



Reguły diagnostyczne dla systemu ekspertowego (WPPES) wnioskującego o stanie urządzeń farmy wiatrowej

STANISŁAW DUER

Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Energetyki,
ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, stanislaw.duer@tu.koszalin.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono problematykę budowania diagnostycznej bazy wiedzy dotyczącej hybrydowego systemu zasilania na potrzeby organizacji procesu diagnozowania. Podstawą do pozyskiwania informacji diagnostycznej dotyczącej urządzeń hybrydowego systemu zasilania jest analiza funkcjonalno-diagnostyczna badanego obiektu. Efektem procesu opracowania diagnostycznego jest wykonany model struktury funkcjonalno-diagnostycznej, wyznaczone zbiory elementów podstawowych oraz sygnałów diagnostycznych wraz z przypisanymi im wzorcowymi sygnałami diagnostycznymi.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, wnioskowanie diagnostyczne, logiki wielowartościowe, sztuczna inteligencja.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.5561

1. Wprowadzenie

W rozwijającej się gospodarce Polski obserwujemy stały wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną określaną na 4-5% rocznie [9]. Pomimo powszechnej eksploatacji źródeł kopalnych coraz większe znaczenie ma wykorzystanie przyjaznych dla środowiska nośników opartych na odnawialnych źródłach energii. W grupie tej, z punktu widzenia uzyskiwanych mocy i dostępności, największą popularnością cieszy się obecnie energia wiatru. Konwersja energii kinetycznej wiatru na energię elektryczną realizowana jest w elektrowniach wiatrowych. Zespół elektrowni wiatrowych (jednostek wytwórczych, turbin) przyłączonych do sieci w głównych punktach odbioru (GPO) określamy mianem farmy wiatrowej [7]. Farmy, coraz

częściej instalowane w krajowym systemie energetycznym, pozwalają zwiększyć nie tylko produkcję energii elektrycznej, lecz także stabilność systemu oraz wykorzystanie źródeł odnawialnych.

Istotną rolę w produkcji energii elektrycznej pełni aspekt niezawodności elektrowni wiatrowych, który jest bezpośrednim wynikiem ich należytego stanu technicznego. Dotyczy on głównie procesu kontrolowania prawidłowego stanu funkcjonowania oraz określania przyczyn możliwych do wystąpienia awarii lub usterek. Powyższe działania realizowane są głównie przez inteligentne systemy nadzoru i bezpieczeństwa użytkowania farmy wiatrowej.

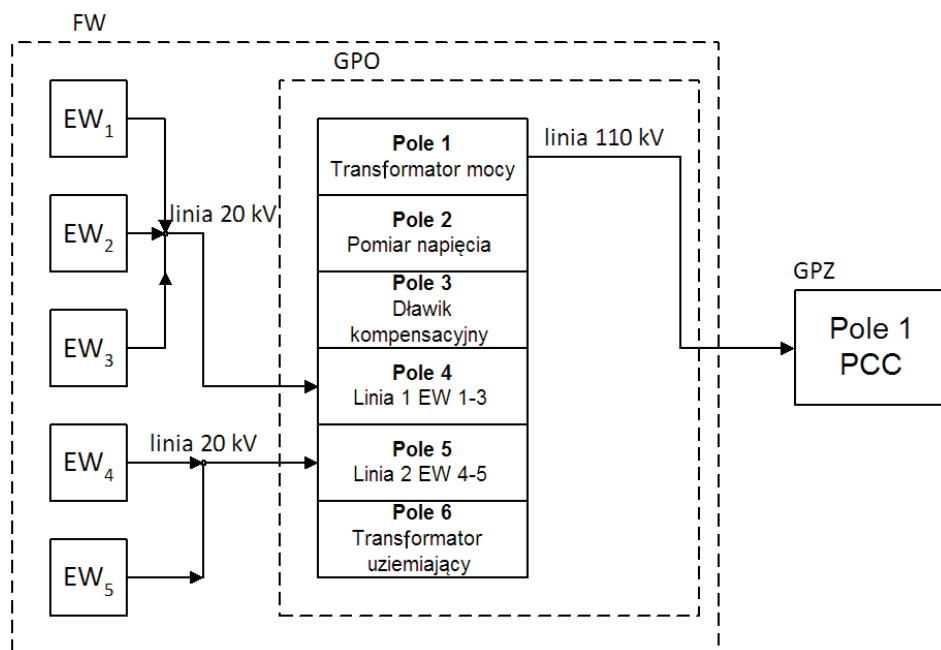
Prowadzone przez autora badania dotyczące diagnozowania złożonych obiektów technicznych, w tym urządzeń elektroenergetycznych farmy wiatrowej, przyczyniły się do powstania autorskiego komputerowego systemu ekspertowego (WPPES) (ang. *Wind Power Plant Expert System*) realizującego proces wnioskowania stanu funkcjonalnego farmy wiatrowej. Na podstawie rzeczywistych danych opracowano zaawansowany model funkcjonalny, w którym zdefiniowano sygnały wejściowe (parametry i ich ograniczenia) dla turbin wiatrowych i głównego punktu odbioru. Zdefiniowano również dla tych elementów bazę wiedzy w postaci zbioru faktów i reguł używanych w procesie wnioskowania. Realizacja procesu wnioskowania pozwoliła na uzyskanie diagnozy dotyczącej stanu funkcjonalnego farmy wiatrowej (ocena ogólna) i poszczególnych jej elementów (ocena szczegółowa).

2. Model funkcjonalno-diagnostyczny urządzeń farmy wiatrowej na potrzeby systemu ekspertowego (WPPES)

Dla projektowanego systemu nadzoru i bezpieczeństwa użytkowania farmy wiatrowej opracowano strukturę funkcjonalną farmy wiatrowej wykorzystanej w jego działaniu (rys. 4.1). Zaprojektowana baza wiedzy dotyczy farmy wiatrowej składającej się z pięciu elektrowni wiatrowych typu Vestas V90 2.0 MW przyłączonych do Głównego Punktu Odbioru (GPO) za pomocą dwóch linii elektroenergetycznych 20 kV stanowiących wewnętrzną infrastrukturę elektroenergetyczną farmy wiatrowej (rys. 1). Założono zlokalizowanie farmy wiatrowej w województwie zachodniopomorskim, tj. w I strefie energetycznej wiatru w Polsce. Założono stację abonencką GPO w celu wyprowadzenia mocy z farmy wiatrowej [3-5].

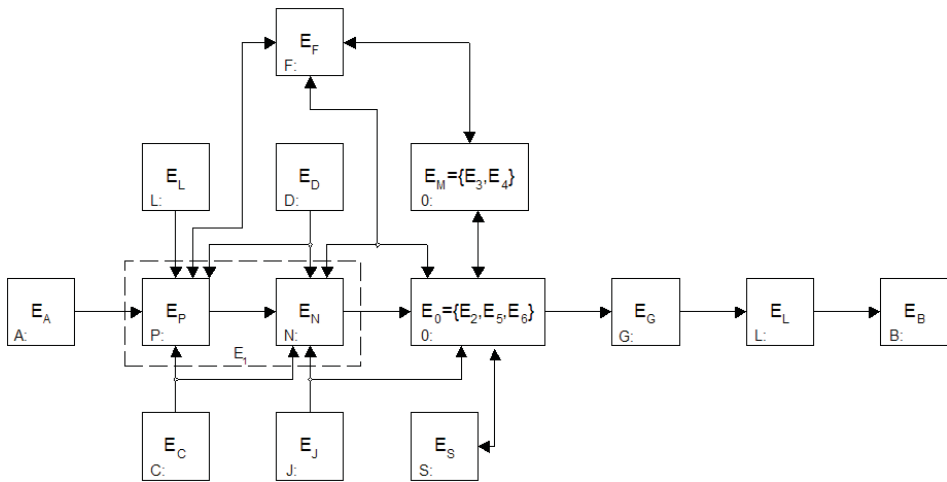
Połączenie pola transformatorowego stacji abonenckiej GPO projektowanej (badanej) farmy wiatrowej z siecią Operatora Systemu Dystrybucyjnego (OSD) w Głównym Punkcie Zasilania (GPZ) założono jako linię kablową. Do transformatora 20/115 kV od strony SN założono przyłączenie dwóch linii kablowych wyprowadzających moc z elektrowni wiatrowych. W celu zdefiniowania faktów przedstawianych w postaci parametrów sygnałów pomiarowych i innych wielkości roboczych dla farmy wiatrowej (rys. 2) przeanalizowano podstawowe elementy, z których składa się farma

wiatrowa, i wyodrębniono dwie podstawowe jednostki funkcjonalno-strukturalne, tj. elektrownię wiatrową i stację elektroenergetyczną GPO. Następnie dla każdej jednostki funkcjonalno-strukturalnej wyodrębniono podstawowe bloki składających się z charakterystycznych dla nich parametrów urządzeń, sieci i instalacji.



Rys. 1. Schemat blokowy modelu farmy wiatrowej, gdzie: EW nr 1÷5 — elektrownia wiatrowa, GPO — główny punkt odbioru, GPZ — główny punkt zasilania, FW — farma wiatrowa, PCC — wspólny punkt przyłączenia

Każda grupa faktów dotyczących elektrowni wiatrowych i GPO (rys. 3) zawiera od kilku do kilkunastu parametrów, których liczba uzależniona jest od funkcji i liczby urządzeń wchodzących w skład danego bloku [3]. Dla bloku *A środowisko i warunki zewnętrzne* zdefiniowano dwanaście parametrów, w tym trzy parametry, tj. PA010, PA011 i PA012, zdefiniowano jako rezerwowe i nie przypisano żadnych wartości/własności w celu zagwarantowania możliwości rozbudowy systemu ekspertowego, jeśli konieczne. Założono trzy rezerwowe parametry (fakty) dla każdego bloku. Blok *A środowisko i warunki zewnętrzne* składa się z następujących faktów: prędkość wiatru załączania turbiny, prędkość wiatru postoju turbiny w gotowości do pracy, prędkość wiatru pracy znamionowej turbiny, prędkość wiatru pracy nieznamionowej turbiny, prędkość wiatru wyłączania turbiny, prędkość wiatru przetrwania turbiny, kierunek wiatru, temperatura otoczenia, ciśnienie barometryczne, rezerwa (1), rezerwa (2), rezerwa (3).



Rys. 2. Schemat funkcjonalno-diagnostyczny urządzeń farmy wiatrowej, gdzie: A — środowisko i warunki zewnętrzne, B — sieć, C — układ zatrzymywania turbin, D — system hydrauliczny, E — układ kierunkowania gondoli na wiatr, F — system komunikacji turbiny, G — łączniki, H — automatyka zabezpieczeniowa, I — układ ustawienia kąta natarcia łopatek wirnika, J — układ chłodzenia i ogrzewania, K — transmisja, Ł — transformator blokowy SN, M — sterownik, N — przekładnia, O — generator, P — wirnik

3. Reguły wnioskujące stosowane w systemach ekspertowych wspomagających podejmowanie decyzji

Wśród różnych metod reprezentacji wiedzy w systemach ekspertowych ważną rolę odgrywają metody oparte na regułach. Zauważmy, że zbiór stwierdzeń nie jest wystarczający do opisu jakiejś dziedziny wiedzy. Są jeszcze potrzebne reguły, których ogólna postać może być wyrażona jako:

$$\text{JEŻELI przesłanka, TO konkluzja (działanie)} \quad (1)$$

lub za pomocą konstrukcji:

$$\text{IF przesłanka, THEN konkluzja} \quad (2)$$

Przesłanka może zawierać pewną liczbę stwierdzeń połączonych funktorami logicznymi. Baza wiedzy zawiera w tym przypadku zbiór reguł oraz zbiór faktów. Możliwość reprezentowania rzeczywistości ogranicza się do powyższych struktur zdaniowych. Zdecydowana większość powstałych do tej pory systemów ekspertowych jest oparta na regułach. Podejście to umożliwia uzyskanie dużej modularności bazy wiedzy.

Często reprezentacja regułowa jest wykorzystywana w systemach dedukcyjnych, gdzie zbiór faktów początkowych jest przekształcany w pewien zbiór faktów końcowych. W zależności od przeznaczenia system może spełniać różne funkcje, np. klasyfikowanie, diagnozowanie, dowodzenie, ustalanie przyczyn, najlepszy dobór, planowanie, prognozowanie, monitorowanie itp.

Czasem stosuje się także bardziej formalny zapis reguł, gdzie jest opuszczany symbol (IF), z kolei zamiast napisu THEN używa się symbolu implikacji. Przesłanka jest wówczas wyrażana jako połączenie za pomocą funktorów logicznych pewnej liczby stwierdzeń. W przypadku reguły, w której przesłanka zawiera dwa warunki połączone funktorem koniunkcji, mamy:

$$\begin{aligned} \text{IF (A przyjmuje wartość } x) \text{ AND (B przyjmuje wartość } y) \\ \text{THEN (C przyjmuje wartość } z) \end{aligned} \quad (3)$$

Korzystając z symbolu implikacji, regułę tę można zapisać w postaci:

$$(A, x) \wedge (B, y) \Rightarrow (C, z) \quad (4)$$

Praktycznie działające systemy ekspertowe oparte na regułach mogą zawierać reguły charakteryzowane stopniami pewności. Podobnie jak przy reprezentowaniu stwierdzeń są to liczby zazwyczaj z przedziału $[-1, 1]$ albo $[0, 1]$. Dzięki temu można za pomocą tych liczb dać znać systemowi, jaki jest stosunek użytkownika lub twórcy systemu do pewności konkluzji występującej w danej regule.

Zbiór reguł można rozpatrywać jako szczególny sposób zapisu pewnej sieci stwierdzeń, ponieważ z prawdziwości jednego stwierdzenia mogą wynikać inne. W niektórych systemach jest dopuszczalna rozwinięta (tzw. pełna) postać reguł, która zawiera dodatkowe stwierdzenie uznawane za prawdziwe w razie niespełnienia przesłanki. Ogólna postać reguły rozwiniętej jest następująca:

$$\text{IF przesłanka, THEN konkluzja}_1, \text{ ELSE konkluzja}_2 \quad (5)$$

przy czym (konkluzja₂) jest tym dodatkowym stwierdzeniem. Taka postać reguł może jednak czasami prowadzić do pojawienia się nieoczekiwanych konkluzji. Ze względu na założoną kompletność bazy wiedzy, brak przesłanki jest utożsamiany z uznaniem tej przesłanki za fałszywą. W związku z tym wskazane jest stosowanie reguł w postaci podstawowej (IF oraz THEN...). Postępowanie takie upraszcza działanie maszyny wnioskującej.

Jeżeli warunki w złożonej przesłance są połączone funktorami koniunkcji, to proces analizowania takiej przesłanki jest przerywany (z wynikiem negatywnym)

po napotkaniu pierwszego niespełnionego warunku. W niektórych systemach w regułach może występować funktor alternatywy:

$$\begin{aligned} &\text{IF } (A \text{ przyjmuje wartość } x) \text{ OR } (B \text{ przyjmuje wartość } y), \\ &\text{THEN } (C \text{ przyjmuje wartość } z) \end{aligned} \quad (6)$$

Regułę taką możemy zamienić na zestaw dwóch równoważnych reguł niezawierających funktora alternatywy:

$$\begin{aligned} &\text{IF } (A \text{ przyjmuje wartość } x), \text{ THEN } (C \text{ przyjmuje wartość } z); \\ &\text{IF } (B \text{ przyjmuje wartość } x), \text{ THEN } (C \text{ przyjmuje wartość } z) \end{aligned} \quad (7)$$

Stosowanie spójnika (OR) jest dopuszczalne, lecz niezalecane ze względu na większe skomplikowanie modułu wnioskującego.

Ze względu na sposób uzyskiwania ostatecznych konkluzji w procesie wnioskowania rozróżniamy dwa rodzaje reguł:

- 1) reguły proste — takie, które mają postać wniosków pośrednich;
- 2) reguły złożone — takie, które umożliwiają bezpośrednie wyznaczenie wniosków przez system.

Oto przykład reguły złożonej:

$$\text{IF } (\text{są spełnione wszystkie warunki niezbędne do przyjęcia wniosku,} \\ \text{że uszkodzeniu uległ zasilacz telewizora}), \text{ THEN } (\text{wymień zasilacz}) \quad (8)$$

Zaletą reguł złożonych jest to, że nie wymagają maszyn wnioskujących o skomplikowanym sposobie działania, ponieważ każda z reguł w konkluzji zawiera jakiś wniosek końcowy.

Metody wnioskowania ekspertowego, które są stosowane w systemach podejmowania decyzji (ekspertowych), można pogrupować w grupy (klasy), w których wyróżnia się następujące metody wnioskowania: dedukcyjne, indukcyjne i probabilistyczne lub ich kombinacje.

W systemie ekspertowym (WPPES) przyjęto założenie, że każdy parametr roboczy danego bloku urządzeń farmy wiatrowej dla faktów i reguł ma przypisany symbol, który jest tworzony zgodnie z poniższym wzorem:

$$\text{dla: } X = (P \text{ lub } R) \rightarrow \text{Jeżeli jest } Y \text{ to } ZZZ, \quad (9)$$

gdzie: X — litera określająca typ parametru: X = (P lub R),
P — fakty,

R — reguły,

Y — litera określająca dany blok, gdzie: Y = A (gdzie: A — środowisko i warunki zewnętrzne) lub B itd., ZZZ — trzycyfrowy numer przypisany do danego parametru.

Interpretacja zależności (9) jest następująca: jeżeli jest dla faktów lub reguł dany (X), gdzie: (X = P lub R) dla bloku Y o symbolu A lub B itd., to przyporządkowano wówczas sygnał o parametrach (wartościach). Przykład opisu struktury opracowanego faktu i reguły: **PA001** — oznacza fakt z bloku A o numerze 001, **RC003** — oznacza regułę dla bloku C o numerze 003 itd.

Jeżeli jest fakt **PA001**, to czytamy wówczas, że jest to fakt dla bloku A o numerze 001. Stąd z tabel faktów (tab. 1) znajdujemy: obiekt — turbina, napięcie 20 kV, kierunek EW, blok A (gdzie: A — środowisko i warunki zewnętrzne), pole — liniowe odpływowe, parametr: prędkość wiatru załączania turbiny, rodzaj pomiaru, skrót: PWZT, parametry: wartość średnia — 3,5 min — 3,5, jedn. — m/s.

Zastosowana metoda definiowania faktów opisana powyżej pozwoliła na nieskomplikowanie faktów i przedstawianie ich w formie przejrzystej w postaci tabeli umożliwiającej łatwe wyszukiwanie parametrów, np. po ich wartościach charakterystycznych lub zgodnie z przyjętym podziałem blokowym. W tabelach 1 i 2 przedstawiono przykładowe fakty i reguły dla elektrowni wiatrowej na przykładzie bloku A — *środowisko i warunki zewnętrzne* oraz bloku B — *Sieć*. W tabeli 1 przedstawiono fakty dla stacji elektroenergetycznej GPO na przykładzie bloku Q — *Pole liniowe odpływowe*.

Zgodnie z powyżej opisaną metodą zdefiniowano fakty dla wszystkich bloków w opracowanym systemie nadzoru i bezpieczeństwa użytkowania farmy wiatrowej.

Opracowane modele funkcjonalno-diagnostyczne dla elektrowni wiatrowej i GPO (rys. 3 i 4) pozwoliły na wyodrębnienie podstawowych bloków grupujących parametry poszczególnych komponentów, urządzeń i zespołów. Dla pojedynczej elektrowni wiatrowej (turbiny) zdefiniowano **16 bloków A-P**, dla których utworzono **224 faktów** i **258 reguł**. Analogicznie dla GPO zdefiniowano **6 bloków Q-W**, **96 faktów** i **135 reguł**. Dodatkowo utworzono stałe zbiory faktów dla wartości domyślnych oraz kilku przykładowych wariantów działania farmy wiatrowej. Całą opisywaną bazę wiedzy umieszczono w oddzielnych plikach zgodnych ze składnią języka CLIPS, a mianowicie:

- **facts.clp** — plik zawierający zbiory faktów wartości domyślnych parametrów i kilku przykładowych wariantów działania farmy wiatrowej;
- **gpo.clp** — plik zawierający zbiór reguł dla wszystkich bloków GPO oraz dodatkowe reguły określające stan wyjściowy obiektu;
- **turbine.clp** — plik zawierający zbiór reguł dla wszystkich bloków elektrowni wiatrowej oraz dodatkowe reguły określające stan wyjściowy obiektu;
- **windfarm.clp** — plik zawierający szablony i funkcje określające stan pracy farmy wiatrowej oraz reguły pomocnicze, np. reguła startowa (inicjująca).

TABELA 1

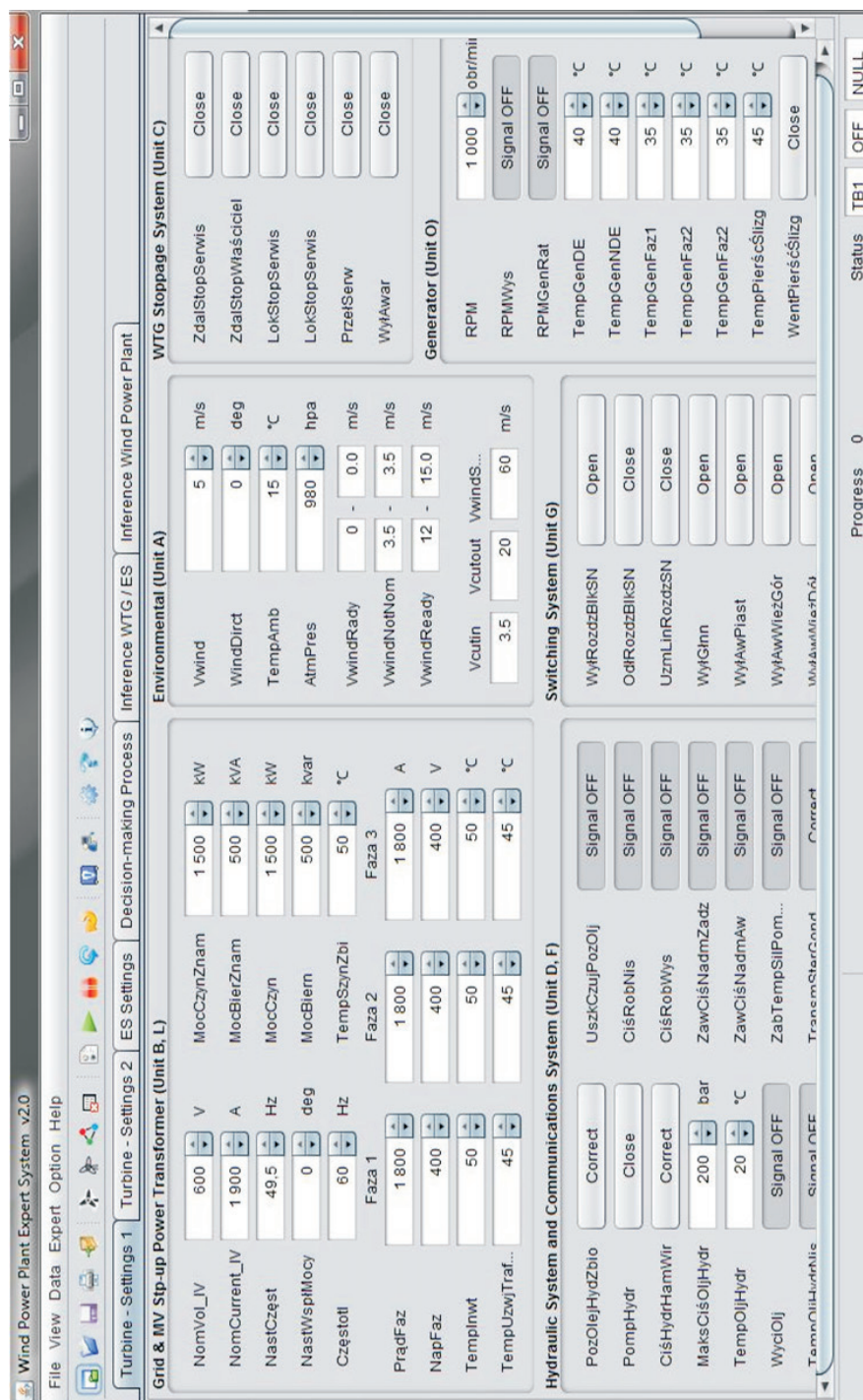
Fakty dla bloku A — środowisko i warunki zewnętrzne i bloku B — sieć (przykład)

Up.	Objekt	Napięcie	Kierunek	BLOK	Pole	Parametr	Rodzaj	Symbol	Skrót PL	default	min	max	Jedn.	Stan 0	Stan 1
A															
1.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Prędkość wiatru załączania turbiny	pomiary	PA001	PWZT	3.5	3.5	-	m/s		
2.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Prędkość wiatru poziomu turbiny w gotowości do pracy	pomiary	PA002	PWPTGP	0	0	3.5	m/s		
3.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Prędkość wiatru pracy znamionowej turbiny	pomiary	PA003	PWPZT	12	20	20	m/s		
4.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Prędkość wiatru pracy nie znamionowej turbiny	pomiary	PA004	PWPNZT	3.5	12	12	m/s		
5.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Prędkość wiatru wyłączenia turbiny	pomiary	PA005	PWWT	20	20	-	m/s		
6.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Prędkość wiatru przetwarzania turbiny	pomiary	PA006	PWPT	60	-	60	m/s		
7.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Kierunek wiatru	pomiary	PA007	KierWiatr	0	360	stopień			
8.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Temperatura otoczenia	pomiary	PA008	Temp	-10	50	C			
9.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Cisnienie barometryczne	pomiary	PA009	CisBar	0	1500	hPa			
10.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Rezerwa		PA010							
11.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Rezerwa		PA011							
12.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Rezerwa		PA012							
B															
Sieć															
14.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Napięcie znamionowe nN	pomiary	PB001	NapZnam_nN	0	0	690	V		
15.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Prąd znamionowy nN	pomiary	PB002	PradZnam_nN	0	0	2200	A		
16.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Moc znamionowa czynna P	pomiary	PB003	MocCzynZnam	0	0	2000	KW		
17.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Moc znamionowa bierna Q	pomiary	PB004	MocBierZnam	0	0	2000	kVA		
18.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Nastawa częstotliwości f	pomiary	PB005	NastCzest	47.5	51.5	Hz			
19.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Nastawa współczynnika mocy	pomiary	PB006	NastWspMocy	-1	1	stopień			
20.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Prąd fazowy I/L1	pomiary	PB007	PradFaz1	0	0	1800	A		
21.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Prąd fazowy I/L2	pomiary	PB008	PradFaz2	0	0	1800	A		
22.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Prąd fazowy I/L3	pomiary	PB009	PradFaz3	0	0	1800	A		
23.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Napięcie fazowe U/L1	pomiary	PB010	NapFaz1	0	0	400	V		
24.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Napięcie fazowe U/L2	pomiary	PB011	NapFaz2	0	0	400	V		
25.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Napięcie fazowe U/L3	pomiary	PB012	NapFaz3	0	0	400	V		
26.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Moc czynna P	pomiary	PB013	MocCzyn	-120	2000	KW			
27.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Moc bierna Q	pomiary	PB014	MocBierN	-1000	1000	kvar			
28.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Częstotliwość f	pomiary	PB015	Czestotl	0	60	Hz			
29.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Temperatura inwertera - faza 1	pomiary	PB016	TempInw1	-30	150	°C			
30.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Temperatura inwertera - faza 2	pomiary	PB017	TempInw2	-30	150	°C			
31.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Temperatura inwertera - faza 3	pomiary	PB018	TempInw3	-30	150	°C			
32.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Temperatura - szyny zbiorcze	pomiary	PB019	TempSzynZbi	-30	150	°C			
33.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Rezerwa		PB020							
34.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Rezerwa		PB021							
35.	Turbina	20kV	EW		Liniove odpływyowe	Rezerwa		PB022							

TABELA 2

Reguły dla bloku A — środowisko i warunki zewnętrzne i dla bloku B — sieć (przykład)

Lp.	Wynik	Nazwa	Kategoria	Je odpowiedź	Blok	Opis matematyczny	Opis słowny	Odp.
Reguły dla bloku A								
1	WA1	Postój turbiny w gotowości do pracy	Środowisko i warunki zewnętrzne	[T,N]	A	RA001 := PA001 < 3.5 RA002 := PA005 >= 20 RA003 := PA001 < 3.5 or PA005 >= 20 RA004 := PA003 >= 12 and RA005 := PA003 < 20 and RA006 := PB003 = 2000 RA007 := PA003 >= 12 and PA005 < 20 and PB003 = 2000 and PI001 >= 85 and PI002 >= 85 and PI003 >= 85 RA008 := PA004 >= 3.5 and PA004 < 12, and RA009 := PB003 < 2000 RA010 := PA004 >= 3.5 and PA004 < 12 and PB003 < 2000 RA011 := (RA001 = N); and RA012 := PB013 > 120 RA013 := PA001 >= 3.5 and PB013 > 120 RA014 := PA002 < 3.5; and RA015 := (RA003 = N); and RA016 := (RA006 = N); and RA017 := PA002 < 3.5 and (RA013 = N) and (RA006 = N)	Prędkość wiatru mniejsza od prędkości załączenia turbiny; lub Prędkość wiatru większa lub równa prędkości wyłączenia turbiny Stan pracy turbiny: postój w gotowości do pracy Prędkość wiatru większa lub równa 12 m/s Prędkość wiatru mniejsza od 20 m/s Turbina pracuje z mocą znamionową Stan pracy turbiny: praca znamionowa Prędkość wiatru równa lub większa od 3,5 m/s i mniejsza od 12 m/s Osiągnięta moc znamionowa Stan pracy turbiny: praca nieznamionowa Prędkość wiatru większa lub równa od 3,5 m/s Generowana moc czynna większa od 0 kW Stan pracy turbiny: włączona Prędkość wiatru mniejsza od prędkości załączenia turbiny Prędkość wiatru równa lub większa od prędkości wyłączenia turbiny Turbina generuje moc czynną	Tak Tak Tak Tak Tak Tak Nie Tak Tak Tak Tak Nie Tak
2	WA2	Praca znamionowa turbiny	Środowisko i warunki zewnętrzne	[T,N]	A			Tak
3	WA3	Praca nieznamionowa turbiny	Środowisko i warunki zewnętrzne	[T,N]	A			Tak
4	WA4	Turbina włączona	Środowisko i warunki zewnętrzne	[T,N]	A			Tak
5	WA5	Turbina wyłączona	Środowisko i warunki zewnętrzne	[T,N]	A			Tak
REGUŁY DLA BLOKU B								
6	WB1	EW Stop: zbyt wysoka temperatura szyn zbiorczych	Sieć	[T,N]	B	RB001 := PB019 >= 120; and RB002 := P1004 = 1 RB003 := PB019 >= 120 and P1004 = 1 and PH010 = 0	Zbyt wysoka temperatura szyn zbiorczych Wentylator w szafie głównego sterownika pracuje Stan pracy turbiny: zatrzymana z powodu zbyt wysokiej temperatury szyn zbiorczych	Tak Tak Tak
7	WB2	EW Stop: zbyt wysoka temperatura inwertera	Sieć	[T,N]	B	RB004 := PB016 >= 120; or RB005 := PH017 >= 120; or RB006 := PB018 >= 120; or RB002 := P1004 = 1; and RB007 := PB016 >= 120 or PB017 >= 120 or PB018 >= 120 and P1004 = 1 and PH010 = 0 RB008 := PB013 = {0;2000}; and RB009 := PB014 = {0;2000}; and RB010 := (PB013 = {0;2000}) / (PB014 = {0;2000})	Zbyt wysoka temperatura inwertera - faza 1 Zbyt wysoka temperatura inwertera - faza 2 Zbyt wysoka temperatura inwertera - faza 3 Wentylator w szafie głównego sterownika pracuje Stan pracy turbiny: zatrzymana z powodu zbyt wysokiej temperatury inwertera moc czynna P moc bierna Q Współczynnik mocy: pojemnościowy (-1) lub indukcyjny (1)	Tak Tak Tak Tak Tak Tak Tak Tak Tak
8	WB3	Współczynnik mocy	Sieć	[T,N]	B			Tak
9		REZERWA	Sieć	[T,N]	B			Tak



Rys. 3. Pierwszy z dwóch paneli zawierających ustawienia wartości wejściowych i parametrów roboczych dla elektrowni wiatrowej (turbiny wiatrowej)

Wind Power Plant Expert System v2.0
 File View Data Expert Option Help
 Turbine - Settings 1 Turbine - Settings 2 ES Settings Decision-making Process Inference WTG / ES Inference Wind Power Plant

Cable line cell (Unit Q)

TransmSterPolow	ZabNadCzęst	Signal OFF
Wyl	ZabPodCzęst	Signal OFF
Odszyn	Aw	Signal OFF
UziemLin	AI	Signal OFF
ZabNadZwł	Napięcie fazowe UL	
ZabNadBezZwł	Faza 1	1 kV
ZabNadNap	Faza 2	1 kV
ZabPodNap	Faza 3	1 kV

Voltage measurement cell (Unit T)

TransmSterPolow	Correct
ZabNadNap	Signal OFF
ZabPodNap	Signal OFF
Aw	Signal OFF
AI	Signal OFF
Napięcie fazowe UL	
NapFaz1	20 kV
NapFaz2	20 kV

General alarm signaling cell (Unit W)

AIPotrziWasNap...	Signal OFF
Awfalown	Signal OFF
AIPotrziWasO.4	Signal OFF
AIPomNapAku	Signal OFF
AWAS	Signal OFF
AI	Signal OFF
TempRozdzWys	0 °C

Shunt reactor cell, power transformer cell and auxiliary transformer cell (Units R,S,U)

TransmSterPol...	Shunt Reactor	Power Transformer	Auxiliary Transformer
Wyl	Correct	Correct	Correct
Odszyn	Open	Open	Open
UziemLin	Close	Close	Close
ZabNadZwł	Close	Close	Close
ZabNadBezZwł	Signal OFF	Signal OFF	Signal OFF
ZabNadPrądZwł	Signal OFF	Signal ON	Signal ON
Buchholz	Signal ON	Signal ON	Signal ON
Aw	Signal OFF	Signal OFF	Signal OFF
AI	Signal OFF	Signal OFF	Signal OFF
Zabezpieczenie temperaturowe			
ZabYSTemp	80	80	80 °C
ZabZSTemp	90	90	90 °C
Prąd fazowy IL			
Faza 1	1800	1800	1800 A
Faza 2	1800	1800	1800 A

Progress 0 Status ES OFF NULL

Rys. 4. Panel zawierający ustawienia wartości wejściowych i parametrów roboczych dla odbiorczej stacji elektroenergetycznej (GPO)

Podział wiedzy na tematyczne części umieszczone w zewnętrznych plikach pozwolił uzyskać dużą czytelność oraz łatwą możliwość edycji. W każdej grupie faktów dotyczących elektrowni wiatrowej i GPO zawarto od kilku do kilkunastu parametrów, których liczba uzależniona jest od funkcji i liczby urządzeń wchodzących w skład danego bloku. Parametry w bazie wiedzy są podzielone na grupy i dostępne rozmieszczone w trzech pierwszych panelach opisujących ustawienia (dane użytkowe) elektrowni wiatrowych i GPO, co przedstawiono na rysunku 3 i 4.

W każdym bloku oprócz rzeczywistych parametrów zdefiniowano również po trzy parametry rezerwowe, którym nie przypisano żadnych wartości (własności). Przyjęcie takich parametrów było podyktowane zapewnieniem możliwości dalszej rozbudowy systemu ekspertowego. Przykładowo, dla bloku *A — środowisko i warunki zewnętrzne* określono trzynaście parametrów, w tym trzy parametry rezerwowe PA011, PA012, PA013. Pozostałe parametry reprezentujące wartości zmienne i stałe określono symbolami od PA001 do PA010 i przedstawiono w tabeli 2.

W celu określenia charakterystycznych wartości dla każdego faktu opracowano trzynaście kategorii, według których zdefiniowano poszczególne fakty. Kategorie określają między innymi: obiekt, napięcie, kierunek, blok, rodzaj, symbol, skrót, jednostkę, stan, wartość domyślną, minimalną i maksymalną. Wszystkie fakty i reguły opisane według powyższych kategorii umieszczone są w tabeli dostępnej w pracy [3]. Na rysunku 3 i 4 można zauważyć, że parametry rezerwowe dla bloków elektrowni wiatrowej oraz GPO zostały pominięte.

W procesie implementacji bazy wiedzy w języku CLIPS przyjęto wspólną pięciodziesiątkową symbolikę zarówno dla faktów, jak i reguł. Pierwszy znak symbolu wskazuje na fakt, gdy przyjmuje literę P lub regułę w przypadku wystąpienia litery R. Następnym znakiem określa numer bloku, do którego dany fakt lub reguła należy. Ostatnią część to trzycyfrowy numer przypisany do danego parametru. Dodatkowo symbol rozszerzany jest jeszcze o identyfikator z numerem elektrowni wiatrowej lub GPO umieszczany na początku jako prefiks. Ponieważ nazwy bloków w różnych elementach farmy wiatrowej nie powtarzają się, więc można w sposób jednoznaczny określić, z jakim typem elementu mamy do czynienia. I tak w przypadku wystąpienia symbolu WTG01RB003 wiemy, że wskazuje on na trzecią regułę bloku B w turbinie o numerze 1. Reguła ta oznacza wystąpienie sygnału zatrzymania pracy turbiny z powodu zbyt wysokiej temperatury szyn zbiorczych.

4. Podsumowanie

Problematyka tworzenia ekspertowych baz wiedzy to wyspecjalizowana dziedzina nauki odnosząca się do opracowania metod i zasad budowy i organizacji zbiorów informacji wiedzy inżynierskiej, diagnostycznej oraz eksploatacyjnej o badanym złożonym obiekcie technicznym. Uwzględnia ona także opis (zbiór)

reguł wnioskujących (diagnostycznych) i zawiera zbiór stanów właściwych dla danego zbioru reguł. Podstawą tworzenia zbioru wiedzy inżynierskiej o danym obiekcie badania jest wiedza, jaką dysponuje użytkownik danego obiektu w zakresie jego budowy, użytkowania i eksploatacji. Wiedza inżynierska o danym obiekcie jest uzupełniana (rozszerzana) o zbiór informacji diagnostycznej obiektu wyznaczonej poprzez wykonanie opracowania diagnostycznego obiektu.

Wykonane modele funkcjonalno-diagnostyczne badanych urządzeń są podstawowymi narzędziami pomocniczymi przy budowaniu baz wiedzy ekspertowych dla badanego urządzenia. Można zatem powiedzieć, że im bardziej będą te schematy wykonane właściwie i wiarygodnie, to będą bardziej przydatne do budowania baz wiedzy. Schematy funkcjonalno-diagnostyczne urządzeń, na bazie których są budowane bazy wiedzy, muszą także zawierać możliwie jak najwięcej niezbędnych informacji: użytkowych, technologicznych eksploatacyjnych i innych dla inżyniera budującego daną bazę wiedzy. Do poszukiwanych informacji podczas opracowywania baz wiedzy należą między innymi: relacje między elementami funkcjonalnymi w obiekcie, połączenia oraz zawiązki funkcjonalne i diagnostyczne, miejsce wypracowania określonego sygnału diagnostycznego i jego współzależność z innymi sygnałami w strukturze wewnętrznej obiektu.

Praca finansowana z Projektu Badawczego Statutowego Politechniki Koszalińskiej nr 504.02.33.

Artykuł wpłynął do redakcji 16.07.2019 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 23.09.2019 r.

Stanisław Duer <https://orcid.org/0000-0001-9627-015X>

LITERATURA

- [1] BĘDKOWSKI L., DĄBROWSKI T., *Podstawy eksploatacji*, cz. 2, WAT, Warszawa, 2006, s. 187.
- [2] BĘDKOWSKI L., *Elementy ogólnej teorii diagnostyki technicznej*, WAT, Warszawa, 1981.
- [3] DUER S., ZAJKOWSKI K., DUER R., WRZESIEŃ P., BERNATOWICZ D., *Ekspertowa baza wiedzy wspomagająca diagnozowanie urządzeń farmy wiatrowej*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2017, s. 163.
- [4] DUER S., WRZESIEŃ P., DUER R., *Creating of structure of facts for the knowledge base of an expert system for wind power plant's equipment diagnosis*, EEMS 2017, E3S Web of Conferences 19, 01029 (2017). DOI: 10.1051/e3sconf/20171901038.
- [5] DUER R., DUER S., *Badanie diagnostyki urządzeń elektrowni słonecznej w logice 2- i 3-wartościowej*, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 66, 1, 2017, s. 67-79, DOI: 10.5604/01.3001.0009.9485.
- [6] DUER S., BERNATOWICZ D., *The computer diagnostic program (DIAG 2) for identifying states of complex technical objects*, EEMS 2017, E3S Web of Conferences 19, 01029, 2017, DOI: 10.1051/e3sconf/20171901029.
- [7] DHILLON B.S., *Applied Reliability and Quality, Fundamentals, Methods and Procedures*, Springer – Verlag London Limited, 2006, p. 186.
- [8] FLASIŃSKI M., *Wstęp do sztucznej inteligencji*, PWN, Warszawa, 2011, s. 331.

- [9] HOJJAT A., SHIH-LIN HUNG, *Machine learning, neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems*, John Wiley and Sons, Inc., 1995.
- [10] MADAN M. GUPTA, LIANG JIN, NORIYASU H., *Static and Dynamic Neural Networks. From Fundamentals to Advanced Theory*, John Wiley End Sons, Inc., 2003, p. 718.
- [11] OSOWSKI S., *Sieci neuronowe*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1996, s. 241.
- [12] POKORÁDI L., DUER S., *Investigation of maintenance process with Markov matrix*, Proceedings of the 4th International Scientific Conference On Advances In Mechanical Engineering, 13-15 October 2016, Debrecen, Hungary, pp. 402-407.
- [13] ROSIŃSKI A., *Reliability analysis of the electronic protection systems with mixed – three branches reliability structure*. Reliability, Risk and Safety. Theory and Applications, vol. 3. [ed:] R. Bris, C. Guedes Soares, S. Martorell, CRC Press/Balkema, London, UK 2010.

S. DUER

Functional and diagnostic model of a hybrid power system using renewable energy sources

Abstract. The article presents the problem of building a diagnostic base of knowledge for a hybrid power system for the needs of the organization of the diagnosis process. The basis for obtaining the diagnostic in-formation, regarding devices of the hybrid power system, is functional and diagnostic analysis of the tested object. The effect of the diagnostic development's process is a model of functional and diagnostic structure, determined sets of basic elements, and diagnostic signals along with assigned standard signals.

Keywords: technical diagnostics, diagnostic reasoning, multivalent logic, artificial intelligence

DOI: 10.5604/01.3001.0013.5561