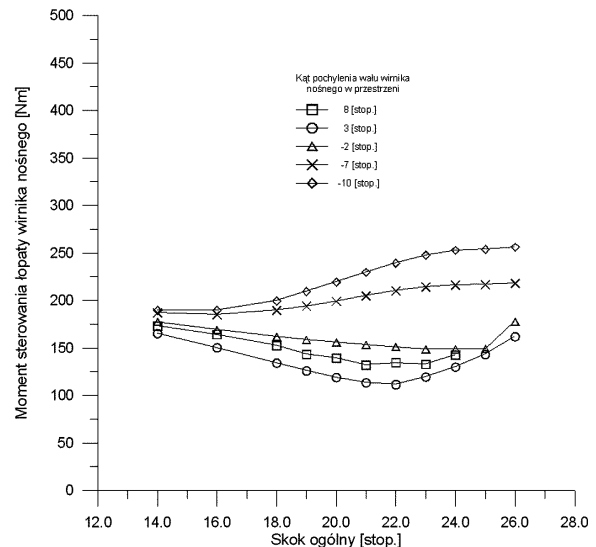
Rys. 6. Zmiany momentu gnącego korpusu piasty wirnika nośnego w płaszczyźnie ciągu na promieniu $r = 0,5$ m w zależności od skoku ogólnego i pochylecia osi wału wirnika względem pionu; wartości amplitud w czasie jednego obrotu wirnika, warunki quasi-statyczne przy prędkości lotu $V = 180$ km/h



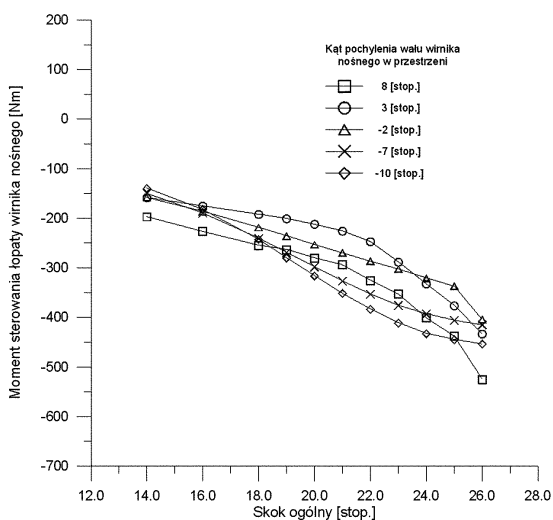
Rys. 9. Zmiany momentu sterowania łopaty w zależności od skoku ogólnego i pochylecia osi wału wirnika względem pionu, wartości średnie w czasie jednego obrotu wirnika, warunki quasi-statyczne przy prędkości lotu $V = 180$ km/h



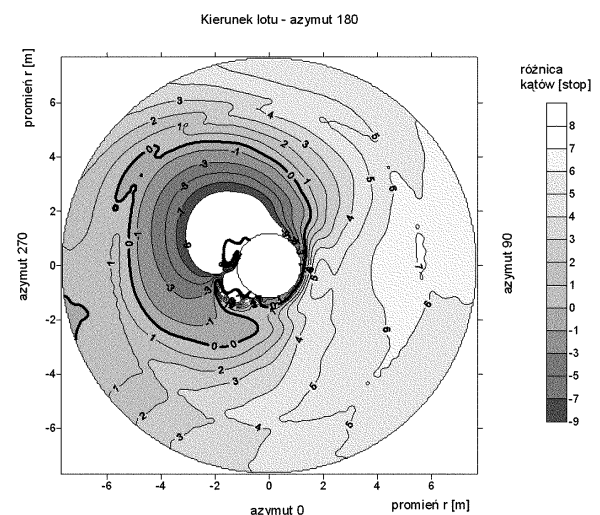
Rys. 7. Zmiany momentu sterowania łopaty w zależności od skoku ogólnego i pochylecia osi wału wirnika względem pionu, wartości maksymalne w czasie jednego obrotu wirnika, warunki quasi-statyczne przy prędkości lotu $V = 180$ km/h



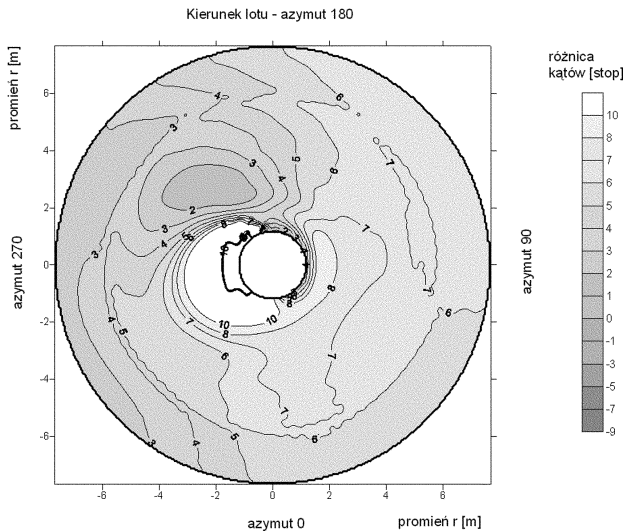
Rys. 10. Zmiany momentu sterowania łopaty w zależności od skoku ogólnego i pochylecia osi wału wirnika względem pionu, wartości amplitud w czasie jednego obrotu wirnika, warunki quasi-statyczne przy prędkości lotu $V = 180$ km/h



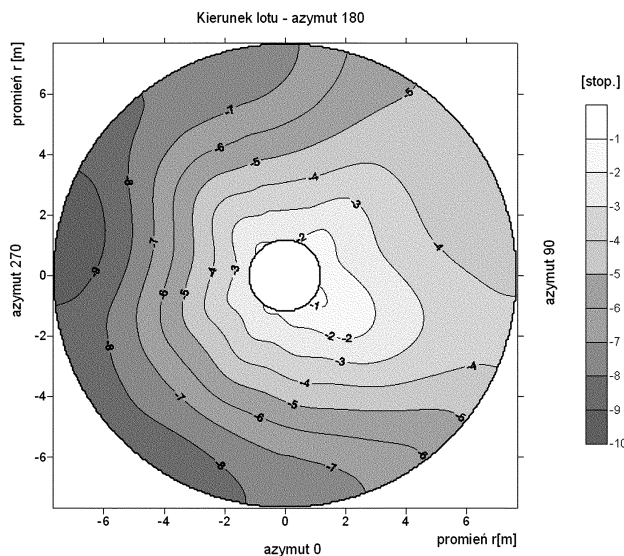
Rys. 8. Zmiany momentu sterowania łopaty w zależności od skoku ogólnego i pochylecia osi wału wirnika względem pionu, wartości minimalne w czasie jednego obrotu wirnika, warunki quasi-statyczne przy prędkości lotu $V = 180$ km/h



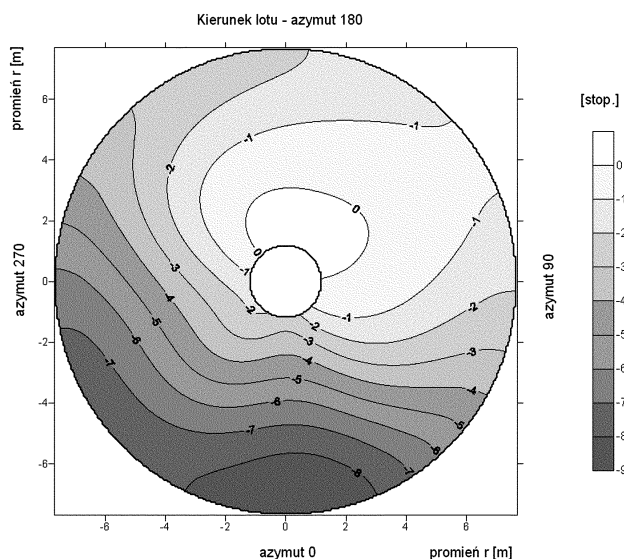
Rys. 11. Rozkład na tarczy wirnika różnicy krytycznego kąta natarcia i lokalnego kąta natarcia przy prędkości lotu $V = 180$ km/h i pochyleciu osi wału $\alpha_{\text{wał}} = 3^\circ$



Rys. 12. Rozkład na tarczy wirnika różnicy krytycznego kąta natarcia i lokalnego kąta natarcia przy prędkości lotu $V = 180$ km/h i kącie pochylenia osi wału $\alpha_{wal} = -10^\circ$



Rys. 13. Rozkład kąta skręcenia łopaty na tarczy wirnika przy prędkości lotu $V = 180$ km/h i kącie pochylenia osi wału $\alpha_{wal} = 30^\circ$



Rys. 14. Rozkład kąta skręcenia łopaty na tarczy wirnika przy prędkości lotu $V = 180$ km/h i kącie pochylenia osi wału $\alpha_{wal} = -10^\circ$

4. WYNIKI TRENINGU SIECI OKREŚLAJĄCEJ OBCIĄŻENIA WIRNIKA

Trening sieci neuronowych mających za zadanie określenie wartości wybranych składowych obciążeń elementów wirnika przeprowadzono przy pomocy pakietu oprogramowania STATISTICA Neural Network [7]. W czasie nauki dobierana jest struktura sieci, liczba neuronów, wielkości wag i wartości progowe neuronów. Zbiór danych do treningu obejmował 3248 przypadków, które w sposób przypadkowy podzielono przypisując po 1624 przypadków odpowiednio do zbioru uczącego oraz zbioru walidacyjnego. Dane ze zbioru uczącego wykorzystywane są bezpośrednio do nauki sieci. W kolejnych epokach nauki cały zbiór uczący jest prezentowany sieci, a uzyskane rezultaty stanowią podstawę do modyfikacji wag i wartości progowych neuronów. W czasie treningu może wystąpić zjawisko przeuczenia sieci, to znaczy zbyt dobre dopasowanie sieci do danych zbioru uczącego. Dane ze zbioru walidacyjnego, pośrednio biorące udział w uczeniu sieci, wykorzystywane są do wykrywania przeuczenia sieci. W czasie nauki błąd działania sieci określany zarówno, dla danych ze zbioru uczącego, jak i walidacyjnego ulega zmniejszaniu. W przypadku przeuczenia zmniejszającemu się błędowi dla danych zbioru uczącego, towarzyszy narastanie błędu dla danych zbioru walidacyjnego. Przy korzystaniu z funkcji automatycznego projektanta sieci, w momencie wzrostu błędu walidacyjnego, jako poprawna przyjmowana jest struktura sieci z wcześniejszej epoki nauki. Rezultat treningu sieci oceniany jest na podstawie wartości współczynnika jakości. Dla sieci o zadaniu regresyjnym, której wynikiem jest wartość liczbowa, współczynnik jakości określany jest jako iloraz dwóch odchyłeń standardowych: odchylenia dla błędu oszacowania przez sieć wartości zmiennej wynikowej oraz odchylenia standardowego dla wartości zmiennej wynikowej prezentowanej sieci w zbiorze danych. Zgodnie z [8] można przyjmować, że iloraz odchyłeń standardowych (współczynnik jakości) o wartości mniejszej od 0,1 świadczy o dobrej realizacji zadania regresyjnego przez sieć. Przy wartościach ilorazu odchyłeń przekraczających 0,7 należy odrzucić model tworzony przez sieć neuronową.

Przeprowadzono trening sieci określających amplitudy, wartości maksymalne, minimalne oraz średnie w trakcie obrotu wirnika, dla momentu sterowania łopata i momentu gnącego korpus piasty (ramię głowicy) w płaszczyźnie ciągu na promieniu $r = 0,5$ m. Sieci neuronowe na podstawie parametrów lotu śmigłowca i wychyleń tarczy sterującej podawanych w układzie niewirującym dokonywały oszacowania wielkości obciążenia działającego na element obracającego się wirnika.

Wyniki działania wytrenowanych sieci neuronowych wyznaczających obciążenia przedstawiono w formie wykresów rozrzutu wartości obliczeniowych (traktowanych jako rzeczywiste dane) w zestawieniu z wartościami oszacowania poszczególnych parametrów dokonanego przez sieci. Na rysunkach 15÷22 pokazano wykresy rozrzutów przy uwzględnieniu wszystkich przypadków ze zbiorów danych uczącego i walidacyjnego. W tabelach 1 i 2 zamieszczono współczynniki jakości działania sieci dla danych ze zbiorów uczących i walidacyjnych uzyskane przy oszacowaniu wielkości momentu sterowania łopata i momentu gnącego korpus piasty.

Tab. 1. Współczynniki jakości sieci oszacowujących moment sterowania łopaty

Parametr wynikowy M_{ster}	Typ sieci	Współczynnik jakości uczenia	Współczynnik jakości walidacji
wartość maksymalna	MLP 6-13-1	0.24463	0.24983
wartość średnia	MLP 6-11-1	0.10632	0.10697
amplituda	MLP 6-12-1	0.21545	0.23030
wartość minimalna	MLP 6-11-1	0.22651	0.24133

Tab. 2. Współczynniki jakości sieci oszacowujących moment gnący korpus piasty

Parametr wynikowy M_{gn}	Typ sieci	Współczynnik jakości uczenia	Współczynnik jakości walidacji
wartość maksymalna	MLP 6-13-1	0.17168	0.19315
wartość średnia	MLP 6-9-1	0.04073	0.04263
amplituda	MLP 6-10-1	0.10903	0.12351
wartość minimalna	MLP 6-12-1	0.09367	0.09369

W formie tabelarycznej przedstawiono przykładowe przebiegi treningu oraz rodzaje i strukturę uzyskanych sieci przeznaczonych do oszacowania:

- wartości maksymalnej momentu sterowania łopata – tabele 3÷6,
- wartości średniej momentu gnącego korpus piasty – tabele 7÷10.

W tabelach 3 i 7 zestawiono dane kolejno otrzymywanych sieci o strukturze pozwalającej uzyskiwać coraz lepsze oszacowanie parametru wynikowego. Dla wybranych sieci najlepiej spełniających zadanie określania parametru wynikowego zestawiono statystyki działania sieci dla zbiorach zbioru uczącego i walidacyjnego W tabelach 4 i 8 zamieszczono następujące informacje dotyczące wyników działania sieci:

- średnia wartość zmiennej wyjściowej obliczona na podstawie zadanych wartości tej zmiennej, zgromadzonych odpowiednio w zbiorze uczącym i walidacyjnym,
- odchylenie standardowe dla zadanych wartości zmiennej wyjściowej,
- średnia wartość błędu,
- odchylenie standardowe błędu dla oszacowanych wartości zmiennej wyjściowej,
- średni błąd bezwzględny oszacowania zmiennej wyjściowej, gdzie błąd bezwzględny dla każdego zdarzenia rozumiany jest jako moduł różnicy pomiędzy wartością zadaną, a wartością uzyskaną na wyjściu sieci,
- iloraz odchyleń standardowych (jakość) – iloraz odchyleń standardowych dla błędów i dla danych, traktowany jako główny wskaźnik jakości zbudowanego przez sieć modelu regresyjnego,
- korelacja – współczynnik korelacji Pearsona dla wartości zadanej i wartości uzyskanej na wyjściu sieci.

W tabelach 5 i 9 zamieszczono dane dotyczące wrażliwości działania sieci i rangi każdej z uwzględnianych zmiennych wejściowych. Wyznaczana wartość błędu jest miarą jakości sieci, gdy konkretna zmienna nie jest dostępna. Przy ważnej zmiennej pojawia się duży błąd wskazujący na znaczny spadek jakości sieci wobec braku takiej zmiennej. Iloraz jest stosunkiem błędu do błędu bazowego

otrzymanego z użyciem wszystkich zmiennych. Iloraz bliski jedności wskazuje, że odrzucenie zmiennej ma nieznaczny wpływ na jakość sieci. Ranga w formie liczbowej podaje kolejność ważności zmiennych, przy czym zmienna o randze 1 najsilniej wpływa na poprawność działania sieci. W tabelach 5 i 9 przyjęto następujące oznaczenia parametrów wejściowych sieci:

- VX – składowa pozioma prędkości lotu,
- VZ – prędkość pionowa,
- ALFW – kąt pochylenia wału wirnika względem pionu,
- TETX – kąt przechylenia tarczy sterującej,
- TETY – kąt pochylenia tarczy sterującej,
- FIO – kąt skoku ogólnego.

W tabelach 6 i 10 podano przykładowe wyniki oszacowania wartości zmiennych wyjściowych dla kilku wybranych zdarzeń.

Istotny wpływ na rezultaty działania sieci ma charakter zmian obciążeń łopat wirnika, gdzie przy występowaniu zjawiska oderwania na części tarczy wirnika pojawiają się gwałtowne zmiany wartości obciążeń. W przypadku wartości maksymalnych dla momentów sterowania łopaty i gnącego korpus piasty uzyskane współczynniki jakości sieci wynosiły odpowiednio: 0,24983 i 0,19315, co przekracza wartość 0,1 traktowaną jako rezultat dla bardzo dobrego treningu sieci. W przypadku wartości średnich na obrót wirnika, gdzie wpływ danych pochodzących z obszaru oderwań ulega złagodzeniu, uzyskano znacznie lepsze wartości współczynnika jakości sieci:

- dla średniej momentu sterowania łopata 0,106968,
- dla średniej momentu gnącego korpus piasty 0,042628.

Można oczekiwać poprawy dokładności wyników działania sieci w przypadku wprowadzenia większej liczby danych określających zdarzenia w obszarze granicznym występowania oderwań na tarczy wirnika. Dane te można uzyskać po przeprowadzeniu obliczeń symulacyjnych z zagęszczonym krokiem przyrostu prędkości lotu śmigłowca oraz zmian położenia tarczy sterującej.

Wydaje się, że otrzymane wyniki działania sieci neuronowych oszacowujących wielkość obciążeń elementów wirnika na podstawie parametrów stanu lotu potwierdzają możliwość zastosowania sieci do oceny wartości obciążeń i do ostrzegania pilota o zbliżeniu się do poziomu ograniczeń. Sprzyja temu wykorzystanie, jako bieżących danych dla sieci parametrów, które są zapisywane na rejestratorach pokładowych obecnie seryjnie produkowanych śmigłowców.

Tab. 3. Zbiór kolejnych sieci wyznaczających wartość maksymalną momentu sterowania

	Typ	Wejścia	Ukryte neurony	Błąd uczenia	Błąd walidacji	Jakość uczenia	Jakość walidacji
01x	MLP	1	1	76.15159	79.18956	0.9999586	1.000076
02x	MLP	1	1	76.14725	79.17818	0.9997994	0.9999655
03x	MLP	1	1	76.1565	79.17776	1.000024	0.9998972
04x	MLP	3	4	58.25555	60.90574	0.7637951	0.7684972
05x	MLP	3	4	56.42634	59.41141	0.7409394	0.7503256
06x	MLP	5	2	40.75711	42.33608	0.5351591	0.5343232
07x	MLP	5	2	40.44488	42.26987	0.5310881	0.5334116
08x	MLP	4	8	37.20499	39.2514	0.4885451	0.4956099
09x	MLP	4	8	36.67188	38.85859	0.4815448	0.4906721
10x	MLP	5	3	35.5929	37.30747	0.4673427	0.4710091
11x	MLP	5	3	35.4094	37.15873	0.4649669	0.468724
12x	MLP	5	6	27.79276	29.5928	0.3649515	0.3730514
13x	MLP	5	6	28.02448	29.53605	0.3679392	0.3729827
14x	MLP	6	13	19.12112	19.88373	0.2510798	0.2511143
15x*	MLP	6	13	18.62976	19.78549	0.2446299	0.2498275

Uwaga: w tabelach 4-6 zamieszczono wyniki dotyczące sieci numer 15x o strukturze perceptronu z 6 neuronami wejściowymi i 13 neuronami w warstwie ukrytej.

Tab. 4. Zestawienie statystyk regresyjnych dla sieci numer 15x wyznaczającej wartość maksymalną momentu sterowania

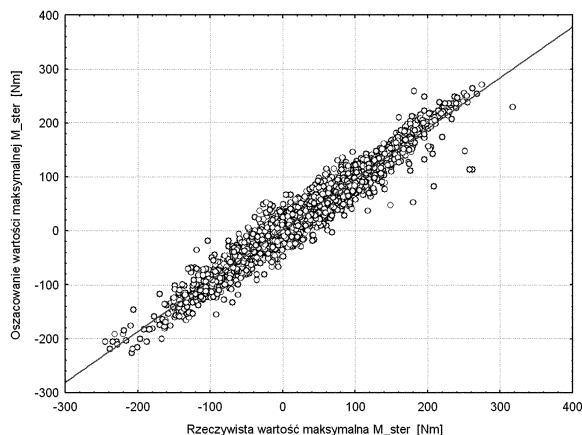
	Uczenie M_{ster_maks}	Walidacja M_{ster_maks}
Średnia	31,71646	32,61798
Odczylenie standardowe	76,17814	79,20473
Średni błąd	0,04489	-0,401
Odczylenie standardowe błędu	18,63545	19,78752
Średni błąd bezwzględny	13,72241	14,43932
Iloraz odchyleń standardowych	0,2446299	0,2498275
Korelacja	0,969624	0,9683263

Tab. 5. Analiza wrażliwości sieci numer 15x wyznaczającej wartość maksymalną momentu sterowania na uwzględnienie poszczególnych zmiennych

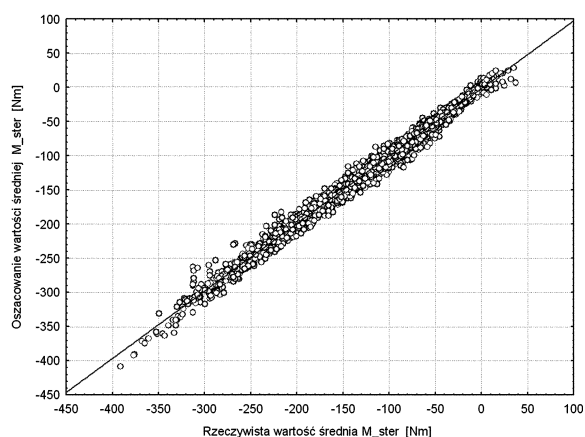
Zmienna	VX	VZ	ALFW	TETX	TETY	FIO	
Zbiór uczący	ranga	5	4	3	6	1	2
	błąd	37,7408	39,62121	42,4899	32,28518	57,12597	52,85527
Zbiór walidacyjny	ilorz	2,025833	2,126769	2,280754	1,732989	3,066382	2,837141
	ranga	5	4	3	6	1	2
Zbiór walidacyjny	błąd	38,31299	38,74486	43,52026	34,46761	59,42081	52,7725
	ilorz	1,936419	1,958247	2,199605	1,742066	3,003252	2,667233

Tab. 6. Przykład wyników oszacowania wartości maksymalnej momentu sterowania łopaty przez sieć numer 15x

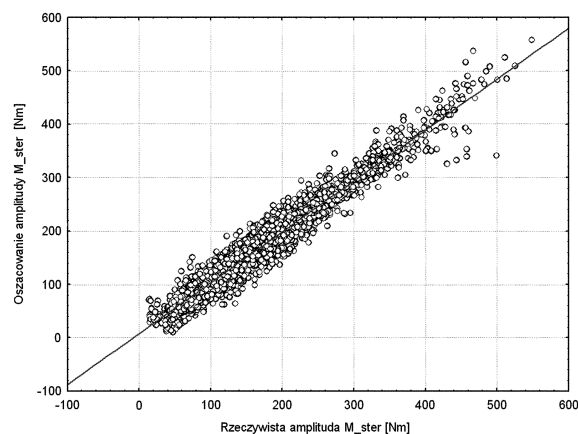
Przypadek	Oszacowanie wartości parametru	Rzeczywista wartość parametru	Błąd oszacowania wartości
01	181,3597	156,335	25,02467
02	127,1359	85,808	41,32795
03	116,7176	113,26	3,457585
04	146,9561	150,82	-3,86387
05	174,1358	164,813	9,322801
06	169,0703	151,276	17,79426
07	122,0643	79,935	42,12932
08	116,7193	113,341	3,378266
09	148,2083	151,058	-2,849666
10	175,3419	166,923	8,418857



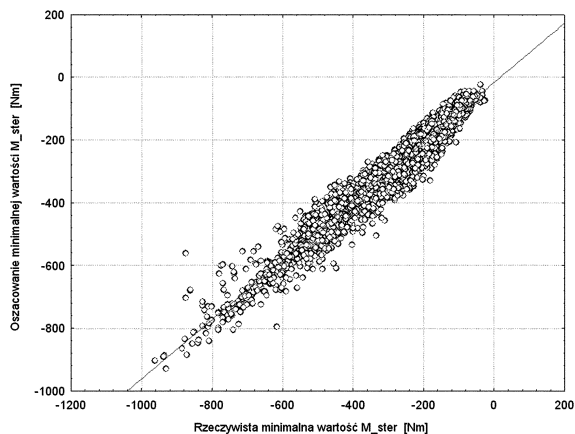
Rys. 15. Rozrzut wyników oszacowanych przez sieć neuronową (MLP 6-13-1) i obliczeniowych danych rzeczywistych dla wartości maksymalnej momentu sterowania łopaty (sieć numer 15x – tab. 3+6).



Rys. 16. Rozrzut wyników oszacowanych przez sieć neuronową (MLP 6-11-1) i obliczeniowych danych rzeczywistych dla wartości średniej momentu sterowania łopaty



Rys. 17. Rozrzut wyników oszacowanych przez sieć neuronową (MLP 6-12-1) i obliczeniowych danych rzeczywistych dla amplitudy momentu sterowania łopaty



Rys. 18. Rozrzut wyników oszacowanych przez sieć neuronową (MLP 6-11-1) i obliczeniowych danych rzeczywistych dla wartości minimalnej momentu sterowania łopatką

Tab. 7. Zbiór kolejnych sieci wyznaczających wartość średnią momentu gnącego korpus piasty

	Typ	Wejścia	Ukryte neurony	Błąd uczenia	Błąd walidacji	Jakość uczenia	Jakość walidacji
01s	MLP	1	1	55,02119	58,07302	0,7674077	0,7824192
02s	MLP	2	1	46,57566	46,96623	0,6506769	0,6327907
03s	MLP	3	2	38,4232	39,94782	0,5367845	0,538239
04s	MLP	3	6	33,29841	34,95441	0,4651895	0,4703471
05s	MLP	4	1	22,79048	24,72991	0,3175555	0,3330368
06s	MLP	4	3	21,05466	23,26272	0,2941348	0,3132367
07s	MLP	5	3	10,84883	11,3015	0,1515592	0,1519781
08s	MLP	5	3	10,73857	11,13903	0,1500202	0,1498683
09s	MLP	5	9	9,256312	9,626722	0,1293136	0,129507
10s	MLP	5	9	8,979039	9,341256	0,125421	0,1257267
11s	MLP	6	8	5,080486	5,403601	0,07097	0,07262
12s	MLP	6	10	4,43591	4,872676	0,06197	0,06556
13s	MLP	6	7	4,164246	4,640246	0,05818	0,0622572
14s	MLP	6	7	3,718592	4,034398	0,05195	0,05424
15s	MLP	6	7	3,616254	4,01471	0,05051	0,05401
16s	MLP	6	7	3,180323	3,456027	0,04443	0,04652
17s	MLP	6	9	3,094093	3,41006	0,04323	0,0459
18s	MLP	6	8	3,159924	3,406023	0,04415	0,04584
19s	MLP	6	10	2,901917	3,206644	0,04054	0,04314
20s*	MLP	6	9	2,915319	3,164807	0,04073	0,04263

Uwaga: w tabelach 8÷10 zamieszczono wyniki dotyczące sieci numer 20s o strukturze perceptronu z 6 neuronami wejściowymi i 9 neuronami w warstwie ukrytej

Tab. 8. Zestawienie statystyk regresyjnych dla sieci numer 20s wyznaczającej wartość średnią momentu gnącego korpus piasty

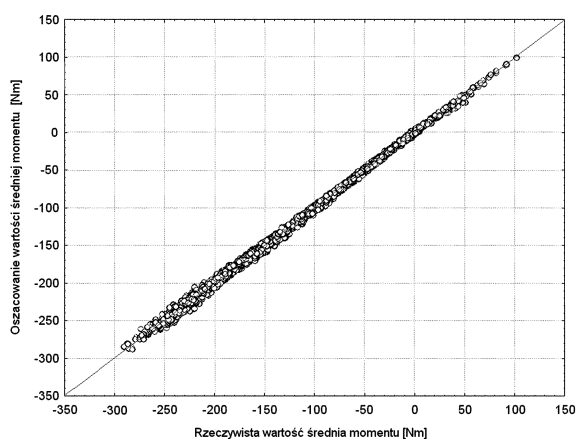
	Uczenie W209K4_S	Walidacja W209K4_S
Średnia	-135,086	-139,1273
Odchylenie standardowe	71,60237	74,24012
Średni błąd	-0,0347	0,08106
Odchylenie standardowe błędu	2,916011	3,164744
Średni błąd bezwzględny	2,190647	2,40554
Iloraz odchyleń standardowych	0,04073	0,04263
Korelacja	0,9991704	0,9990915

Tab. 9. Analiza wrażliwości sieci numer 20s wyznaczającej wartość średnią momentu gnącego korpus piasty na uwzględnienie poszczególnych zmiennych

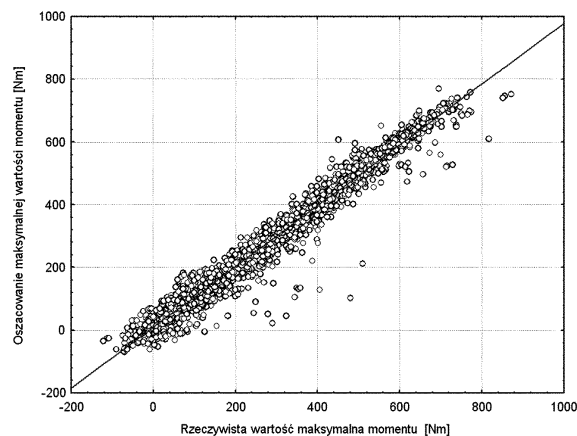
Zmienna	VX	VZ	ALFW	TETX	TETY	FIO	
Zbiór uczący	ranga	5	3	2	6	4	1
	błąd	21,28326	33,26869	34,76969	8,51665	31,07895	57,93752
	iloraz	7,30049	11,41168	11,92655	2,921344	10,66056	19,87348
Zbiór walidacyjny	ranga	5	3	2	6	4	1
	błąd	23,71023	32,97996	35,951	8,78261	31,5408	58,08548
	iloraz	7,491842	10,42084	11,35962	2,775085	9,966107	18,35356

Tab. 10. Przykład wyników oszacowania wartości średniej momentu gnącego korpus piasty przez sieć numer 20s.

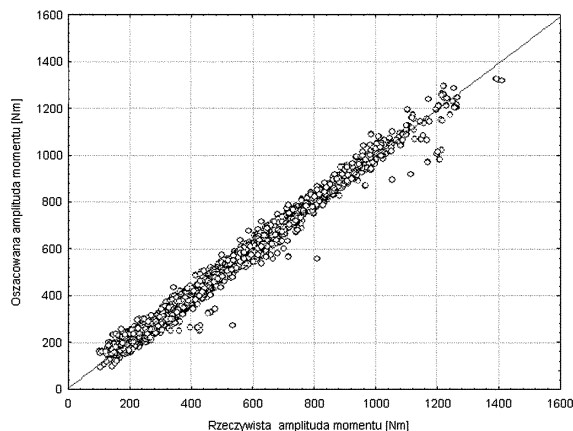
Przypadek	Oszacowanie wartości parametru	Rzeczywista wartość parametru	Błąd oszacowania wartości
910	-57,53383	-58,3	0,7661671
911	-109,9062	-109,12	-0,7862
912	-164,7578	-162,06	-2,697763
913	-200,0711	-198,68	-1,391078
914	-216,7743	-216,14	-0,6343
915	-73,50435	-74,5	0,9956514
916	-125,7207	-124,91	-0,810717
917	-178,7614	-177,2	-1,561426
918	-212,0565	-212,54	0,4835088
919	-227,5625	-226,37	-1,192488



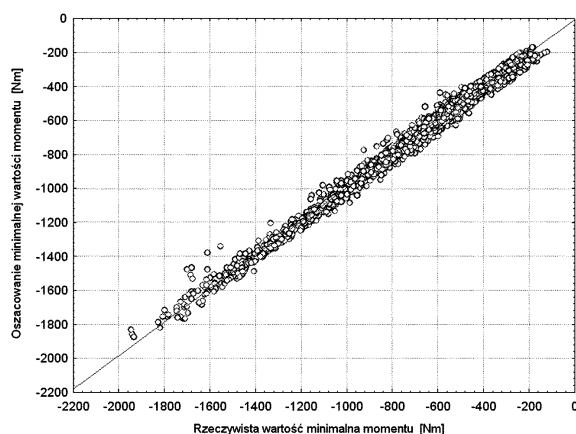
Rys. 19. Rozrzut wyników oszacowanych przez sieć neuronową (MPL 6-9-1) i obliczeniowych danych rzeczywistych dla wartości średniej momentu gnącego korpus piasty (sieć numer 20s – tabele 6÷10)



Rys. 20. Rozrzut wyników oszacowanych przez sieć neuronową (MLP 6-13-1) i obliczeniowych danych rzeczywistych dla wartości maksymalnej momentu gnącego korpus piasty



Rys. 21. Rozrzut wyników oszacowanych przez sieć neuronową (MLP 6-10-1) i obliczeniowych danych rzeczywistych dla amplitudy momentu gnącego korpus piasty



Rys. 22. Rozrzut wyników oszacowanych przez sieć neuronową (MLP 6-12-1) i obliczeniowych danych rzeczywistych dla wartości minimalnej momentu gnącego korpus piasty

5. PODSUMOWANIE

Program symulacyjny dotyczący wyznaczania obciążeń wirnika nośnego śmigłowca wykorzystano do zgromadzenia danych umożliwiających przeprowadzenie treningu sieci neuronowych mających za zadanie wspomagać działanie pilota poprzez dostarczanie informacji o aktualnym stanie wiropłata lub o zbliżaniu się do ograniczeń eksploatacyjnych.

Przeprowadzono treningi sieci neuronowych realizujących zadania oszacowania wielkości składowych obciążenia wirnika (moment sterowania łopaty, moment gnący korpus głowicy w płaszczyźnie ciągu) na podstawie parametrów stanu lotu.

Wynik treningu sieci neuronowej oceniano na podstawie wartości współczynnika jakości. Dla sieci regresyjnej, której wynikiem jest wartość liczbową, współczynnik jakości określa się jako iloraz odchylenia standardowego dla błędu oszacowania przez sieć wartości zmiennej wynikowej oraz odchylenia standardowego dla wartości zmiennej wynikowej prezentowanej sieci w zbiorze danych. Przyjmuje się, że sieć neuronowa dobrze realizuje zadanie regresyjne, jeśli iloraz odchyżeń standardowych osiąga wartości mniejsze od 0,1. Mniej dokładne wyniki oszacowania uzyskano dla sieci określających wielkości maksymalnych wartości momentów występujących w trakcie obrotu wirnika. Wyniki działania

sieci można wiązać ze zbyt małą liczbą danych w zbiorach do treningu odwzorowujących zmiany obciążeń w przypadku wystąpienia strefy oderwań na tarczy wirnika. Można spodziewać się poprawy wyników działania sieci po uściśleniu danych uczących.

Na podstawie badań symulacyjnych można przyjąć, że wyposażenie śmigłowców w pokładowe urządzenia wykorzystujące kody sieci neuronowych pozwoli uzyskać w czasie rzeczywistym, w trakcie lotu informacje pomagające w zachowaniu bezpiecznych granic eksploatacji. W przypadku oceny wielkości obciążeń wirnika, wskaźnik z wprowadzonym kodem sieci może informować pilota o zbliżaniu się lub przekroczeniu poziomu ograniczeń.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **Tadeusiewicz R.:** *Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami.* Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1998.
- [2] **Tadeusiewicz R.:** *Sieci neuronowe.* Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1993.
- [3] **McCool K., Morales M.A., Haas D.J.:** *Neural Network Based Low-Airspeed Sensor.* Journal of American Helicopter Society, vol.47, nr 3, July 2002.
- [4] **Goff D.A., Thomas S.M., Jones R.P., Massey C. P.:** *Predicting Airspeed and Sideslip Angle Using an Artificial Neural Network.* American Helicopter Society 55th Annual Forum, Montreal, Canada, May 25-27, 1999.
- [5] **Morales M.A., Haas D.J.:** *Feasibility of Aircraft Gross Weight Estimation Using Neural Network.* American Helicopter Society 57th Annual Forum, Washington DC, May 9-11, 2001.
- [6] **Chojnacki P., Lipski J.:** *Modelowanie obciążeń w elementach mocowania przekładni głównej śmigłowca SW-4 przy użyciu sztucznych sieci neuronowych.* V Krajowe Forum Wiroplątowe. Warszawa, 17-18 październik 2003.
- [7] **STATISTICA Neural Network:** *Kurs użytkownika programu na przykładach.* Statsoft Polska, Kraków, 2001.
- [8] **STATISTICA Neural Network:** *Przewodnik problemowy.* Statsoft Polska, Kraków, 2001.

APPLYING NEURAL NETWORKS TO ASSESS
THE LOADING OF A LIFTING ROTOR

Summary

The application of a neural network will enable, through more accessible measurable data such as flight velocity and deflection of the flight controls, the evaluation of parameter values more difficult to measure, which are not registered during standard operation of the helicopter. The task of continuous estimation of loads and reserves to obtain maximum operating conditions, can be performed by a neural network. The results of neural networks signifying amplitudes and average values of the blade pitch control moment and rotor hub bending moment are presented in the form of charts of the distribution of simulated data in comparison with values from the estimate of a given parameter performed by the network.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОНОВЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ НЕСУЩЕГО ВИНТА

Резюме

Применение нейронной сети позволит на основании таких легко измеряемых параметров как скорость полёта и положение органов управления определить параметры которые труднее померить и которые во время нормальной эксплуатации вертолёт не регистрируются. Задачу актуального контроля нагрузки несущего винта и определения уровня запаса по эксплуатационным ограничениям может выполнять нейронная сеть. Результаты действия выученных нейронных сетей определяющих амплитуды и средние значения момента управления лопастью винта и момента изгибающего корпус втулки??? несущего винта представлены в форме графиков показывающих разницу между результатами классических вычислений и результатами эстимации данного параметра полученными с помощью нейронных сетей.