



AGH

Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii

SEMINARIUM

Inteligentne systemy elektroenergetyczne (ang. Smart Grid)

**Wykorzystanie metody rozkładu
kanonicznego wektora zmiennych
losowych w prognozowaniu**

Dr hab. inż. Tomasz Popławski Prof. PCz



INNOWACYJNA GOSPODARKA

NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



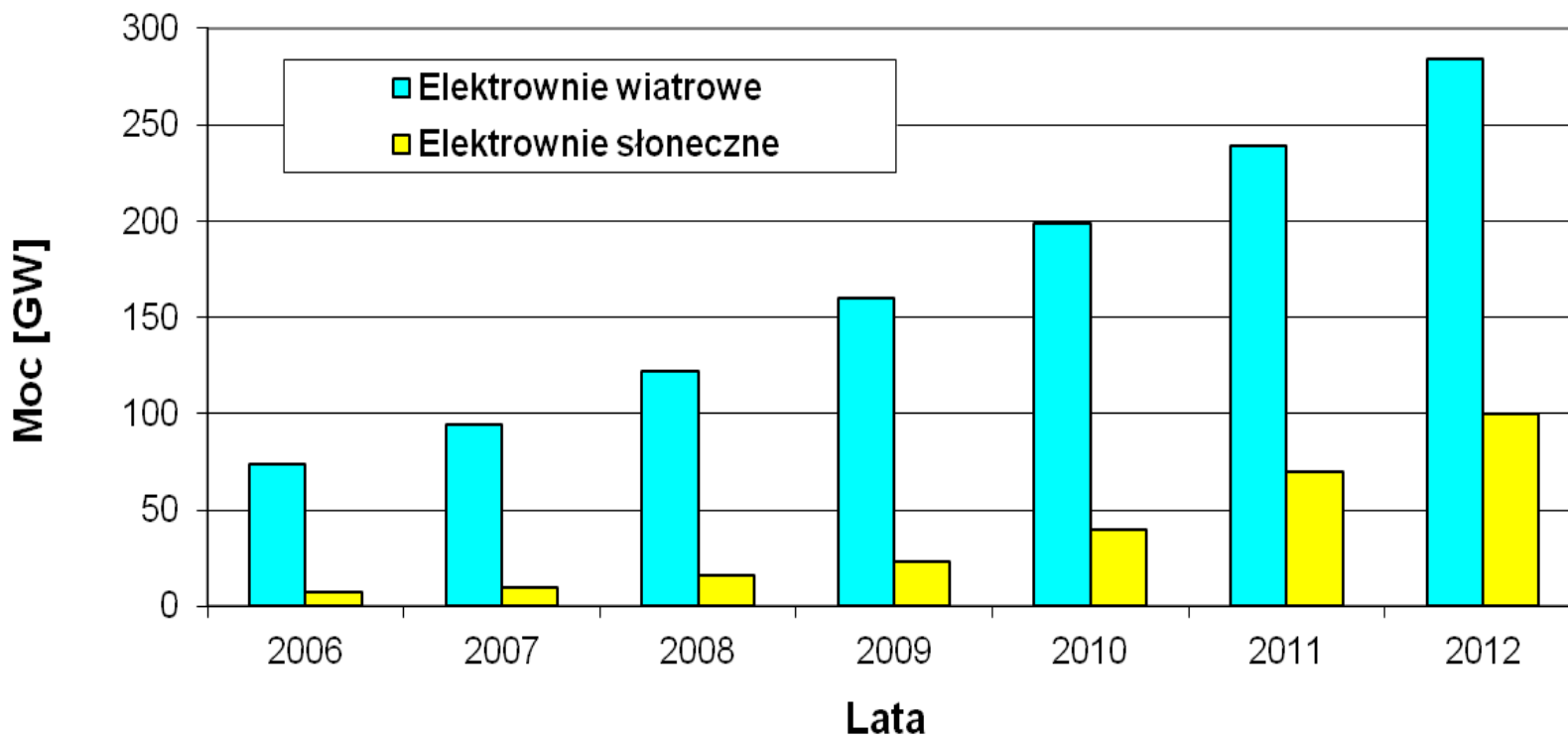
Badania nad opracowaniem wytycznych, technik i technologii dla systemów kompensacji mocy biernej, inteligentnego monitoringu wewnętrznych sieci elektroenergetycznych oraz ogniw fotowoltaicznych dedykowanych obiektom hybrydowym opartym wyłącznie o źródła odnawialne

Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013

Priorytet 1 - Badania i rozwój nowoczesnych technologii, Poddziałanie 1.3.1 - Projekty Rozwojowe

Energetyka odnawialna na świecie

- W ostatnich latach intensywnie rośnie wykorzystanie energii wiatrowej i słonecznej



Rys.1. Całkowita moc elektrowni wykorzystujących odnawialne źródła energii w [GW].

Źródło: Global Wind Energy Commission.

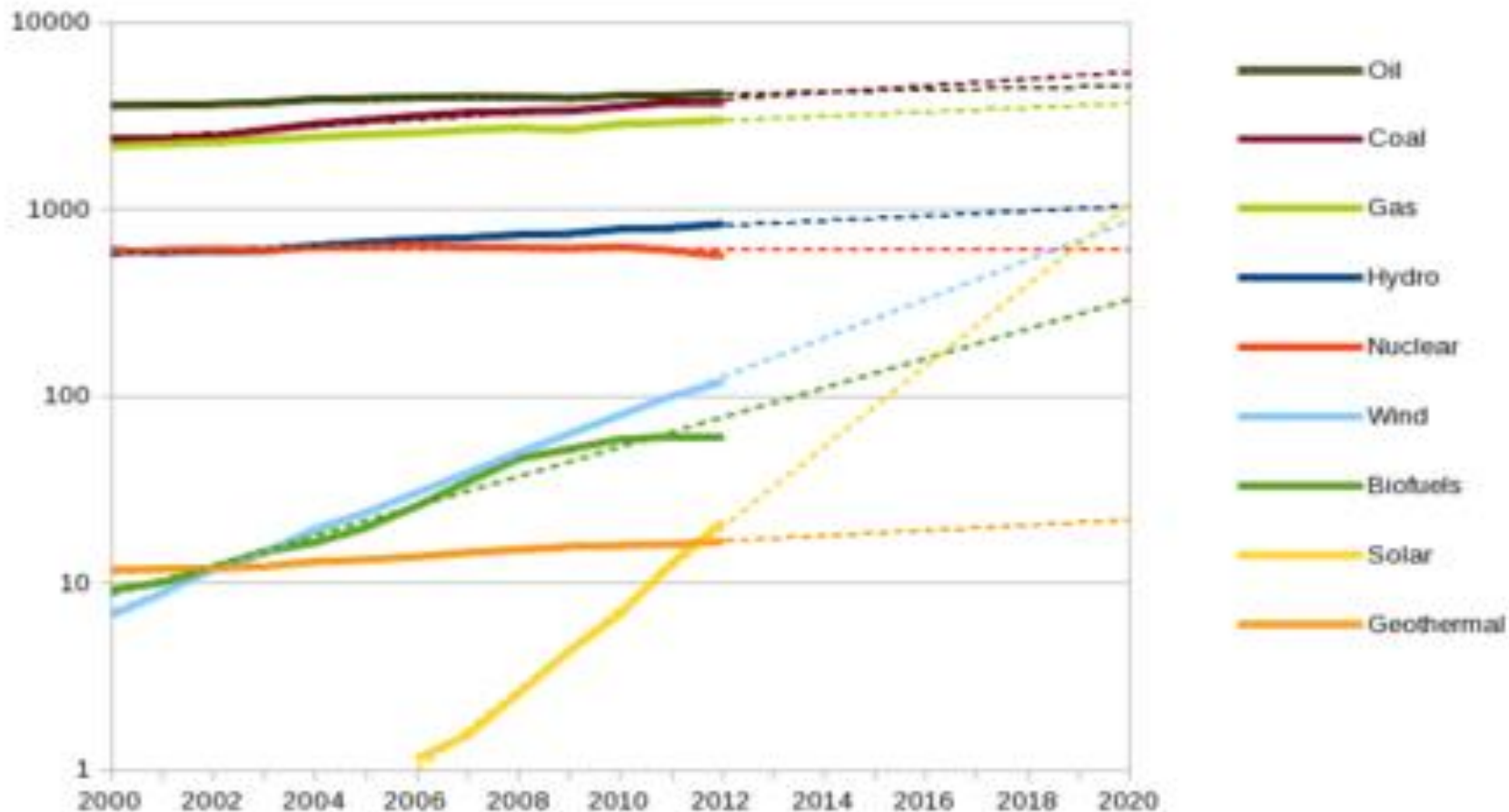
Energetyka odnawialna na świecie

Tab.1. Moc elektrowni wiatrowych na świecie w [MW]

Kraj	2009	2010	2011	2012	Wzrost 2012/2011
Chiny	25 810	44 733	62 733	75 564	20,5%
Stany Zjednoczone	35 159	40 180	46 919	60 007	27,9%
Niemcy	25 777	27 215	29 075	31 332	7,8%
Hiszpania	18 865	20 676	21 637	22 796	5,4%
Indie	11 807	13 065	15 800	18 421	16,6%
Wielka Brytania	4 245	5 203	6 018	8 845	47,0%
Włochy	4 850	5 787	6 747	8 144	20,7%
Francja	4 574	5 660	6 640	7 196	8,4%
Kanada	3 319	4 008	5 265	6 200	17,8%
Portugalia	3 357	3 702	4 290	4 525	5,5%
Świat	159 766	196 653	239 000	282 482	18,2%

Źródło: Global Wind Energy Commission.

Energy produced (Mtoe)



Rys.2. Wykorzystanie różnych źródeł energii przez ludzkość w latach 2000-2012 w Mtoe (przedstawione w skali logarytmicznej) i wykres trendu do roku 2020

Źródło: BP Statistical World Energy Review 2013, Koncern British Petroleum

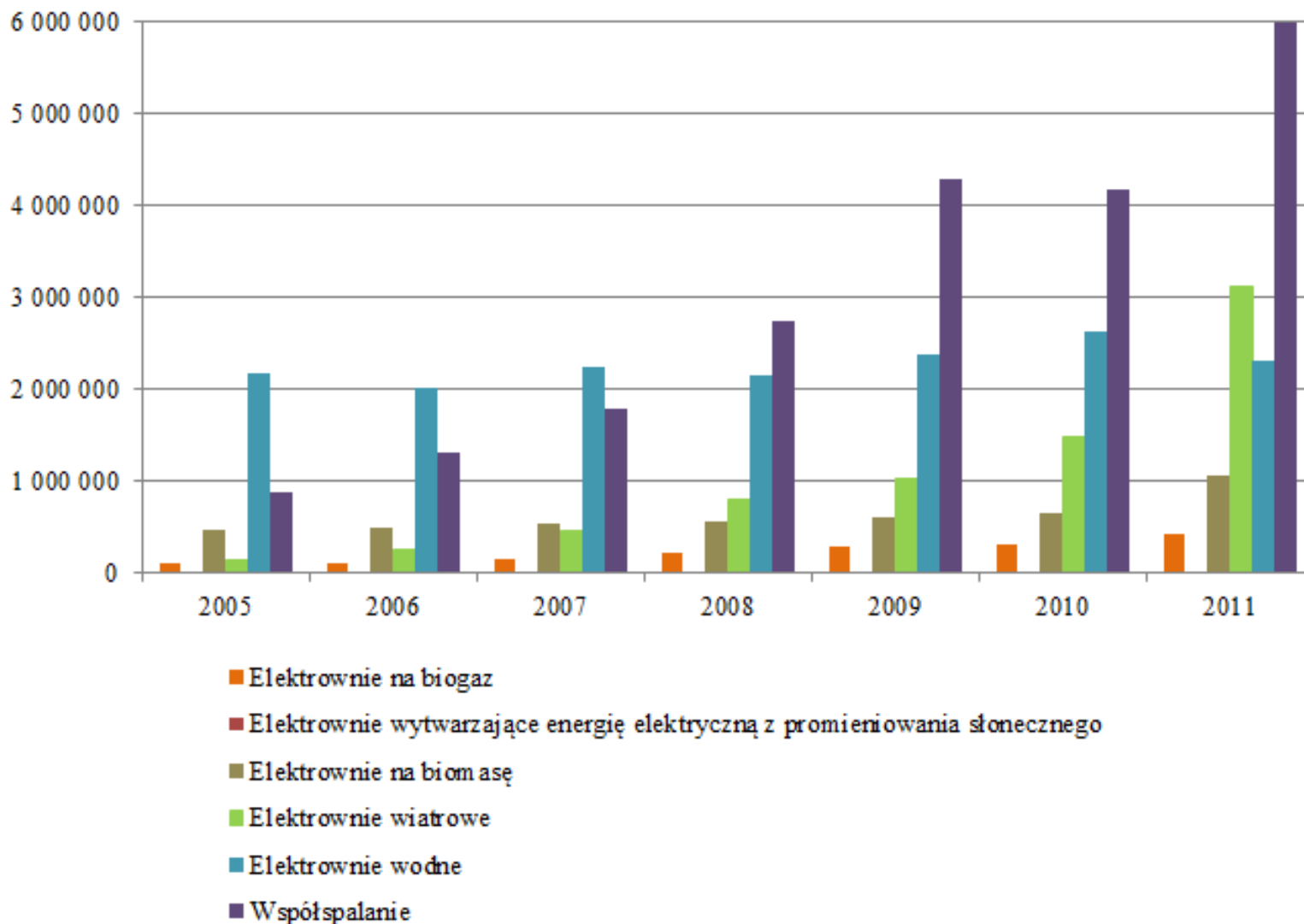
Energetyka odnawialna na świecie

- ⊙ Obecne trendy wskazują, że do 2020 poziom wyprodukowanej energii z wiatru może wzrosnąć ok. 10-krotnie, a energii słonecznej ok. 100-krotnie.
- ⊙ Gdyby zachować obecne trendy w 2020 roku zarówno energetyka słoneczna, jak i energetyka wiatrowa liczone osobno będą produkowały więcej energii elektrycznej niż wszystkie elektrownie jądrowe na świecie.

Energetyka odnawialna w Polsce

Rok	Udział OZE wykonany wg. umorzonych ŚP + opłata zastępcza
[-]	[%]
2005	2,956
2006	3,6
2007	5,271
2008	6,987
2009	8,674
2010	10,4
2011	10,44
2012	10,444
2013	12,151

Źródło URE, data aktualizacji danych: 20.05.2014

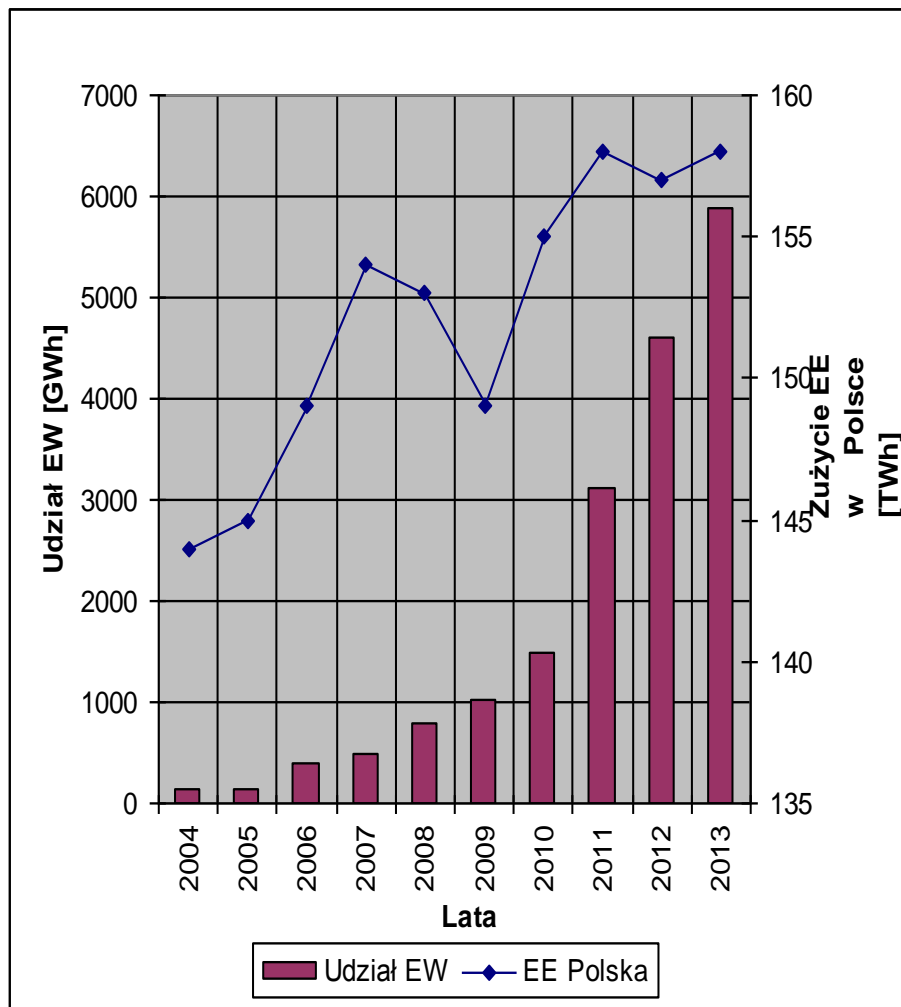


Rys.3. Produkcja energii elektrycznej w (MWh) przez poszczególne technologie OZE w latach 2005 – 2011

Opracowanie PSEW na podstawie danych URE. Stan na 10.12.2012

Energetyka wiatrowa w Polsce

Lata	Udział generacji wiatrowej w krajowym zużyciu energii elektrycznej		
	[GWh]	[TWh]	[%]
2004	142	144	0,099
2005	135	145	0,093
2006	388	149	0,260
2007	494	154	0,321
2008	790	153	0,516
2009	1029	149	0,691
2010	1485	155	0,958
2011	3126	158	1,978
2012	4599	157	2,929
2013	5888	158	3,727



Prognozowanie generacji wiatrowej

□ Metody prognozowania

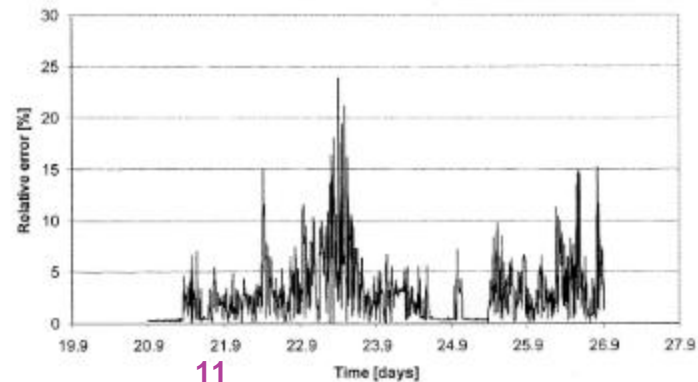
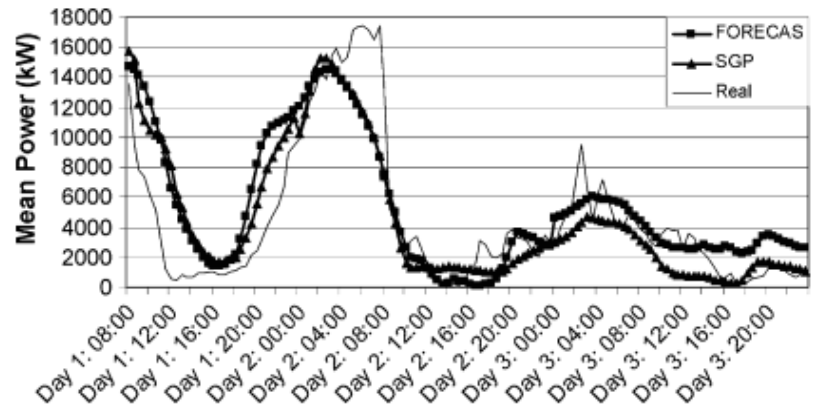
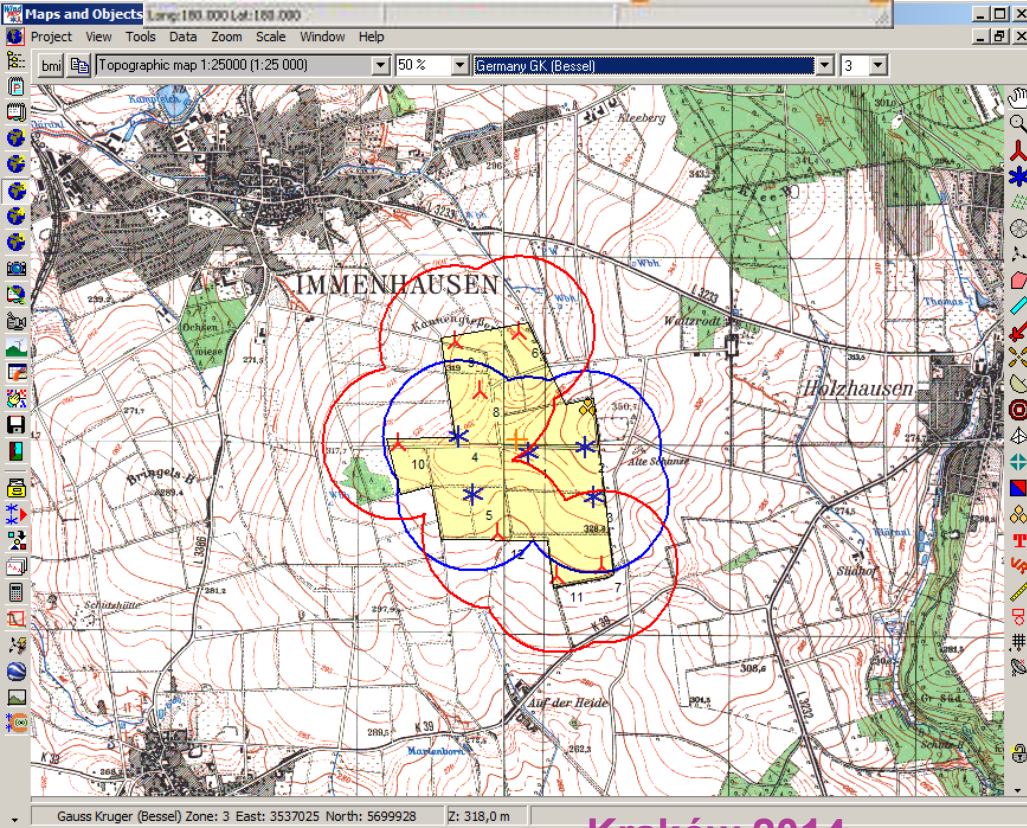
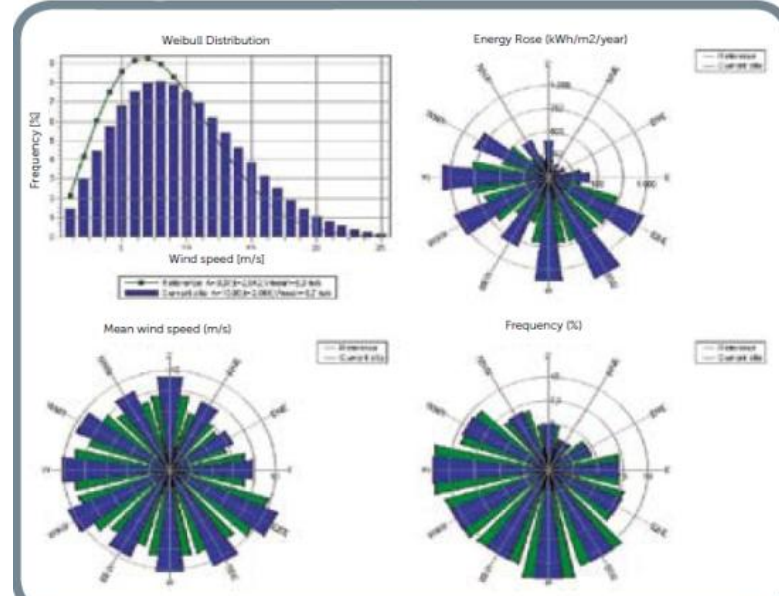
⊙ Podejście fizyczne

- przepływ wiatru wokół i wewnątrz farmy wiatrowej
- wykorzystanie krzywej mocy

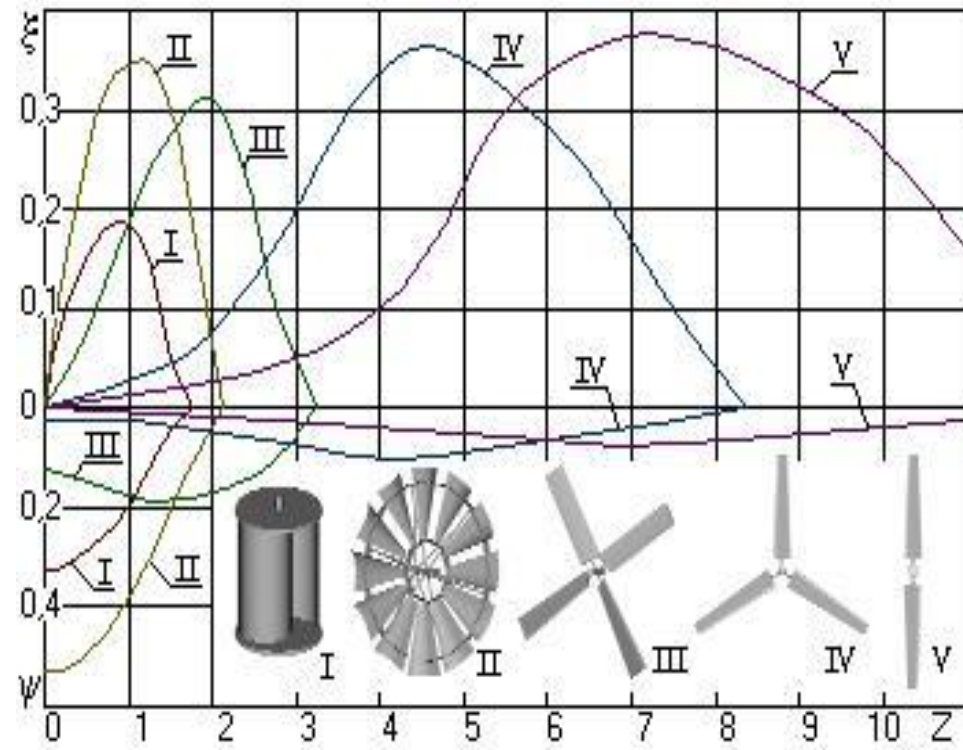
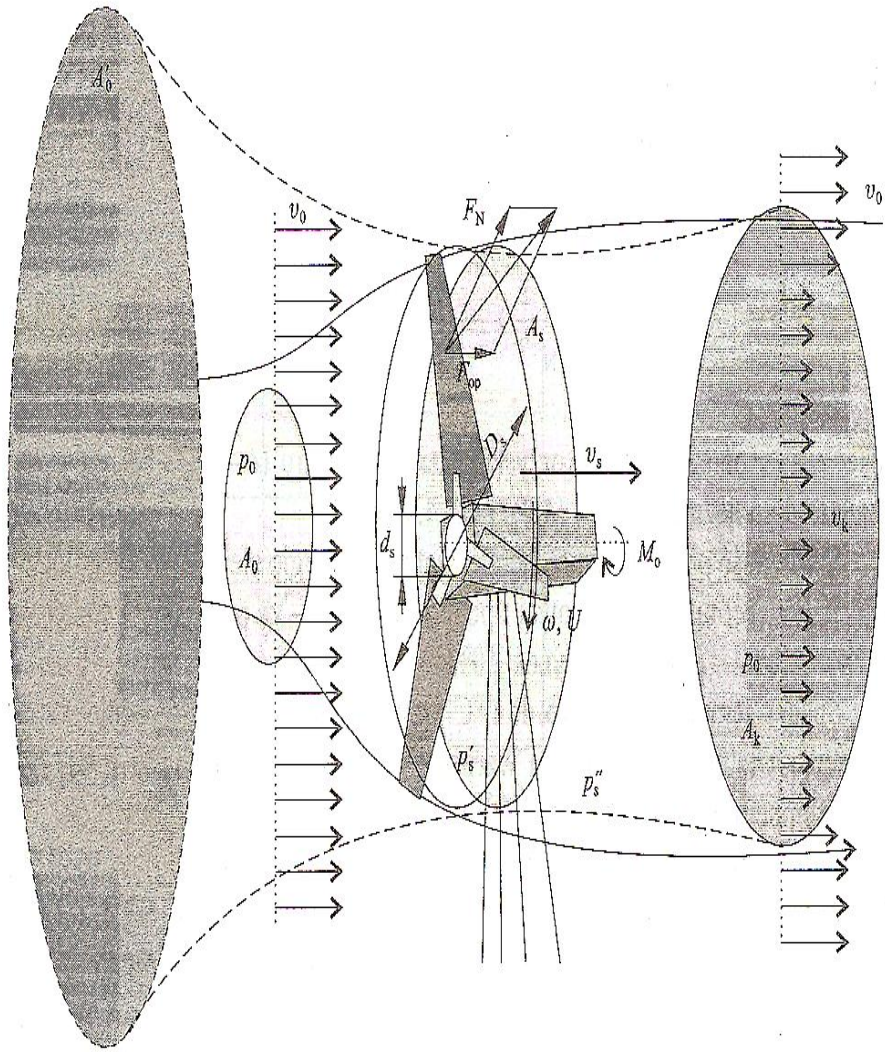
⊙ Podejście statystyczne

- uchwycenie relacji pomiędzy prognozą meteorologiczną (oraz historycznymi pomiarami), a mocą wyjściową
- brak założeń dotyczących zjawisk fizycznych

⊙ Podejście mieszane



Moc elektrowni wiatrowej



- $\xi = \frac{E_0 - E_2}{E_0} \cdot \eta$ ξ - współczynnik wykorzystania energii wiatru
 $\psi = \frac{M}{E_0}$ ψ - współczynnik momentu obrotowego
 $Z = \frac{U_{max}}{v}$ Z - wyróżnik szybkobieżności
 E_0 - energia strumienia powietrza przed wirnikiem
 E_2 - energia strumienia powietrza za wirnikiem
 M - moment obrotowy wiatraka
 U_{max} - prędkość obwodowa końcówki łopatki
 v - prędkość wiatru η - sprawność wiatraka

Jak skonstruować prognozę

$$P = \frac{1-e}{1+e} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_s^2}{D_s^2} \right) - \frac{C_{op}}{C_N} \frac{z}{3} + \frac{1 - \frac{d_s^2}{D_s^2}}{2z} - \frac{1 - \frac{d_s^2}{D_s^2}}{4} \right] \pi D_s^2 \rho v_0^3 \quad (1)$$

$$\hat{P}_t = f_t(X_{01}, X_{02}, \dots, X_{0i}, v) \quad (2)$$

Model rozkładu kanonicznego wektora zmiennych losowych (MRK) – geneza metody

- ⊙ Zakłada się, że pewien proces opisany jest wektorem losowym, którego składowe są ze sobą skorelowane
- ⊙ Stosując metodę rozkładu kanonicznego dokonujemy przekształcenia wektora o składowych skorelowanych na inny wektor o składowych nieskorelowanych, które są funkcjami liniowymi składowych wektora
- ⊙ Sposób dojścia do reguły prognostycznej - przykład poniżej

Model rozkładu kanonicznego wektora zmiennych losowych (MRK) – geneza metody

Poniżej mamy trzy wektory X objaśniające wektor Y , który mamy zamiar prognozować

	X_1	X_2	X_3	Y
	2	4	6	4
	3	9	11	5
	4	16	20	8
	5	25	30	15
	6	36	42	10
Średnia	4	18	21,8	8,4

Dokonujemy transformacji skorelowanych wektorów na wektory V , które nie są skorelowane

$$X_{01} = X_1 - \bar{X}_1$$

	X_{01}	X_{02}	X_{03}	$X_{04}=Y_{01}$
	-2	-14	-15,8	-4,4
	-1	-9	-10,8	-3,4
	0	-2	-1,8	-0,4
	1	7	8,2	6,6
	2	18	20,2	1,6
Średnia	0,00	0,00	0,00	0,00

Wyznaczamy macierz kowariancji pomiędzy zmiennymi

$$COV(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} Cov(X01, X01) \\ Cov(X02, X01) & Cov(X02, X02) \\ Cov(X03, X01) & Cov(X03, X02) & Cov(X03, X03) \\ Cov(X04, X01) & Cov(X04, X02) & Cov(X04, X03) & Cov(X04, X04) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 16 & 130,8 \\ 18,2 & 148,6 & 168,96 \\ 4,4 & 33,6 & 38,68 & 15,44 \end{bmatrix}$$

Wyznaczamy współczynniki rozkładu kanonicznego

$$a_{k1} = \frac{k_{k1}}{k_{11}} \quad W_{vk} = k_{kk} - \sum_{s=1}^{k-1} a_{ks}^2 W_{vs} \quad a_{kl} = \frac{1}{W_{vl}} (k_{kl} - \sum_{s=1}^{l-1} a_{ks} a_{ls} W_{vs})$$

gdzie:

- k_{11} - moment korelacyjny zmiennych,
- $W_{Xs}, Var(X_s)$ - wariancja s -tej składowej w kategorii X,
- $W_{Vs}, Var(V_s)$ - wariancja s -tej składowej w kategorii V,

Ostatecznie, uzyskujemy macierz współczynników rozkładu kanonicznego

$$\begin{bmatrix} a_{11} = 1,0 \\ a_{21} = 8,0 & a_{22} = 1,0 \\ a_{31} = 9,1 & a_{32} = 1,07 & a_{33} = 1,0 \\ a_{41} = 2,2 & a_{41} = -0,57 & a_{43} = 2,82 & a_{44} = 1,0 \end{bmatrix}$$

Możemy wyznaczyć wektory V według formuły:

$$V_{01} = X_{01},$$

$$V_{02} = X_{02} - a_{21}V_1,$$

$$V_{03} = X_{03} - a_{31}V_1 - a_{32}V_2,$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$V_{0i} = X_{0i} - a_{i1}V_1 - a_{i2}V_2 + \dots - a_{i,i-1}V_{i-1}$$

Wyznaczone dla naszego przykładu wektory V

V01	V02	V03	V04
-2,00	2,00	0,26	0,42
-1,00	-1,00	-0,63	0,01
0,00	-2,00	0,34	-2,51
1,00	-1,00	0,17	3,35
2,00	2,00	-0,14	-1,25

Prognozę szukanej zmiennej uzyskamy z równania:

$$\hat{P}_i = \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} V_j + \hat{V}_i + \bar{x}_{Xi} \quad (4)$$

Procedura postępowania przy prognozie

- Z historii procesu wyznaczamy współczynniki rozkładu kanonicznego
- Na podstawie danych historycznych wyznaczamy empiryczne warunkowe rozkłady częstości wektora V i na ich podstawie dystrybuanty o następującej postaci:

$$F_i(V_{i+1} | x_{0igr} < X_{0i} \leq x_{0ig,r+1}) \quad i = 1, 2, \dots, m - 1$$

- Używając generatora liczb losowych dokonujemy wielokrotnego losowania z dystrybuant warunkowych
- Uzyskane wartości uśredniamy uzyskując interesujące nas wartości prognozowane zgodnie z równaniem (4)

Model rozkładu kanonicznego wektora zmiennych losowych (MRK) – klasyfikacja, możliwości rozbudowy, zalety metody

- ⊙ Metoda należy do rodziny metod ekonometryczno-statystycznych
- ⊙ Poprzez odpowiednie operacje matematyczno-statystyczne na zmiennych objaśniających w modelu MRK pozbywamy się problemu współliniowości zmiennych (*w Modelu Regresji Wielowymiarowej współliniowość zmiennych eliminuje je jako zmienne do modelu predykcji*)
- ⊙ Model MRK jest uniwersalny pod względem horyzontu prognozy. W zależności od potrzeb możemy budować prognozy: **ultrakrótkoterminowe, krótkoterminowe, średnioterminowe i długoterminowe.**

MRK – klasyfikacja, możliwości rozbudowy, zalety metody

- ◉ W modelu MRK korzysta się przy prognozie z empirycznych rozkładów prawdopodobieństw warunkowych zmiennych objaśniających co pozwala w praktyce skonstruować model o różnym składzie wejściowym zmiennych objaśniających do modelu (*model zapewnia automatyczną wielowariantowość*)
- ◉ Na dokładność modelu MRK ma wpływ odpowiedni **skład zmiennych objaśniających oraz ich kolejność**. W literaturze podaje się *kilkanaście kryteriów prawidłowego doboru zmiennych objaśniających w prognostycznych modelach ekonometrycznych*. Ponieważ w MRK model prognozy opiera się o rozkład kanoniczny wektora losowego to większość z tych kryteriów jest spełniona z definicji.

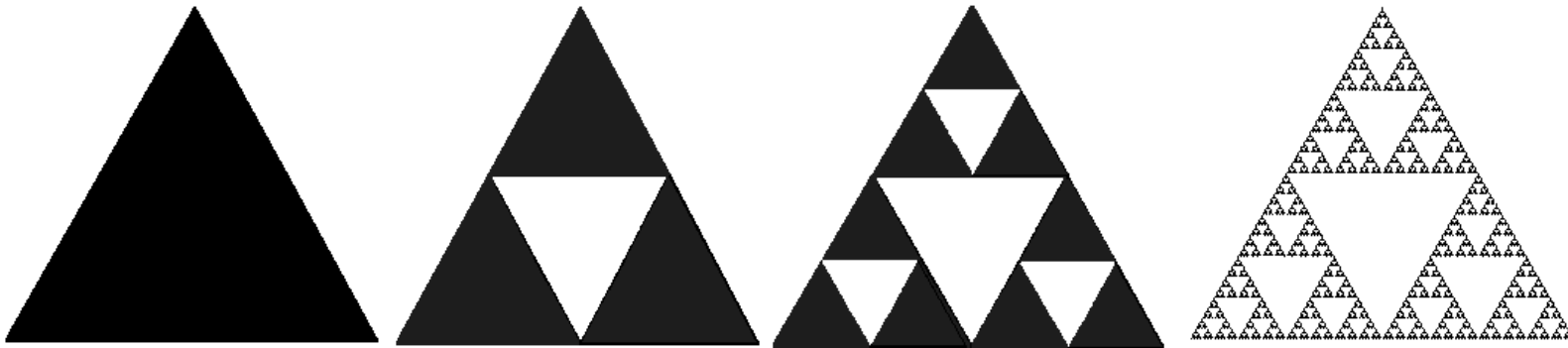
MRK – kierunki rozwoju metody

- ⊙ Rozbudowa modelu MRK o implementację metody składowych głównych w celu ustalania właściwej kolejności składowych zmiennych objaśniających
- ⊙ Rozbudowa modelu o implementację metodę Pojemności Integralnej Hellwiga w celu ustalania poprawnej kolejności zmiennych objaśniających
- ⊙ Rozbudowa modelu o elementy analizy fraktalnej w celu pozyskania dodatkowych zmiennych objaśniających niosących informacje o charakterze prognozowanego procesu

MRK i analiza fraktalna

- Fraktalem określa się jako zbiór posiadający określone cechy:
 - ma nietrywialną strukturę w każdej skali,
 - struktura ta nie daje się łatwo opisać w języku tradycyjnej geometrii euklidesowej,
 - jest samopodobny, jeśli nie w sensie dokładnym, to przybliżonym lub stochastycznym,
 - jego wymiar fraktalny jest większy niż jego wymiar topologiczny
- Można zaobserwować dwa typy fraktali
 - deterministyczne (tworzone za pomocą pewnej reguły, zbiór Cantora, krzywa Kocha, zbiór Mandelbrota, zbiory Julii),
 - losowe (linia brzegowa, drzewo, płuca)

Analiza fraktalna



Rys.4 Etapy tworzenia trójkąta Sierpińskiego.

- Jednym z podstawowych elementów charakteryzujących fraktal jest jego wymiar
 - Hausdorffa
 - samopodobieństwa
 - pudełkowy
 - pojemnościowy
 - informacyjny
 - wymiar euklidesowy
 - cyrkłowy

Wykładnik Hursta

- ◉ Istnieje związek między wymiarem fraktalnym szeregu czasowego, a wykładnikiem Hursta

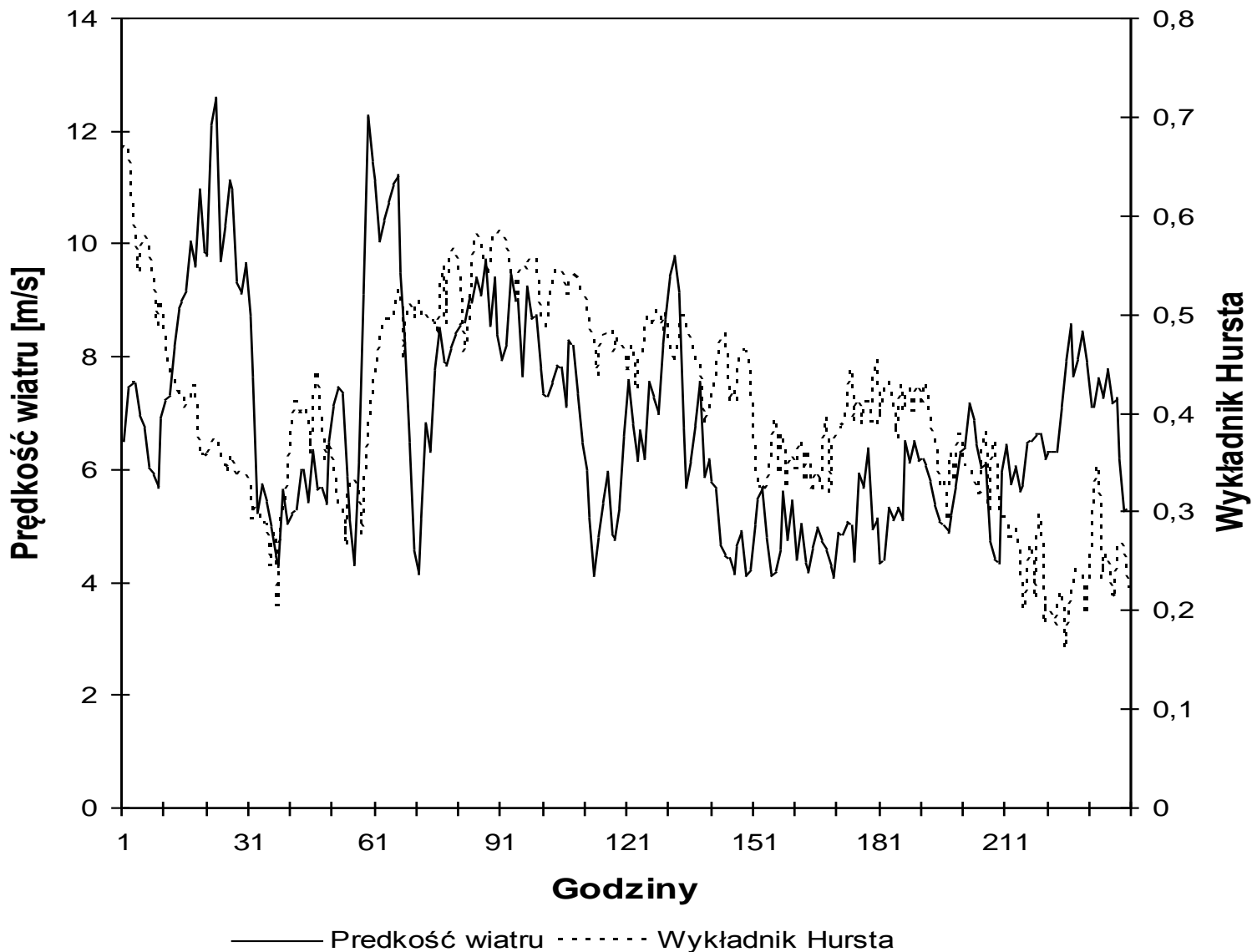
$$D = 2 - H$$

- Gdzie:

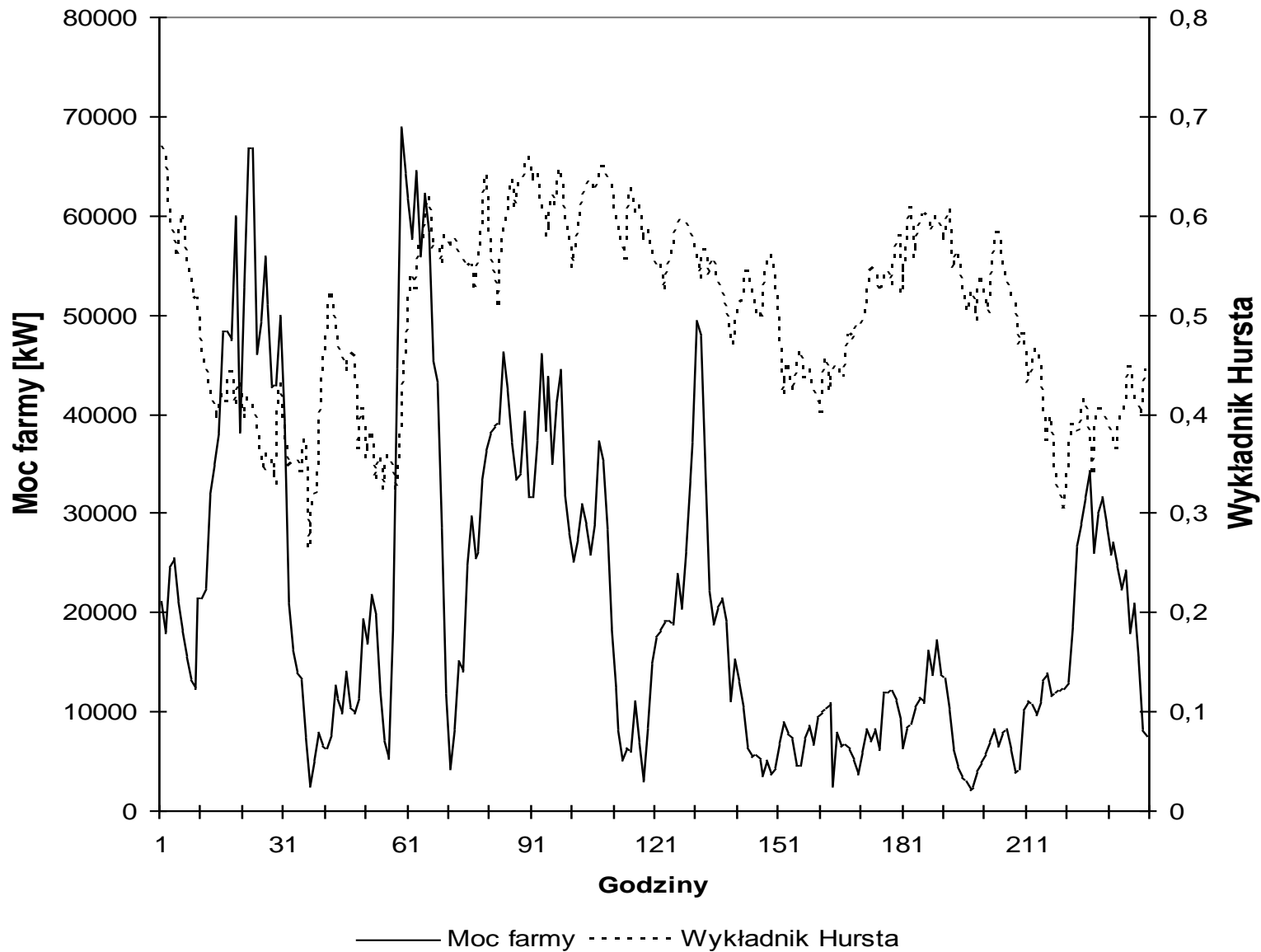
D - wymiar fraktalny

H - wykładnik Hursta

- ◉ Można wyróżnić trzy grupy procesów w zależności od jego wartości:
 - $H=0,5$ - szereg losowy, brak korelacji
 - $0 < H < 0,5$ - szereg antypersystentny
 - $0,5 < H < 1$ - szereg persystentny



Rys.5. Prędkość wiatru zanotowana dla farmy wiatrowej oraz wyznaczone wykładniki Hursta



Rys.6. Moc generowana na farmie wiatrowej oraz wyznaczone wykładniki Hursta

Modele prognozy

⊙ MRK-R

- Model z prognozowaną dla farmy prędkością wiatru jako zmienną objaśniającą
- Dynamicznie wyznaczaną zmienną opóźnioną zmienną mocy farmy $P_{P,t-24}$

$$\hat{P}_t = f \left(P_{P,t-24}, \hat{v}_t \right)$$

Modele prognozy

- MRK-H - model wzbogacony o dodatkowe dwie zmienne objaśniające:
 - prognozowaną dla farmy prędkością wiatru
 - Dynamicznie wyznaczaną zmienną opóźnioną zmienną mocy farmy $P_{P,t-24}$
 - dynamicznie wyznaczanym opóźnionym wykładnikiem Hursta dla prędkości wiatru $H_{V,t-24}$
 - dynamicznie wyznaczanym opóźnionym wykładnikiem Hursta dla mocy farmy $H_{P,t-24}$

$$\hat{P}_t = f \left(P_{P,t-24}, H_{V,t-24}, H_{P,t-24}, \hat{v}_t \right)$$

Aplikacja użytkowa

Prognoza MRK

Plik Parametry Wykres Wyczyść Informacje Koniec

Prognoza MRK

Plik Parametry Wykres Wyczyść Informacje Koniec

Prognoza MRK

Plik Parametry Wykres Wyczyść Informacje Koniec

Prognoza MRK

Plik Parametry Wykres Wyczyść Informacje Koniec

Budowa modelu Prognoza

Prognoza wygaśnięcia

Obliczenia

Dane wczytane

Zmienne obj. X wybrane

Start

Zmienne obj. X

Dostępne: Wybrane:

X1 X7
X2 X8
X3
X4
X5
X6
X9
X10

Zatwierdź

Wyniki

Lp	Błąd śr. [%]	Poz.1	Poz.2	Poz.3	Poz.4	Poz.5	Poz.6	Poz.7	Poz.8	Poz.9	Poz.10
1	7,47292	X 7									
2	11,37174	X 7	X 8								
3	12,23965	X 8									
4	12,93370	X 8	X 7								
5											

Liczba kombinacji dla których przeprowadzono obliczenia: 4

Liczba wybranych zmiennych objaśniających: 2

2009-01-19 16:36:02

Założenia eksperymentu

- ⊙ Moc zainstalowana farmy wiatrowej 90 MW
- ⊙ Ustalanie dynamiczne parametrów modeli na tej samej próbie 960 obserwacji
- ⊙ Wybrany losowo odcinek pracy farmy wiatrowej składający się z 1300 godzin obserwacji
- ⊙ Krokowe wyznaczanie wykładników Hursta z ciągu 60 obserwacji
- ⊙ Sprawdzające prognozy krokowe na 240 godzin do przodu z interwałem krokowym 24 godziny

Wyniki eksperymentu

Średnie, maksymalne i minimalne znormalizowane bezwzględne błędy procentowe uzyskane w eksperymencie dla badanych metod predykcji

Model	N	NMAPE		
		Min	Max	Śre
MRK-R	240	0,01	21,9	5,3
MRK-H	240	0,03	20,7	4,7

Dziękuję za uwagę!

