

# Analiza zmiany parametrów turbin farmy wiatrowej przyłączanej do sieci dystrybucyjnej

## Analysis of parameter changes of a wind farm turbine being connected to a distribution network

Wymagania związane z ochroną środowiska naturalnego w szczególności sposób wpływają na zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii. W Polsce szczególnie wyróżnia się popyt na energetykę wiatrową. Jak w przypadku każdej elektrowni, tak również elektrownie wiatrowe muszą znaleźć swoje miejsce w systemie elektroenergetycznym, gdzie wytworzona energia elektryczna jest przesyłana i rozdzielana do odbiorców końcowych. Praktyka elektrowni wymaga jej synchronicznego połączenia z systemem elektroenergetycznym. Wzrost zainteresowania źródłami wiatrowymi spowodował znaczną liczbę wniosków o wydanie warunków przyłączenia kierowanych przez potencjalnych inwestorów do właściwego operatora systemu (operatora systemu dystrybucyjnego bądź operatora systemu przesyłowego).

Proces przyłączania źródła wiatrowego (farmy wiatrowej) do systemu elektroenergetycznego reguluje rozporządzenie systemowe [5] oraz właściwe instrukcje ruchu i eksploatacji sieci [3, 4]. Przyłączenie jednostki wytwórczej do sieci wymaga przygotowania i przeprowadzenia ekspertyzy wpływu przyłączanych instalacji na system elektroenergetyczny. Zakres ekspertyzy i wymagania ustala operator, na którego obszarze działań ma nastąpić przyłączenie do sieci. Ekspertyza ta obejmuje m.in. rozprawy prądów i mocy w stacjach ustalonych, weryfikację poziomów napięć, prądów zwarciovych, jakości napięcia czy też analizę oddziaływania dynamicznego farmy wiatrowej na system elektroenergetyczny. Pozytywna ocena ekspertyzy oraz możliwości technicznych przyłączenia do sieci elektroenergetycznej pozwalają na określenie warunków przyłączenia do sieci. Właściwi dla miejsca przyłączenia operator systemu określa w warunkach przyłączenia szczegółowe wymagania dla każdej farmy wiatrowej. Warunki te są związane z mocą farmy, jej lokalizacją w sieci oraz z wynikami wykonanej ekspertyzy przyłączeniowej.

Pozyskanie warunków przyłączenia pozwala na kontynuację procesu przyłączenia do sieci. Z uwagi na upływ czasu w trakcie realizacji tego procesu, jak i postęp technologiczny oraz bieżące warunki pozyskania odpowiednich instalacji (np. turbin wiatrowych) może dojść do sytuacji, w której zawarte umowy na dostawę wyposażenia farmy wiatrowej nie będą tożsame z wstępnie przewidywanymi

urządzeniami. W takiej sytuacji, o ile nie nastąpi zmiana (w szczególności zwiększenie) mocy przyłączanej farmy wiatrowej (co będzie wymagało kolejnej ekspertyzy), można zweryfikować jedynie wpływ zmiany parametrów urządzeń na system elektroenergetyczny. Poniżej przedstawiono wybrane aspekty przeprowadzonych w tym kierunku badań.

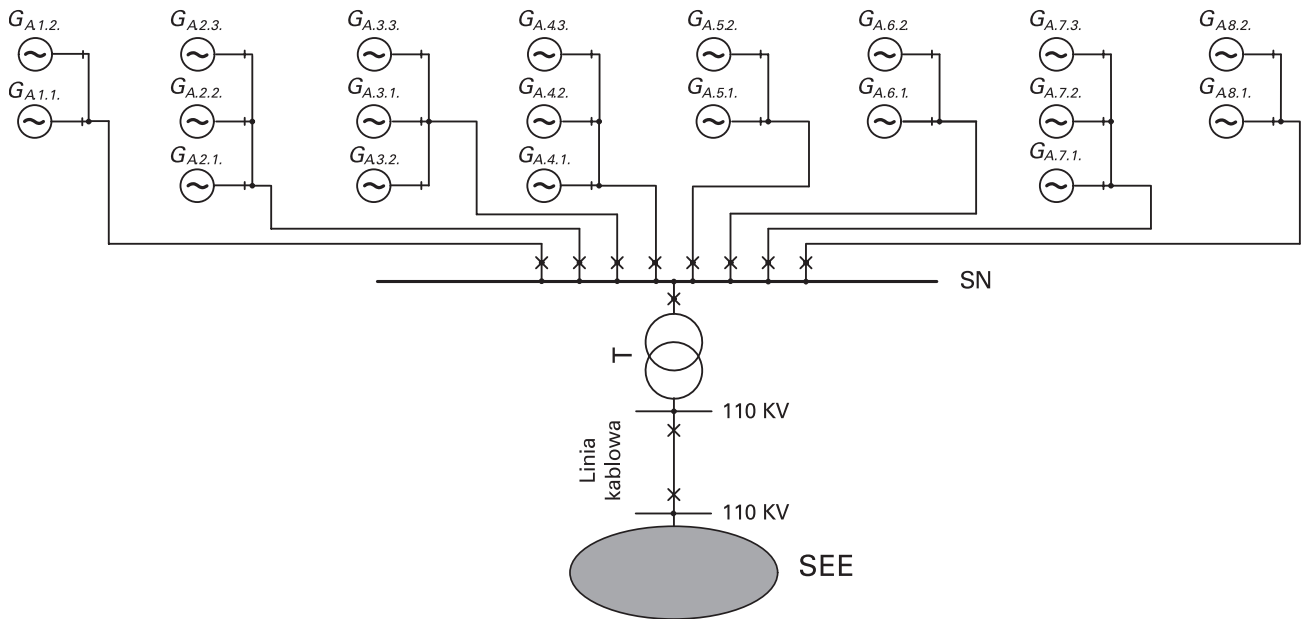
### Obiekt analizy

W niniejszym artykule przedstawiono badania wykonane w związku ze zmianą parametrów turbin farmy wiatrowej planowanej do przyłączenia do krajowego systemu elektroenergetycznego (KSE). Należy zaznaczyć, że dla badanej farmy wiatrowej (FW) została wykonana i zaakceptowana przez operatora systemu dystrybucyjnego (OSD) ekspertyza przyłączeniowa. Zmiany parametrów odnoszone są zatem do wykonanej ekspertyzy.

Analizie poddano farmę wiatrową o mocy 60 MW. Przyjęto, że planowana farma wiatrowa składać się będzie z 30 siłowni wiatrowych o mocy znamionowej 2 MW każda. W planach inwestycyjnych zakładano, że na farmie FW wykorzystane zostaną siłownie wiatrowe określonego typu (typ A). W efekcie zmian realizacyjnych wystąpiła potrzeba korekty przyjętych założeń i rozpatrzenia wpływu innego typu turbin wiatrowych na uzyskane wyniki i współpracę z siecią. Rozpatrzono zatem inny typ turbin wiatrowych (typ B zastępujący typ A), przy czym nie uległa zmianie sumaryczna moc czynna przewidziana pierwotnie dla farmy (tj. 60 MW).

W badanych warunkach przyjęto, że zmienia się moc pojedynczej turbiny (z 2 MW na 3 MW). Wymusza to zmianę liczby turbin planowanych do zainstalowania oraz rekonfigurację struktury sieci wewnętrznej FW. W związku z powyższym – w odniesieniu do zaakceptowanej ekspertyzy przyłączeniowej – zmianie ulegną parametry ciągów kablowych SN łączących turbiny wiatrowe z GPZ FW, liczba transformatorów mocy i konfiguracja szyn zbiorczych w GPZ FW oraz parametry linii wyprowadzenia mocy z FW.

Dla nowych warunków sumaryczna liczba turbin wiatrowych planowanych do zainstalowania na FW wynosi 20,



Rys. 1. Struktura badanej sieci FW (z turbinami o mocy 3 MW)

co daje moc znamionową farmy 60 MW (20x3 MW). Turbiny wiatrowe (typ B) planuje się połączyć w 8 grup liczących po dwie lub trzy turbiny. Poszczególne grupy zostaną przyłączone do szyn SN GPZ FW za pomocą ciągów kablowych SN (rys. 1).

Przyłączenie analizowanej FW do KSE jest przewidywane za pomocą linii kablowej WN.

### Parametry turbin

Na podstawie danych katalogowych przeprowadzono porównanie parametrów technicznych turbin wiatrowych typu A oraz typu B. Z przeprowadzonego porównania wynika, że obie turbiny posiadają wiele wspólnych cech, np. taki sam typ zastosowanego generatora, zbliżone układy regulacji oraz systemy umożliwiające pracę autonomiczną turbiny z optymalną produkcją mocy lub zdalną regulacją parametrów pracy turbiny. Występujące różnice pomiędzy porównywanymi turbinami wiatrowymi dotyczą przede wszystkim:

- **średnicy wirnika oraz wartości mocy znamionowej;** większa średnica wirnika turbiny typu B przekłada się na większą o 1 MW moc tej turbiny, co rzutuje na liczbę siłowni wiatrowych oraz ich rozmieszczenie;
- **zakresu regulacji współczynnika mocy;** turbina wiatrowa typu B wykazuje większy zakres możliwości produkcji mocy biernej, co umożliwia szerszy zakres regulacji współczynnika mocy; przekłada się to również na większe możliwości regulacji napięcia w miejscu przyłączenia FW; w celu jednak optymalnego wykorzystania zdolności turbiny wiatrowej typu B do produkcji mocy biernej, napięcie na zaciskach generatora turbiny powinno się mieścić w wąskim zakresie wartości, tj. przykładowo  $\pm 5\%$  w odniesieniu do wartości znamionowej; optymalnym trybem regulacji dla tej turbiny jest więc praca z zadaną wartością napięcia mieszczącą się w „pobliżu” wartości znamionowej;

- **napięcia znamionowego uzwojenia stojana generatora oraz napięcia „na wyjściu” turbiny wiatrowej;** cechą charakterystyczną generatora turbiny wiatrowej typu B jest stosunkowo wysoka wartość napięcia znamionowego uzwojenia stojana, która jest ok. 17 razy większa od napięcia znamionowego uzwojenia stojana generatora turbiny A; generacja mocy na poziomie średniego napięcia w wielu przypadkach eliminuje potrzebę stosowania transformatorów blokowych i przez to zmniejsza koszty inwestycyjne oraz może zmniejszyć straty mocy; rozwiązanie takie jest szczególnie korzystne dla turbin wiatrowych zainstalowanych w pobliżu stacji elektroenergetycznej WN/SN farmy wiatrowej, gdyż wtedy straty związane z przesyłem energii na niższym napięciu mogą być niższe od strat generowanych w transformatorach blokowych; dzięki takiemu rozwiązaniu unika się również potencjalnych awarii transformatorów blokowych;
- **parametrów jakości generowanej energii elektrycznej;** wskaźniki charakteryzujące jakość energii elektrycznej przy pracy ciągłej dla turbiny wiatrowej typu A posiadają niższe wartości w porównaniu ze wskaźnikami turbiny typu B; wskaźniki charakteryzujące operacje łączeniowe turbiny wiatrowej są zbliżone do siebie w obydwu przypadkach, natomiast poziom emisji wyższych harmonicznych prądu przy różnych wartościach mocy generowanej dla turbiny wiatrowej typu B jest niższy;
- **zakresu pracy podczas stanów zakłóceń występujących w sieci;** turbina typu A oraz turbina typu B są przystosowane do pracy podczas zapadów napięcia występujących poza obszarem farmy wiatrowej, różnią się jednak dopuszczalnym obszarem pracy (przy zapadach napięcia); w przypadku turbiny A obszar ten jest szerszy dla dłuższych czasów; natomiast w krótkich okresach turbina typu B cechuje się znacznie większą odpornością na występujące zapady

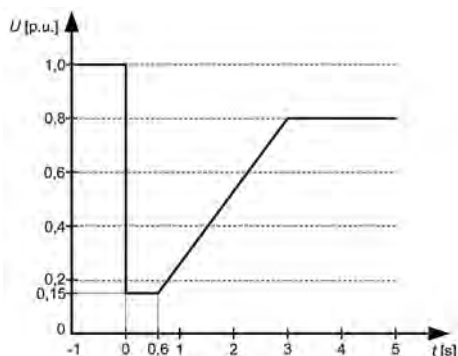
napięcia; podobna sytuacja występuje przy wzrostach napięcia; dodatkowo w awaryjnych stanach nadnapięciowych turbina wiatrowa typu B generuje prąd bierny indukcyjny, oddziałując w kierunku obniżenia napięcia i tym samym zwiększa „stabilność” pracy sieci.

### Analiza wpływu zmiany typu turbin na KSE

Na podstawie przeprowadzonego porównania parametrów turbin można zweryfikować ocenę oddziaływania badanej farmy wiatrowej na KSE. Weryfikacja ta powinna dotyczyć zarówno oddziaływań zewnętrznych (na KSE) jak i wewnętrznych (w obszarze sieci wewnętrznej FW). W artykule skupiono się przede wszystkim na oddziaływaniach wewnętrznych wyróżniając kwestie: pracy w stanach zakłóceń, jakości energii elektrycznej, kompensacji mocy biernej oraz automatyki zabezpieczeniowej. W poniższych podrozdziałach przedstawiono wybrane zagadnienia.

### Zachowanie się FW w stanach zakłóceńowych

Utrzymanie się w pracy farm wiatrowych podczas spadków napięcia występujących w KSE jest jednym z czynników wpływających na stabilność pracy układów sieciowych. Dlatego zarówno turbiny wiatrowe, jak i układy regulacyjne całej farmy wiatrowej muszą być dostosowane do utrzymania stabilnej współpracy z KSE podczas zwarć w sieci zewnętrznej. Zgodnie z IRIESP/IRIESD [3,4] farma wiatrowa powinna być przystosowana do utrzymania się w pracy w przypadku wystąpienia zakłóceń zwarciovych w sieci, skutkujących obniżeniem wartości napięcia w miejscu przyłączenia farmy wiatrowej do KSE o przebiegach czasowych znajdujących się powyżej krzywej zamieszczonej na rysunku 2.



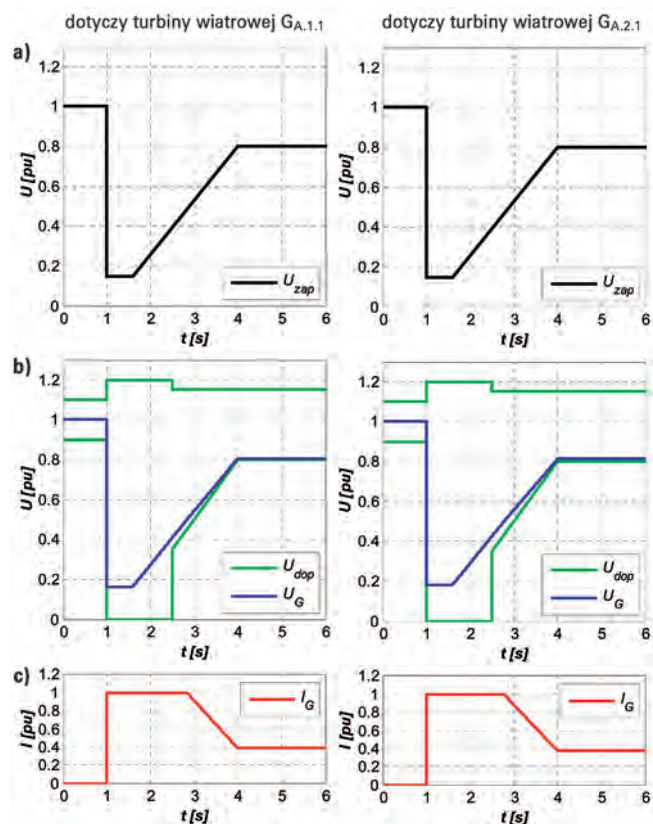
Rys. 2. Charakterystyka przebiegu napięcia warunkująca wymagany zakres pracy farmy wiatrowej w przypadku wystąpienia zakłóceń zwarciovych w sieci elektroenergetycznej [4]

Turbina wiatrowa typu B jest wyposażona w system i układy regulacji umożliwiające pracę w stanach zakłóceń zwarciovych. W przypadku spadków napięcia wywołanych zwarciem w sieci, działanie tego systemu automatyki polega na przejściu generatora turbiny do trybu pracy polegającego na generacji mocy biernej. Wówczas jest „wstrzykiwany” do sieci prąd pojemnościowy, co umożliwia zmniejszenie głębokości spadku napięcia. Prąd ten może osiągnąć

poziom prądu znamionowego generatora turbiny, przy czym wartość generowanego prądu jest zależna od występującego obniżenia wartości napięcia.

Weryfikacja spełnienia wymagań zawartych w IRIESP/IRIESD – dotyczących utrzymania się farmy wiatrowej w pracy podczas spadku napięcia w miejscu przyłączenia  $U_{zap}$  o przebiegu czasowym zgodnym z rysunkiem 2 – polegała na sprawdzeniu, czy występujące wówczas wartości napięcia na zaciskach generatorów pracujących turbin wiatrowych  $U_G$  zawierają się w dopuszczalnym obszarze pracy  $U_{dop}$  analizowanej turbiny.

W celu poprawnego odwzorowania zachowania się wymienionych turbin wiatrowych w stanach zakłóceńowych uwzględniono zależność wartości prądu pojemnościowego  $I_G$  generowanego przez turbiny od poziomu obniżenia napięcia na zaciskach generatorów tych turbin. Analizy wykonano dla najbardziej krytycznego scenariusza pracy FW, tj. samodzielnej pracy turbiny wiatrowej, dla której zastępcza impedancja sieci wewnętrznej jest najmniejsza – dotyczy to turbin wiatrowych  $G_{A,1.1}$  i  $G_{A,2.1}$  (rys. 1). Wybrane wyniki analiz zamieszczono na rysunku 3.



Rys. 3. Przebiegi wielkości elektrycznych przy pracy pojedynczej turbiny wiatrowej podczas spadku napięcia w miejscu przyłączenia:

- a) napięcie  $U_{zap}$  w miejscu przyłączenia FW;
- b) napięcie  $U_G$  na zaciskach generatora danej turbiny wiatrowej zestawione z dopuszczalnym obszarem pracy tej turbiny  $U_{dop}$ ;
- c) prąd  $I_G$  generowany przez daną turbinę wiatrową

Porównując przebiegi czasowe napięcia  $U_G$  na zaciskach generatora turbiny wiatrowej z dopuszczalnym obszarem

pracy  $U_{dop}$  turbiny wiatrowej stwierdza się, że – nawet przy samodzielnej pracy „krytycznych” turbin wiatrowych  $G_{A.1.1}$  bądź  $G_{A.2.1}$  – wartości napięcia  $U_G$  zawierają się w dopuszczalnym obszarze pracy  $U_{dop}$ . Oznacza to, że FW spełnia wymagania dotyczące utrzymania się w pracy podczas zwarć w sieci skutkujących zapadem napięcia w miejscu przyłączenia zgodnym z IRIESP/IRiESD (rys. 2).

### Bilans i kompensacja mocy biernej

W tabeli 1 przedstawiono bilans mocy biernej dla badanej FW w różnych stanach jej pracy. W bilansie tym uwzględniono generowane przez siłownie wiatrowe, linie kablowe i transformatory moce bierne oraz ich charakter. W tabeli 1 przyjęto wartości ujemne jako pobierane przez farmę wiatrową (moc bierna indukcyjna), natomiast wartości dodatnie jako generowane przez farmę wiatrową (moc bierna pojemnościowa).

**Tabela 1**

Bilans mocy czynnej i biernej w punkcie przyłączenia badanej FW do KSE dla różnych stanów pracy farmy

Stan pracy farmy	Moc czynna, MW	Moc bierna, Mvar	Współczynnik mocy w miejscu przyłączenia	Wymagany $\cos\phi$ (moc bierna)
$\Sigma P=0$ MW Pojedyncze siłownie: $P=0$ MW $Q=0$ Mvar	0	10,908	-	farma wyłączona
$\Sigma P=60$ MW Pojedyncze siłownie: $P=3,0$ MW $Q=0$ Mvar	57,249	-3,626	0,998 ind	$\cos\phi_{ind}$ w zakresie wymagań
$\Sigma P=60$ MW Pojedyncze siłownie: $P=3,0$ MW $Q=-1,2$ Mvar	56,672	-30,434	0,881 ind	$\cos\phi_{ind}$ szerszy niż wymagany
$\Sigma P=60$ MW Pojedyncze siłownie: $P=3,0$ MW $Q=1,2$ Mvar	56,929	18,509	0,951 poj	$\cos\phi_{poj}$ w zakresie wymagań

W tabeli 1 przedstawiono cztery skrajne stany pracy farmy. W pierwszym stanie farma jest wyłączona i moc bierna generowana do układu wynika z mocy pojemnościowej ładowania wewnętrznej sieci kablowej farmy. W drugim stanie FW pracuje z maksymalną generacją mocy czynnej, przy  $\cos\phi = 1$  poszczególnych turbin. Bilans w punkcie przyłączenia do KSE wynika z generacji farmy pomniejszonej o straty w liniach i transformatorach oraz z poboru mocy biernej na pokrycie tych strat. Współczynnik mocy wyznaczany w miejscu przyłączenia mieści się w zakresie wymaganiom. W stanie trzecim przyjęto maksymalną generację mocy czynnej przez farmę oraz założono pobór mocy biernej indukcyjnej przez farmę z układu. W stanie tym współczynnik mocy indukcyjny uzyskiwany w punkcie przyłączenia jest niższy niż wymagany (0,95 ind.), co oznacza, że zakres regulacji jest większy niż zalecany. W kolejnym stanie założono na turbinach maksymalną generację mocy czynnej

i biernej przy  $\cos\phi$  o charakterze pojemnościowym. W tym przypadku uzyskano dostawę mocy biernej pojemnościowej w punkcie przyłączenia. W efekcie współczynnik mocy jest tożsamy z zakresem wymagań (0,95 poj.). Zakres regulacyjności odpowiada zatem wymaganiom stawianym przez instrukcje ruchowe [3, 4].

### Jakość energii elektrycznej

Jednym z parametrów jakości energii elektrycznej są współczynniki uciążliwości migotania światła. Zgodnie z zaleceniami IRIESP oraz IRiESD w punkcie przyłączenia farmy wiatrowej do systemu elektroenergetycznego powinny zostać spełnione warunki dopuszczalne. Wartości dopuszczalne współczynników krótkookresowego  $P_{st}$  i długookresowego migotania światła (napięcia)  $P_{lt}$  farm wiatrowych przyłączonych do sieci zamkniętej nie powinny przekraczać odpowiednio wartości:

- średnio za okres 10 min: 0,35 dla skoordynowanej sieci 110 kV,
- średnio za okres 2 godz.: 0,25 dla skoordynowanej sieci 110 kV.

Współczynniki migotania światła wyznaczono dla pracy ciągłej farmy wiatrowej oraz dla operacji łączeniowych. Przeanalizowano przypadek pracy badanej FW przy minimalnych wartościach mocy zwarciovych określonych w miejscu przyłączenia. Moce zwarciovych w miejscu przyłączenia wyznacza się w układach bez rozważanej FW. Zmiana rodzajów turbin wiatrowych i topologia sieci wewnętrznej FW nie zmienia wartości mocy zwarciovych, przyjmowanych do analiz jakości napięcia. P rzykładowe uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 2.

**Tabela 2**

Oszacowane wartości współczynników migotania światła

$S_k'' (min)$	$\Psi_k$	$k_f$	$c(\Psi_k, V_d)$	$P_{std}$	$P_{ltd}$	$P_{st}$	$P_{lt}$
MVA	°	-	-	-	-	-	-
Praca ciągła							
368	74,12		4,58	0,35	0,25	0,171	0,171
Operacje łączeniowe przy startowej prędkości wiatru							
368	74,12	0,063		0,35	0,25	0,049	0,047
Operacje łączeniowe przy znamionowej prędkości wiatru							
368	74,12	0,11		0,35	0,25	0,042	0,082

Uzyskane wartości zarówno krótkookresowych jak i długookresowych współczynników migotania światła mieszczą się w zakresach dopuszczalnych.

### Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa

Typ i parametry turbin wiatrowych są jednym z czynników, które wpływają na warunki pracy sieci elektroenergetycznej w obrębie miejsca przyłączenia farmy wiatrowej. Determinują również poprawność funkcjonowania układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ)

obiektów sieciowych sieci zewnętrznej (dla rozpatrywanej FW sieć zewnętrzna jest siecią dystrybucyjną WN), a także dobór i nastawienia układów EAZ sieci wewnętrznej farmy wiatrowej. Zmiana turbin wiatrowych, w porównaniu z układem rozpatrywanym w ekspertyzie przyłączeniowej, wymaga ponownego oszacowania rodzaju i poziomu oddziaływań w aspekcie EAZ. Poniżej przedstawiono wybrane wyniki analiz oddzielnie dla sieci zewnętrznej operatora systemu właściwego dla miejsca przyłączenia oraz sieci wewnętrznej badanej FW, tj. linii kablowej wyprowadzenia mocy z FW łączącej GPZ FW z istniejącym GPZ, transformatora mocy i szyn zbiorczych w GPZ FW oraz linii kablowych łączących poszczególne turbiny wiatrowe.

#### Analiza wpływu zmiany turbin wiatrowych na funkcjonowanie układów EAZ sieci zewnętrznej

Analizując zmianę typu turbin wiatrowych wchodzących w skład FW należy dokładnie zbadać dokumentację techniczną. Zakres zawartych tam informacji określa skalę możliwych oddziaływań, wynikających z przyłączenia przedmiotowej farmy wiatrowej, na układy EAZ i automatykę SPZ sieci zewnętrznej w stosunku do oddziaływań odnoszących się do pierwotnie przewidzianego typu turbin wiatrowych.

W prezentowanym przykładzie przewiduje się, że przyłączenie FW do KSE może powodować (dla obu analizowanych typów turbin) następujące oddziaływania:

- nieprawidłową detekcję i eliminację zwarć przez zabezpieczenia odległościowe i ziemnozwarciowe zainstalowane na ciągach liniowych przyłączonych do szyn WN istniejącego GPZ (miejsca przyłączenia),
- utratę stabilności podczas działania automatyki SPZ 3f na liniach wokół miejsca przyłączenia przedmiotowej farmy wiatrowej,
- przekroczenie poziomu obciążalności długotrwałe do - puszczalnej linii przyłączonych do szyn WN istniejącego GPZ,
- konieczność rekonfiguracji i ponownej parametryzacji zabezpieczeń szyn zbiorczych WN i lokalnej rezerwy wyłącznikowej w istniejącym GPZ.

Szczegółowe przedstawienie przyczyn występowania wymienionych nieprawidłowości w działaniu układów EAZ sieci zewnętrznej powodowanych przyłączeniem FW do KSE oraz opis możliwych skutków niewłaściwych reakcji automatyki zabezpieczeniowej zamieszczono w [1, 2].

#### Analiza wpływu zmiany turbin wiatrowych na układy EAZ sieci wewnętrznej FW

Zmiana typu turbin wiatrowych wchodzących w skład badanej FW w niniejszym przypadku wiąże się ze zwiększeniem wartości mocy znamionowej pojedynczej siłowni wiatrowej. Wymusza to zatem redukcję liczby turbin wiatrowych przewidzianych do zainstalowania, a tym samym rekonfigurację struktury sieci wewnętrznej łączącej poszczególne siłownie wiatrowe. Determinuje to konieczność ponownej parametryzacji układów automatyki zabezpieczeniowej linii kablowych sieci wewnętrznej FW. Jeśli rekonfiguracja sieci wewnętrznej farmy wiatrowej wiąże się ze zmianą liczby

pól szyn SN GPZ FW należy skontrolować i – ewentualnie – zmodyfikować nastawienia zabezpieczeń chroniących wymienione szyny. Ponieważ wartość mocy znamionowej farmy wiatrowej nie ulega zmianie można stwierdzić, że zmiana typu turbin wiatrowych nie wymusza przeprowadzenia ponownego doboru układów EAZ linii wyprowadzenia mocy z FW, układów EAZ szyn WN GPZ FW oraz układów EAZ transformatora mocy GPZ FW.

#### Uwagi końcowe w zakresie układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej

Poniżej zestawiono wyniki analiz wpływu zmiany typu turbin wiatrowych przewidzianych do zainstalowania na badanej FW na automatykę zabezpieczeniową i restytucyjną sieci WN oraz układy EAZ obiektów elektroenergetycznych w obrębie GPZ FW i linii wyprowadzenia mocy. Opierając się na wynikach wykonanych analiz oraz informacjach zamieszczonych w dokumentacjach technicznych urządzeń przygotowano zestawienie obiektów sieciowych, dla których przewiduje się, że zmiana typu turbin wiatrowych może w sposób istotny wpływać na układu automatyki elektroenergetycznej (tab. 3).

Tabela 3

Wpływ zmiany typu turbin wiatrowych przewidzianych do zainstalowania na FW na elektroenergetyczną automatykę zabezpieczeniową i restytucyjną analizowanego układu

Wyszczególnienie		Skala wpływu zmiany typu turbin wiatrowych na automatykę elektroenergetyczną
Sieć WN		pomijalny
Linia wyprowadzenia mocy z FW		pomijalny
GPZ FW	szyny WN	pomijalny
	transformacja WN/SN	pomijalny
	szyny SN	znaczący*
Linie kablowe sieci wewnętrznej FW		znaczący*

\* z uwagi na podział własności majątku, w tym przynależność sieci wewnętrznej farmy, kwestie te pozostają w gestii właściciela farmy

#### Podsumowanie

Wprowadzenie zmian w planowanej do przyłączenia do KSE farmie wiatrowej już po uzyskaniu warunków przyłączenia nie musi oznaczać ponownego wystąpienia o takie warunki. Jak przedstawiono na niniejszym przykładzie zmiana typu turbin wiatrowych wymaga weryfikacji jedynie w pewnych obszarach analitycznych oddziaływania na system elektroenergetyczny. Występujące różnice pomiędzy porównywanymi turbinami wiatrowymi dotyczą przede wszystkim: mocy znamionowej, zakresu regulacji współczynnika mocy, napięcia „na wyjściu” turbiny wiatrowej, parametrów jakości generowanej energii elektrycznej oraz dopuszczalnego zakresu pracy podczas stanów zakłócenowych występujących w sieci. Przeanalizowanie oddziaływań tych parametrów prowadzi do skorygowania pierwotnie przewidywanych układów pracy sieci wewnętrznej farmy,

nastaw automatyki zabezpieczeniowej oraz aktywowania odpowiednich funkcji sterowników turbin. W efekcie inwestycja może być kontynuowana w ramach uzyskanych warunków przyłączenia.

#### LITERATURA

- [1] Halinka A., Szablicki M.: Wpływ sposobu przyłączenia farm wiatrowych do sieci dystrybucyjnej WN na działanie zabezpieczeń odległościowych. „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, nr 8
- [2] Halinka A., Rzepka P., Szablicki M., Szewczyk M.: Przyłączenie farm wiatrowych – potrzeba nowego podejścia do sposobu funkcjonowania automatyki elektroenergetycznej sieci WN. „Przegląd Elektrotechniczny” 2011, nr 9a

- [3] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. Oprac. Operator Systemu Dystrybucyjnego
- [4] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej. Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci. PSE Operator SA
- [5] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dz. U. nr 93, poz. 623 z roku 2007 (z późniejszymi zmianami)



Krzysztof Dragan<sup>1)</sup>, Michał Dziendzikowski, Michał Stefaniuk  
*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych*

## Zintegrowane środowisko obliczeniowe do ultradźwiękowej diagnostyki obrazowej materiałów kompozytowych

### Integrated computing environment for ultrasonic imaging of composites

Badania nieniszczące w licznych przypadkach dostarczają danych dotyczących stanu struktury w postaci obrazów. Wykorzystanie obrazów jest szczególnie efektywne w przypadku diagnostyki powłokowych konstrukcji kompozytowych. Elementy kompozytowe narażone są na wystąpienie krytycznych uszkodzeń w postaci rozwarstwień, odklejeń czy też pęknięcia włókien lub pęknięcia osnowy, które mogą rozwijać się w trakcie eksploatacji konstrukcji. Wykazano, że nawet ledwo widoczne uszkodzenia powstałe wskutek uderzeń o niskiej energii (BVID – ang. Barely Visible Impact Damage), mogą pod wpływem cyklicznych obciążeń osiągnąć znaczne rozmiary. Jednakże, zgodnie z koncepcją tolerowanego uszkodzenia, struktury ze znacznymi obszarami odklejeń i rozwarstwień mogą zostać dopuszczone do eksploatacji – konieczne jest jednak posiadanie jasno określonych kryteriów wystąpienia krytycznego uszkodzenia.

W niniejszym artykule opisano metodykę tworzenia środowiska decyzyjnego, które mogłoby wspomóc eksploatację

konstrukcji kompozytowych, zarówno w lotnictwie jak i w energetyce (w szczególności odnawialnej).

#### Uszkodzenia materiałów kompozytowych oraz diagnostyka BN

Zastosowanie kompozytów w energetyce jest szczególnie istotne w przypadku turbin wiatrowych. Ze względu na podobieństwo konstrukcji oraz wymiary i środki produkcyjne metody ich diagnostyki pokrywają się w dużej części z tymi stosowanymi w lotnictwie. Wraz z rozwojem elektrowni wiatrowych pojawiają się zagadnienia strukturalne powodujące pewne trudności w eksploatacji tych urządzeń. Wzrost rozmiarów łopat i praca turbin w coraz trudniejszych warunkach rodzi konieczność optymalizacji konstrukcji, aby zminimalizować jej ciężar, zapewniając przy tym odpowiednią sztywność oraz trwałość zmęczeniową w obliczu złożonego zespołu obciążeń przy zachowaniu niskich kosztów. Ze względu na charakter wytwarzania materiałów kompozytowych istotnym zagadnieniem kontroli jakości jest wykrywanie wewnętrznych defektów już na etapie produkcji. Zważywszy na niepewność związaną z inspekcją i prognozowaniem zmęczeniowego zużycia materiałów kompozytowych

<sup>1)</sup> krzysztof.dragan@itwl.pl

pojawia się również potrzeba monitorowania struktury także w trakcie eksploatacji. Liczba typów uszkodzeń związanych z pracą łopaty turbiny wiatrowej jest znaczna, jednak większość ze spotykanych uszkodzeń można przedstawić za pomocą kombinacji niewielkiej liczby podstawowych typów.

Najważniejszymi rodzajami wad i uszkodzeń łopat kompozytowych, podobnie jak w strukturach lotniczych, są rozwarstwienia oraz odklejenia elementów poszycia od elementów siłowych lub wypełniaczy. W związku z tym do diagnozowania łopat turbin wiatrowych wykorzystuje się często klasycznie stosowane w lotnictwie metody badań, m.in. techniki impedancji mechanicznej (MIA), metody ultradźwiękowe. Metodami tymi można diagnozować także wszelkie inne defekty kompozytów, które mogą towarzyszyć zjawiskom odklejeń oraz rozwarstwień, np. wtrącenia materiałów obcych, obszary ubytków i nadatków żywicy czy pęknięcia włókien. Dokładne określenie umiejscowienia, rozmiaru oraz tempa wzrostu uszkodzenia, pozwala podjąć racjonalną decyzję o dalszej pracy łopaty i umożliwiła optymalizację kosztów przeglądu. W literaturze rozpatrzono przydatność niektórych metod nieniszczących stosowanych przez ITWL (metody ultradźwiękowe, MIA, termografia laserowa) do opisu uszkodzeń na łopatach turbin wiatrowych. Większość metod jest w stanie wykryć uszkodzenie, ilościowy opis rozmiaru uszkodzenia jest jednak tym trudniejszy im mniejsze (bardziej zbliżone do granicy możliwości detekcji) są wykryte uszkodzenia.

W niniejszym artykule opisano metodykę ilościowego opisu rozwarstwień powłokowej konstrukcji kompozytowej (skrzydła samolotu, łopaty turbiny wiatrowej) z wykorzystaniem zobrazowania C-Scan badań ultradźwiękowych oraz przedstawiono zarys opracowywanego przez ITWL zautomatyzowanego systemu prognozowania wytrzymałości i pozostałej trwałości eksploatowanych struktur kompozytowych.

### Zautomatyzowany system diagnostyki kompozytów

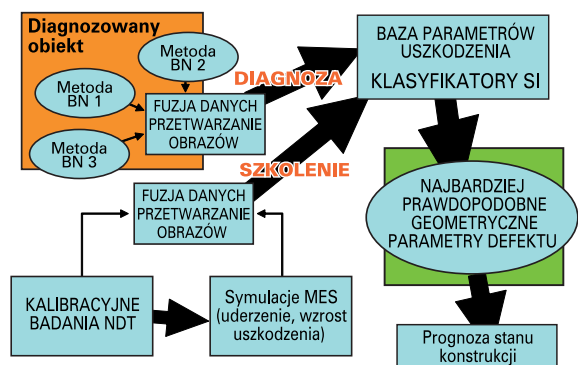
W związku z rosnącym zapotrzebowaniem przemysłu lotniczego oraz energetycznego na dokonywanie szybkiej i wiarygodnej diagnostyki konstrukcji kompozytowych autorzy proponują numeryczny system ekspercki mający wspomóc wspomnianą ilościową ocenę wykrytych uszkodzeń. Docelowo w proponowanym środowisku wykorzystana zostanie istniejąca infrastruktura oraz metodyki inspekcji i badań nieniszczących, jak również możliwe będzie wykorzystanie nowych metod pomiarowych.

Aparatura wykorzystywana w badaniach nieniszczących, takich jak termografia, badania ultradźwiękowe (wykorzystujące zobrazowanie C-Scan, B-Scan), metoda prądów wirowych przedstawia wyniki badań w postaci cyfrowych dwuwymiarowych obrazów, jako najłatwiejsze do przetwarzania i analizy przez operatora. Komputerowa wizualizacja pomiarów z badań nieniszczących pozwala na szybkie uzyskanie użytecznych, łatwych do interpretacji informacji z dużych zbiorów danych. Odpowiednie algorytmy cyfrowego przetwarzania i analizy obrazów zasilają proponowany system ekspercki aktualnymi (niekiedy niepełnymi) danymi na temat stanu technicznego struktury. Algorytmy te wspomóżone

zostaną metodami klasyfikacji statystycznej i mechanizmami wykrywania wzorców. Wszelkie zebrane w ten sposób informacje, które pozwolą na opisanie aktualnego stanu struktury, stanowiąc będą zbiór wyjściowy do numerycznych analiz wytrzymałościowych metodą elementów skończonych. Umożliwi to prognozowanie rozwoju rozwarstwień, pozwalając na bardziej precyzyjne i zautomatyzowane określenie pozostałego rezerwu (trwałości) danego elementu konstrukcji.

Główną metodą diagnostyczną wykorzystywaną w systemie będzie zobrazowanie C-Scan badań ultradźwiękowych, ze względu na znaczne doświadczenie ITWL w wykorzystaniu tej metody oraz na względną łatwość inspekcji rzeczywistych konstrukcji lotniczych. Jest to jedna z metod pomiarowych, dostarczających w krótkim czasie dokładnego i wiarygodnego opisu rozwarstwień i innych uszkodzeń. Opracowywany system wnioskowania połączy dostępne dane ze wszystkich źródeł pomiarów, ale przede wszystkim opierać się będzie na wynikach zaawansowanych obliczeń numerycznych. System ten opiera się na koncepcji bazy danych Cyfrowych Znaczników Uszkodzeń (ang. DDF – Digital Damage Fingerprints). Baza DDF z wykorzystaniem statystycznych metod klasyfikacji stanowiąc będzie mechanizm pozwalający na uzyskanie szczegółowych geometrycznych i materiałowych parametrów niezbędnych dla zautomatyzowanych analiz MES, aby docelowo umożliwić ilościową i niezależną od czynnika ludzkiego ocenę stanu uszkodzenia.

Schemat koncepcji systemu przedstawiono na rysunku 1. Na pierwszym etapie dane pomiarowe, najlepiej pochodzące z różnych typów badań NDT, zasilają moduły analizy, przetwarzania oraz fuzji danych. Przetwarzanie i analiza obrazów polegać będzie głównie na redukcji szumów, wykrywaniu krawędzi, rozpoznawaniu wzorców oraz klasyfikacji obiektów w taki sposób, aby uzyskać geometryczną parametryzację uszkodzeń. W następnym kroku, parametry kształtu wprowadzone zostaną do bazy DDF, na podstawie której określony zostanie zestaw danych o warunkach brzegowych, warunkach obciążenia, geometrii i danych materiałowych, które posłużą jako dane wejściowe do zautomatyzowanych modeli MES potrzebnych dla serii obliczeń wzrostu uszkodzenia. Taka budowa bazy danych oparta jest na koncepcji zaprezentowanej przez Su oraz Y e [3]. Klasyfikatory zastosowane w systemie zostaną wykalibrowane przy pomocy serii pomiarów testowych oraz wyników analiz numerycznych.



Rys. 1. Schemat środowiska obliczeniowego

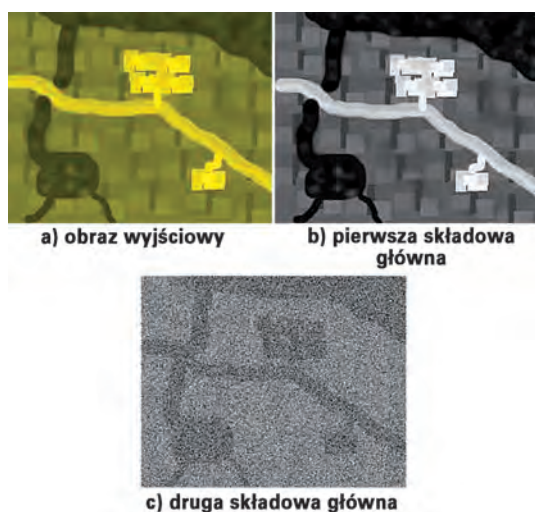
## Metody przetwarzania obrazu w badaniach nieniszczących

### Segmentacja obrazu

W celu uzyskania z obrazów dokładnej informacji na temat badanej struktury należy poddać je odpowiednim transformacjom. W typowych obrazach uzyskanych w trakcie rzeczywistych inspekcji występuje szereg niedogodności, takich jak występowanie szumu pomiarowego, obecności wtrąceń/zanieczyszczeń, niejednorodności tła. Z tego powodu stosowane są odpowiednie algorytmy pozwalające na wyekstrahowanie parametrów opisujących uszkodzenie niezbędnych dla poprawnych symulacji MES.

W trakcie analizy obrazu pierwszym etapem jest określenie ROI (Region Of Interest – obszaru zainteresowania), w celu wytypowania podzbioru danych (podmacierzy obrazu), który zawierać ma tylko uszkodzenie z zaobserwowanej grupy. Działanie takie ma na celu zmniejszenie nakładu numerycznego, a także pozwala na wykorzystanie algorytmu odpowiedniego do rodzaju uszkodzenia sklasyfikowanego w danym ROI. Wybór ROI możliwy jest po przeprowadzeniu segmentacji obrazu, która ma na celu wstępne zaszeregowanie obszarów (pikseli) obrazu do odpowiednich kategorii według wybranych kryteriów.

Przykładem szeroko stosowanego algorytmu segmentacji jest metoda OTSU zastosowana w rzeczywistych zagadnieniach badań nieniszczących [5 - 7]. Metoda OTSU opiera się na progowaniu (ang. thresholding) globalnego histogramu jasności i prowadzi do binaryzacji rozpatrywanego obrazu według następującej zależności z rysunku 2.



Rys. 2. Analiza składowych głównych w transformacji cyfrowego obrazu

$$J_B(x, y) = \begin{cases} 1 & J(x, y) > \nu_{th} \\ 0 & J(x, y) \leq \nu_{th} \end{cases} \quad (1)$$

Optymalną wartość parametru  $\nu_{th}$  otrzymuje się maksymalizując:

$$\nu_{th}^* = \arg \max_{0 < \nu_{th} < L-1} \eta(\nu_{th}) \quad (2)$$

gdzie:

$$\eta(\nu_{th}) = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_T^2} \quad (3)$$

zaś  $\sigma_B$  oznacza wariancję pomiędzy grupami obiektów, a  $\sigma_T$  oznacza globalną wariancję obrazu.

Kolejnymi technikami statystycznymi, które mogą być wykorzystane zarówno na etapie identyfikacji jak i klasyfikacji obrazowanych obiektów są analiza składowych głównych – PCA (ang. Principal Component Analysis) oraz liniowa analiza dyskryminacyjna Fishera – LDA (ang. Linear Discriminant Analysis) [8].

Niech

$$\mathbf{x} = (x^1, \dots, x^k)$$

będzie wynikiem obserwacji  $k$  ustalonych parametrów. W przypadku analizy cyfrowych obrazów obserwacjami są poszczególne piksele, zaś parametrami mogą być wartości kanałów RGB dla pojedynczego obrazu lub ich zbioru. W klasyfikacji obrazowanych obiektów wykorzystuje się często parametry opisujące ich kształt lub zróżnicowanie. W obydwu wspomnianych powyżej metodach statystycznych poszukuje się takich przekształceń obserwowanych parametrów, by za ich pomocą uzyskać możliwie najlepsze rozróżnienie pomiędzy zidentyfikowanymi obiektami i tłem. Zróżnicowanie poszczególnych parametrów oraz związki pomiędzy nimi opisuje tzw. macierz kowariancji  $\Sigma$ .

Wariancja (rozrzut) danej kombinacji liniowej parametrów

$$\mathbf{n}^T \mathbf{x} = n_1 x^1 + \dots + n_k x^k, \quad \mathbf{n}^T \mathbf{n} = 1$$

wynosi  $\mathbf{n}^T \Sigma \mathbf{n}$ . Pierwsza składowa główna  $PC^1$  w algorytmie PCA – przekształcenie parametrów  $(x^1, \dots, x^k)$  obserwacji powyższej postaci ma maksymalną możliwą wariancję. Kolejna składowa ma również maksymalny możliwy rozrzut oraz jest z nią nieskorelowana. W przypadku transformacji obrazu oznacza to, że zastępując wartości kanałów RGB wartościami pierwszej składowej głównej uzyskamy największy średni kontrast, zaś druga składowa może być uważana za szum (rys. 2) [9].

W algorytmie LDA Fishera maksymalizowane są kolejno wartości

$$\frac{\mathbf{n}^T \Sigma_b \mathbf{n}}{\mathbf{n}^T \Sigma \mathbf{n}}$$

gdzie  $\Sigma_b$  jest tzw. wariancją międzygrupową wyznaczaną na podstawie pewnego zbioru danych uczących, gdzie zidentyfikowane zostały uprzednio obszary tła oraz zawierające poszukiwane w danym zagadnieniu objekty. W porównaniu z analizą składowych głównych metoda LDA pozwala uzyskać lepszy kontrast pomiędzy kluczowymi elementami obrazu oraz tłem kosztem dysponowania a-priori odpowiednim zbiorem danych testowych.

Obie opisane powyżej metody mogą zostać wykorzystane w algorytmach klasyfikacji obrazowanych obiektów na podstawie parametrów opisujących ich geometrię.

### Redukcja szumów i filtracja obrazu

Dodatkowe informacje z dwuwymiarowego sygnału, za jaki można uważać obraz pozyskuje się rozpatrując jego widmo częstotliwościowe. W tym celu wykonuje się dyskretną transformatę Fouriera obrazu, a następnie poddaje



się go filtracji. Filtry w dziedzinie częstotliwości pozwalają np. na wygładzenie obszarów w zarejestrowanym obrazie, wykonywanie globalnej/lokalnej redukcji szumów czy też usprawnienie mechanizmów wykrywania krawędzi.

Jednym z podstawowych filtrów stosowanych w przetwarzaniu obrazów, jest dolnoprzepustowy filtr Gaussa [10, 11]. Służy on do zmniejszenia poziomu szumów lub odseparowania obszaru tła. Wygładzenie filtrowanego obszaru następuje poprzez odseparowanie wysokoczęstotliwościowych składowych, do których najczęściej można zaliczyć szum. Filtr Gaussa scharakteryzować można następującą odpowiedzią impulsową:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

Przetransformowany obraz  $\tilde{f}$  otrzymywany jest za pomocą spłotu

$$\tilde{f}(x, y) = \int f(x', y') g(x - x', y - y') dx' dy' \quad (5)$$

Innym przykładem narzędzia stosowanego do wygładzania obrazów m.in. w badaniach ultradźwiękowych jest algorytm filtru medianowego [12 – 14]. Zastosowany tam filtr, działający w otoczeniu  $n \times n$  pikseli, można przedstawić za pomocą następującej zależności:

$$\tilde{f}(x, y) = \text{median} \begin{pmatrix} f(x-n, y-n) \cdots f(x-n, y) \cdots f(x-n, y+n) \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ f(x, y-n) \cdots f(x, y) \cdots f(x, y+n) \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ f(x+n, y-n) \cdots f(x+n, y) \cdots f(x+n, y+n) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Stosowane są także filtry uśredniające [15,16] polegające na uśrednieniu jasności wybranej liczby pikseli otaczających rozpatrywany punkt.

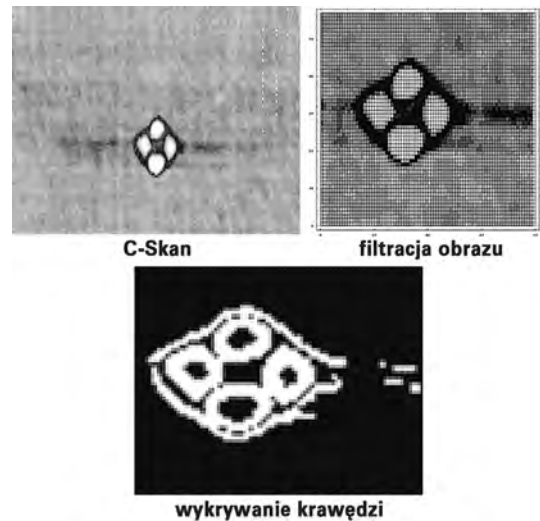
### Wykrywanie krawędzi

Podstawową metodą wykrywania krawędzi w obrazie są metody gradientowe [17,18]. Należy pamiętać, że metody gradientowe są podatne na występowanie wysokoczęstotliwościowych składowych w obrazie, dlatego też należy przetwarzać obraz wstępnie poddać operacjom opisanym powyżej.

$$|\nabla f(x, y)| = \sqrt{(\partial_x f(x, y))^2 + (\partial_y f(x, y))^2} \quad (9)$$

$$\nabla f(x, y) = \text{ArcTan} \left( \frac{\partial_x f(x, y)}{\partial_y f(x, y)} \right) \quad (10)$$

Wykorzystując amplitudę (9) i kierunek (10) gradientu w obrazie uzyskuje się położenie krawędzi w miejscach, gdzie funkcja (10) wykazuje ekstremum. W wykorzystywane są również filtry Sobela, Robertsa lub Canny'ego [10, 13, 16]. Na rysunku 3 przedstawiono przykład wykorzystania opisanych metod w badaniach ultradźwiękowych uszkodzeń typu BVID.



Rys. 3. Wynik przetwarzania obrazu dla badania ultradźwiękowego uszkodzenia typu BVID – badania ITWL

## Analiza i przetwarzanie obrazów w zintegrowanym środowisku obliczeniowym

W proponowanym systemie powinny zostać wykorzystane dane z wielu metod badań nieniszczących, tak aby w jak najpełniejszy sposób opisać obszar uszkodzenia i zmiany zaobserwowane w badanym elemencie struktury. Jest to konieczne zarówno dla uzyskania efektywnych modeli klasyfikacyjnych jak i wiarygodnych prognoz wytrzymałościowych na podstawie symulacji numerycznych. Przykładem dysponowania niepełnymi danymi jest występowanie w badaniach ultradźwiękowych efektu „zacienienia” – warstwy znajdujące się poniżej rozwarstwienia najbliższego do czujnika w obrazie C-scan są niewidoczne (zasłonięte). Mimo to dokładne określenie stanu wszystkich warstw jest konieczne dla przeprowadzenia poprawnej symulacji MES. Dlatego też do określenia stanu struktury powinna być wykorzystana metodyka syntezy danych z różnych źródeł pomiarowych („fuzja danych”), a w celach kalibracji systemu mogłyby też zostać wykorzystane metody niszczące. Głównym przykładem wykorzystania fuzji danych w badaniach nieniszczących jest artykuł Grosa i zespołu [18], w którym zostały połączone wyniki badań prądowirowych oraz termografii, tak aby zsyntetyzować ostateczny zestaw danych opisujących stan struktury.

### Wykorzystanie symulacji numerycznych w proponowanym środowisku obliczeniowym

Można wykazać, że obliczenia metodą elementów skończonych oraz wszelkie pola wielkości i skupione parametry, które można przy pomocy tych obliczeń uzyskać, dają na tyle zróżnicowany obraz uszkodzenia, aby stanowić odpowiednie źródło danych treningowych algorytmów klasyfikacji uszkodzeń. Zasilenie bazy danych DDF wynikami symulacji stanowi istotny krok w obliczu posiadania niepełnych danych pomiarowych opisujących strukturę w danym momencie. Koncepcja bazy DDF połączonej z badaniami MES jest wykorzystywana w literaturze głównie do diagnostyki struktur

falami Lamba i przy wykorzystaniu przetworników PZT [3, 4]. Metodyka bazy DDF powinna zostać zaadaptowana, tak aby stworzyć zespół parametrów opisujących uszkodzenie wystarczający do zasilenia zautomatyzowanej serii symulacji. Trafne określenie stanu struktury metodą numerycznych obliczeń wzrostu rozwarstwienia jest głównym zadaniem proponowanego w artykule systemu diagnostyki kompozytów.

### Automatyzacja tworzenia modeli numerycznych

Ze względu na trudności z dysponowaniem obszernej bazy danych pomiarowych z wieloma różnymi konfiguracjami uszkodzenia dla danego elementu konieczne jest wykorzystanie symulacji numerycznych do opracowania systemu klasyfikacji uszkodzeń. Rzeczywistym wynikiem badań przypisana zostanie odpowiednio większa waga statystyczna.

W szczególności zostaną wykorzystane techniki ekstrakcji wstecznej pozwalające na modelowe połączenie aktualnego stanu konstrukcji oraz głównych potencjalnych scenariuszy uszkodzeń, które mogły do takiego stanu doprowadzić. Będą to głównie dynamiczne symulacje uderzeń opisane parametrami, takimi jak umiejscowienie uderzenia oraz energia uderzenia.

Symulacja czynnika powodującego uszkodzenie została przeprowadzona w dwóch krokach, szeroko dyskutowanych w literaturze. Pierwszym etapem jest przeprowadzenie dynamicznej symulacji uderzenia przy pomocy kodów FEM typu „explicit”, następnie przeprowadzane są symulacje wstępnego wzrostu uszkodzenia (do poziomu aktualnego) dla każdego ze scenariuszy pomiarowych. Ze względu na ilość przetwarzanych danych symulacje te powinny zostać przeprowadzone w sposób zautomatyzowany, zarówno na etapie tworzenia siatki MES jak i warunków brzegowych modelu. Podobnie sieć modelu MES, powstała na podstawie zobrazowania C-Scan badanej konstrukcji, powinna zostać opracowana w sposób automatyczny w celu wyeliminowania wpływu operatora. W literaturze znaleźć można wiele przykładów wykorzystania automatycznych narzędzi tworzenia siatek MES [20, 21]. Narzędzia automatycznej generacji siatek pozwalają również na tworzenie przestrzennych (trójwymiarowych) modeli obliczeniowych [22, 23, 17].

### Modelowanie uderzenia i wzrostu rozwarstwienia

Istnieje zestaw technik symulacji uszkodzenia w postaci rozwarstwienia i wzrostu uszkodzenia w kompozytach przy pomocy metody elementów skończonych. W przypadku symulacji samego uderzenia, tzw. solvery typu „explicite” przeważają w literaturze, podczas gdy analizy wzrostu uszkodzenia wykorzystują trzy główne technologie – VCCT (Virtual Crack Closure Technique), CZM (Cohesive Zone Modeling) oraz CTE (Crack Tip Element).

Jednym z przykładów wykorzystania symulacji MES do obliczenia powstania rozwarstwienia w materiale kompozytowym jest praca [24]. W badaniu tym seria próbek została poddana uderzeniom o określonych parametrach, które następnie zostały odwzorowane w symulacji numerycznej. Wyniki symulacji zostały porównane z wynikami testów

laboratoryjnych badań ultradźwiękowych, radiografii oraz przy pomocy badań niszczących. Z wykorzystaniem metody CZM odwzorowano poprawnie jakościowe aspekty uszkodzenia (orientacja i kształt rozwarstwienia), mniejszą dokładność uzyskano dla obszaru uszkodzenia.

Obliczanie prędkości uwalniania energii odkształcenia przy pomocy metody VCCT dla nieregularnych kształtów rozwarstwienia opisane zostało w pracach [25, 26]. W yniki tej pracy są istotne dla rozważanego systemu, gdyż obszary rozwarstwienia wykryte w wyniku badań ultradźwiękowych nie posiadają zwykle regularnych kształtów, szczególnie w obszarach nieciągłości struktury.

### Wnioski

Aby ilościowo opisać proces uszkodzania konstrukcji kompozytowej na podstawie wyników badań nieniszczących konieczne jest zastosowanie programu symulacji numerycznych. Taki ilościowy opis jest niezbędny, aby móc prognozować stan struktury – zarówno w kompozytowych konstrukcjach lotniczych jak i w przypadku wspomnianej aplikacji dla kompozytowych łopat turbin wiatrowych. Jednakże zakres stosowania kompozytów, w szczególności ich udział w budowie elementów krytycznych, ulega zwiększeniu (np. konstrukcje Boeing 787). Stąd też wybranie odpowiednich metod diagnozowania i prognozowania trwałości ma duże znaczenie. Szczególnie ważne i niebezpieczne jest zagadnienie niskoenergetycznych uderzeń elementu o strukturę kompozytową (tzw. ang. low energy impact), jako że nie powoduje pojawienia się zewnętrznych oznak uszkodzenia.

W szczególności brak uszkodzeń wizualnych jest istotny dla kompozytów epoksydowych wzmacnianych włóknem węglowym. Brak wizualnych wskazań po uderzeniu nie oznacza braku uszkodzeń, a może prowadzić do katastroficznego zniszczenia – szczególnie w przypadku pojawienia się rozwarstwień lub pęknięć osnowy czy włókien. Z tego powodu szczegółowa inspekcja i diagnostyka z wykorzystaniem badań nieniszczących jest konieczna dla określenia umiejscowienia oraz rozmiaru i rodzaju uszkodzenia.

Wiele typów badań i inspekcji (spośród których metody ultradźwiękowe są najistotniejsze) daje wyniki w postaci obrazów (dwuwymiarowych wykresów zmierzonej wielkości diagnostycznej). W tego typu obrazach znaleźć można bogactwo informacji na temat stanu struktury i powinno się je wykorzystywać do prognozowania propagacji uszkodzeń w badanym elemencie struktury.

Można zauważyć, że metody stosowane do zbudowania proponowanej w niniejszym artykule sieci prognostycznej są szeroko opisane w literaturze oraz wykorzystywane w rzeczywistych zagadnieniach badań nieniszczących, jak i w badaniach naukowych. Dla każdego z opisanych kroków algorytmu diagnostycznego istnieją odpowiednie techniki stosowane przez badaczy – od dziedziny pozyskiwania, przetwarzania i analizy obrazów, przez zagadnienia zautomatyzowanych symulacji numerycznych, oraz algorytmy „machine learning” i klasyfikatory oparte na sztucznej inteligencji, po metodyki modelowania rozwarstwień z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych.

Wydaje się, iż w związku z niepełnością danych uzyskiwanych na drodze pomiarów badaniami nieniszczącymi, konieczne jest zastosowanie opisanych w pracy algorytmów sztucznej inteligencji, gdyż w przeciwnym wypadku uzyskanie parametrów koniecznych do zasilenia analiz wytrzymałościowych może być utrudnione lub niemożliwe. Widać, iż klasyfikacja typu (znacznika) uszkodzenia w zależności od sygnału pomiarowego jest problemem silnie nieliniowym i rozwiązanie go nawet przy pomocy klasycznych metod optymalizacji może nie prowadzić do satysfakcjonujących rozwiązań. W chwili obecnej światowe laboratoria badawcze jak i producenci prowadzą prace mające na celu tworzenie takich systemów dla potrzeb wspomagania eksploatacji konstrukcji lotniczych.

## LITERATURA

- [1] Christensen C. J., Ronold K. O. and Thøgersen M. L., „Calibration of partial safety factors for design of wind-turbines rotors blades against fatigue failure in flap-wise bending”, 2000, Risø-R-1204(DA)
- [2] Dragan K. et al., „Structural integrity monitoring of wind turbine composite blades with the use of NDE and SHM approach”
- [3] Pan N., Su Z., Ye L., Zhou L. M., Lu Y., A quantitative identification approach for delamination in laminated composite beams using digital damage fingerprints (DDFs), „Composite Structures” 2006, 75, 559 – 570
- [4] Su Z., Ye L., Lamb wave-based quantitative identification of delamination in CF/EP composite structures using artificial neural algorithm, „Composite Structures” 2004, 66 (1 – 4), 627 – 637
- [5] Tian Y, Du D. et al., „Automatic Defect Detection in XRay Images Using Image Data Fusion”, „Tsinghua Science and Technology” 2006, Vol. 11, Nr 6
- [6] Dudzik S., „Application of the morphological operations for defect area recognition using active thermography”, 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, July 27 – 30, 2010, Québec (Canada)
- [7] Serre J., „Image analysis and mathematical morphology”, Academic Press, New York (1982)
- [8] Hastie T., Tibshirani R., Friedman J., The Elements of Statistical Learning: data mining, inference, and prediction (5<sup>th</sup> ed.), Springer-Verlag, Berlin 2009
- [9] Pumphrey H., <http://xweb.geos.ed.ac.uk/~hcp/ip2/princpct.pdf>
- [10] Fang Y. Z., Jia H. K., Li L. A., Wang Z. Y., Zhang S. J., A new application of digital image processing to investigate thin compressed films: The measurement of buckling propagation, „Optics and Lasers in Engineering” 2010, 48
- [11] Shapiro L. G., Stockman G. C., „Computer Vision”, s. 137, 150. Prentice Hall, 2001
- [12] Yue Z. Q., Chen S., Tham L. G. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing, „Computers and Geotechnics” 2003, 30, 375 – 397
- [13] Regalado W. J. P., Chertov A. M., Maev R. G., „Time of Flight Measurements in Real-Time Ultrasound Signatures of Aluminum Spot Welds: An Image Processing Approach”.
- [14] Tukey J. W., „Nonlinear (nonsuperposable) methods for smoothing data”. Congr. Rec. EASCON'74
- [15] Allerstorfer M., Heinzl C., Kastner J., Groeller E., „Uncertainty visualization of computed tomography datasets from complex components using statistical analysis”, ndt.net
- [16] Benkő I., „Analysis of infrared images in integrated-circuit techniques by mathematical filtering”
- [17] Graff K. F., „Waves motion in elastic solids”, Dover Publications, Inc., New York 1991
- [18] Dragan K., Image Processing approach for the Non Destructive Evaluation (NDE) of the composite materials as the input to structural durability assessment, „Technical News”, 2011/1(33), 2 (34) pp. 49 – 52
- [19] Gros X. E., Bousigue J., Takahashi K., NDT data fusion at pixel level, „NDT&E International” 1999, 32, 283 – 292
- [20] Xu W. J., Yue Z. Q., Hu R. L., Study on the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method, „International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences” 2008, 45, 749 – 762
- [21] Verhulst E., van Rietbergen B., Huiskes R., A three-dimensional digital image correlation technique for strain measurements in microstructures, „Journal of Biomechanics” 2004, 37, 1313 – 1320
- [22] Abdul-Aziz A., Saury C., Bui Xuan V., Young P., On the material characterization of a composite using micro CT image based finite element modeling, „Proceedings of SPIE” 2006
- [23] Chen S., Yue Z. Q., Tham L. G., Digital image-based numerical modeling method for prediction of inhomogeneous rock failure, „International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences” 2004, 41, 939 – 957
- [24] Aymerich F., Dore F., Priolo P., Simulation of multiple delaminations in impacted cross-ply laminates using a finite element model based on cohesive interface elements, „Composites Science and Technology” 2009, 69, 1699 – 1709
- [25] Xie D., Biggers Jr S. B., Strain energy release rate calculation for a moving delamination front of arbitrary shape based on the virtual crack closure technique. Part I: Formulation and validation, „Engineering Fracture Mechanics” 2006, 73, 771 – 785
- [26] Xie D., Biggers Jr S. B., Strain energy release rate calculation for a moving delamination front of arbitrary shape based on the virtual crack closure technique. Part II: Sensitivity study on modeling details, „Engineering Fracture Mechanics” 2006, 73, 786 – 801

