



# PRODUKCJA ENERGII ELEKTRYCZNEJ I CIEPŁA Z ODNAWIALNYCH NOŚNIKÓW W WARUNKACH RYZYKA

**Janusz Sowiński, Tadeusz Pydych, Robert Tomaszewski, Artur Wachtarczyk**  
Instytut Elektroenergetyki  
Politechnika Częstochowska



# Agenda

- Modelowanie procesów w elektroenergetyce w warunkach determinizmu, ryzyka i niepewności
- Akty prawne dotyczące OZE
- Statystyka pozyskania i wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych
- Produkcja energii elektrycznej i ciepła z odnawialnych źródeł energii
- Modelowanie procesów dynamicznych
- Symulacje struktury produkcji energii elektrycznej i ciepła z odnawialnych nośników energii
- Podsumowanie

# Modelowanie procesów w elektroenergetyce w warunkach determinizmu, ryzyka i niepewności

- **model deterministyczny** - wyjście modelu może być w pełni określone za pomocą informacji wejściowych
- **model probabilistyczny** - wartości zmiennych wejściowych opisują wartości wyjściowe z pewnym prawdopodobieństwem
- **proces stochastyczny** - funkcja, której wartości są zmiennymi losowymi (np. proces Markowa)

# Modelowanie procesów w elektroenergetyce w warunkach determinizmu, ryzyka i niepewności

- **Rachunek decyzyjny w warunkach niepewności** wiąże się z decyzjami, dla których **nie jest znany rozkład prawdopodobieństwa ich konsekwencji**. Próba praktycznego rozwiązania problemu decyzyjnego w warunkach niepewności zazwyczaj sprowadza się do określenia subiektywnego prawdopodobieństwa zajścia danej konsekwencji.
- **Ryzyko** oznacza pewną miarę strat, możliwych jako konsekwencja podjęcia decyzji. W warunkach ryzyka **znane jest prawdopodobieństwo** wystąpienia każdej możliwej konsekwencji.

# Modelowanie procesów w elektroenergetyce w warunkach determinizmu, ryzyka i niepewności

- **Proces Wienera** to proces gaussowski, bo zbiór wartości zmiennych losowych ma rozkład normalny.
- Proces Wienera można modelować wykorzystując **stochastyczne równania różniczkowe (SDE – *stochastic differential equations*)**.

# Akty prawne dotyczące OZE



- **Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r.** w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych. Udział OZE w finalnym zużyciu energii brutto w Polsce powinien osiągnąć poziom 15 % w 2020 roku.
- Ważnym dokumentem programowym dla rozwoju OZE w Polsce była **„Polityka energetyczna Polski do roku 2030”**
- Przyjęty w 2010 r. przez Radę Ministrów i przesłany do Komisji Europejskiej **„Krajowy plan działań w zakresie energii ze źródeł odnawialnych”** zakłada, że podstawowymi działaniami zwiększającymi udział OZE w bilansie energetycznym będzie większe wykorzystanie biomasy oraz energii wiatru.



# Akty prawne dotyczące OZE (cd)

Podstawowymi **aktami normatywnymi** regulującymi obowiązki z zakresu wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych w Polsce są:

- **Ustawa z dnia 26 lipca 2013 r. o zmianie ustawy – Prawo energetyczne oraz niektórych innych ustaw** (Dz. U. z 2013 r. poz. 984)
- **Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne** (Dz. U. z 2012 r. poz. 1059),
- **Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii** (Dz.U. Nr 156, poz. 969 z późn.zm.),
- **Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych** (Dz.U. Nr 169, poz. 1199) wraz z odpowiednimi przepisami wykonawczymi.

# Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 15 sierpnia 2011 r.

Obowiązek spoczywający na danym przedsiębiorstwie (w zakresie zakupu certyfikatów/wniesienia opłaty zastępczej) na dany rok stanowi odpowiedni procentowy udział energii elektrycznej w całkowitej ilości energii elektrycznej dostarczonej przez to przedsiębiorstwo do odbiorców końcowych.

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008 r. o świadectwach pochodzenia OZE, udział ten wynosi:

11,4% za rok 2014  
11,9% za rok 2015  
12,4% za rok 2016  
12,9% za rok 2017



# Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 października 2012 r.

Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 października 2012 r. zmodyfikował obowiązek uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia albo uiszczenia opłaty zastępczej do udziału co najmniej równego:

- 1) 10,4% – w 2012 r.;
- 2) 12,0% – w 2013 r.;
- 3) 13,0% – w 2014 r.;
- 4) 14,0% – w 2015 r.;
- 5) 15,0% – w 2016 r.;
- 6) 16,0% – w 2017 r.;
- 7) 17,0% – w 2018 r.;
- 8) 18,0% – w 2019 r.;
- 9) 19,0% – w 2020 r.;
- 10) 20,0% – w 2021 r.

# Akty prawne dotyczące OZE (cd)

- W dniu **22 grudnia 2011 r.** Ministerstwo Gospodarki zaprezentowało pakiet trzech ustaw: **nowe Prawo energetyczne, Prawo gazowe i ustawę o odnawialnych źródłach energii** (konsekwencja wymagań dyrektywy 2009/28/WE).
- W **czerwcu 2013 r.** Sejm uchwalił tzw. „mały trójpak energetyczny”, co uchroniło Polskę przed groźbą unijnych kar.
- **Ustawa o OZE** podpisana przez Prezydenta **11 marca 2015 r.**

# Ustawa o OZE

- **nowy system wsparcia**, promujący najefektywniejsze technologie
- zmiana systemu świadectw pochodzenia energii na **system aukcyjny**
- **poprawka prosumencka** ustalająca możliwość odsprzedaży energii elektrycznej zgodnie z taryfami gwarantowanymi
- wprowadzenie instytucji **sprzedawcy zobowiązanego**

# Dokumenty EC dotyczące OZE

- Środowiskowe wymagania sformułowane w *An Energy Policy for Europe, COM (2007), Brussels, January 10, 2007* zostały rozwinięte w dokumencie *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050, Brussels, 8.3.2011, COM(2011) 112 final*, a w horyzoncie do 2030 roku przedstawione w dokumencie *Green Paper. A 2030 framework for climate and energy policies, Brussels, 27.3.2013, COM(2013) 169 final*.
- Scenariusze do 2050 roku zakładają ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> o 80÷95% w stosunku do 1990 roku, głównie poprzez zwiększenie udziału OZE (udział 30% do 2030 roku), zwiększenie energetycznej efektywności oraz przekształcenie europejskiego systemu energetycznego w kierunku inteligentnej infrastruktury.

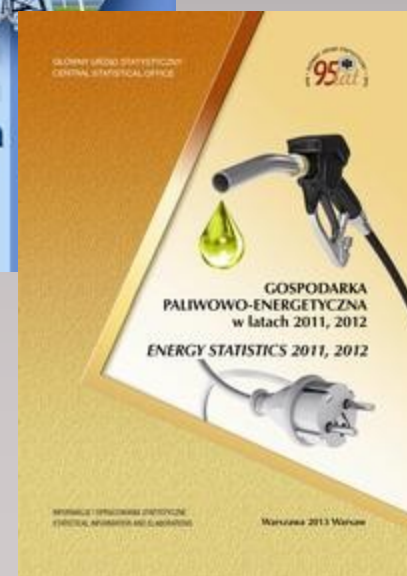
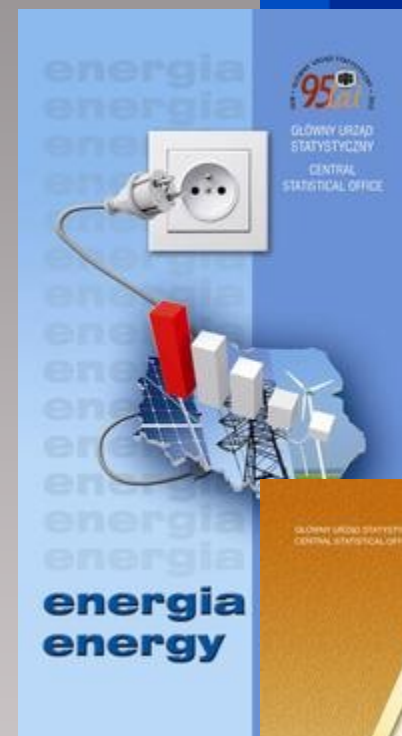
# Dane statystyczne

**Zakres danych** przygotowanych przez Agencję Rynku Energii S.A. oraz Główny Urząd Statystyczny w publikacji **Energia ze źródeł odnawialnych**

Publikacja zawiera zbiorcze dane statystyczne dotyczące pozyskania i zużycia energii z wykorzystywanych w Polsce odnawialnych źródeł energii, a w szczególności:

- energii wody,
- energii geotermalnej,
- energii słonecznej,
- energii wiatru,
- odpadów komunalnych,
- biopaliw stałych,
- biogazu,
- biopaliw ciekłych (dla transportu),
- ciepła otoczenia (środowiska naturalnego), przy zastosowaniu pomp ciepła.

REE 2015



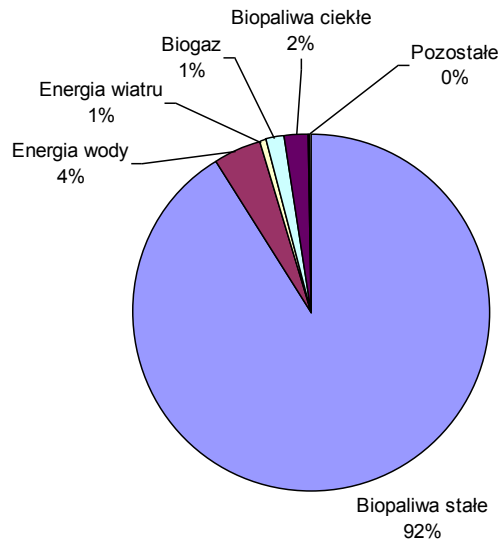
# Udział energii ze źródeł odnawialnych w ogólnym pozyskaniu energii pierwotnej ogółem w latach 2007-2012

W ostatnich latach rośnie udział energii pozyskiwanej ze źródeł odnawialnych w krajowym bilansie pozyskania energii pierwotnej, przy niewielkich zmianach w samym pozyskaniu energii pierwotnej.

Wyszczególnienie	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Pozyskanie energii pierwotnej ogółem [TJ]	3040160	2985356	2816880	2824028	2882363	3035604
Pozyskanie energii ze źródeł odnawialnych [TJ]	203141	226788	253352	287953	312828	356070
Udział energii ze źródeł odnawialnych w energii pierwotnej ogółem	6,7%	7,6%	9,0%	10,2%	10,9%	11,7%

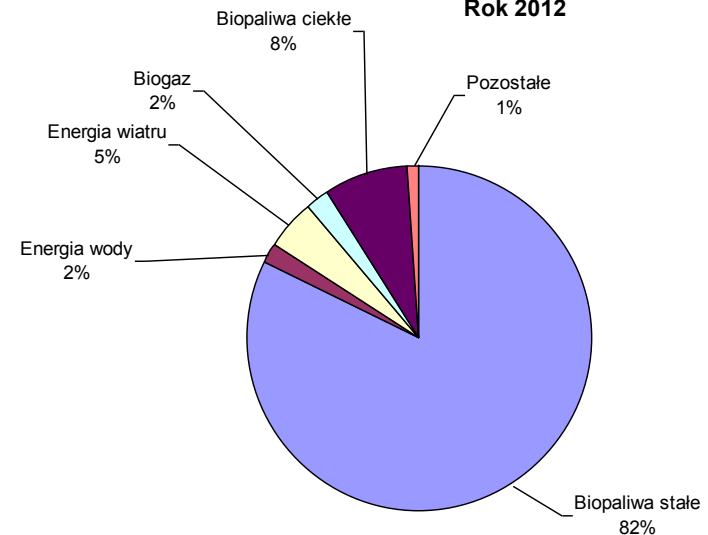
# Struktura pozyskania energii z odnawialnych nośników

**Rok 2007**



■ Biopaliwa stałe ■ Energia wody ■ Energia wiatru ■ Biogaz ■ Biopaliwa ciekłe ■ Pozostałe

**Rok 2012**



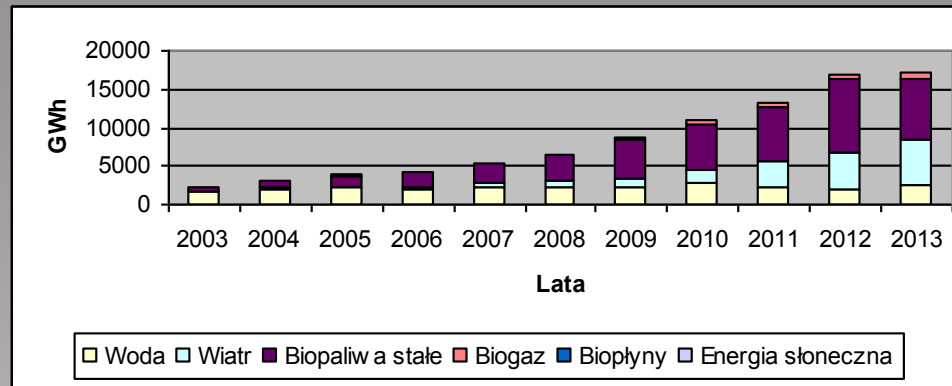
■ Biopaliwa stałe ■ Energia wody ■ Energia wiatru ■ Biogaz ■ Biopaliwa ciekłe ■ Pozostałe

# Produkcja energii elektrycznej z odnawialnych nośników [GWh]

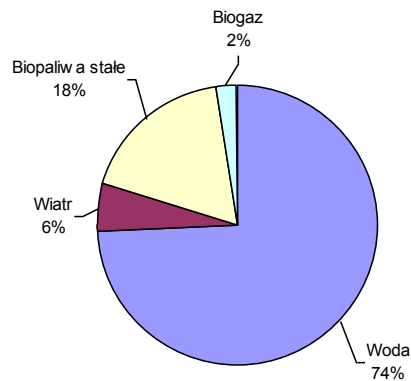
Wyszczególnienie	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
<b>Ogółem</b>	<b>2250</b>	<b>3074,4</b>	<b>3847,7</b>	<b>4291,2</b>	<b>5429,3</b>	<b>6606</b>	<b>8678,7</b>	<b>10888,8</b>	<b>13137</b>	<b>16878,9</b>	<b>17066,5</b>
<b>Woda z tego elektrownie</b>	<b>1671</b>	<b>2081,7</b>	<b>2201,1</b>	<b>2043,2</b>	<b>2352,1</b>	<b>2152,2</b>	<b>2375,1</b>	<b>2919,9</b>	<b>2331,4</b>	<b>2036,9</b>	<b>2439,1</b>
poniżej 1 MW	242	273,5	358,2	247,9	306,3	290,2	292,2	516	307	320,7	351,9
od 1 do 10 MW	431	616,9	504,2	566,6	658,1	605,4	627,9	667,2	636,1	619,5	645,3
powyżej 10 MW	998	1191,4	1338,7	1227,8	1387,7	1256,6	1455	1736,7	1388,3	1096,7	1442
<b>Wiatr</b>	<b>124</b>	<b>142,3</b>	<b>135,5</b>	<b>256,1</b>	<b>521,6</b>	<b>836,8</b>	<b>1077,3</b>	<b>1664,3</b>	<b>3204,5</b>	<b>4746,6</b>	<b>6003,8</b>
<b>Biopaliwa stałe</b>	<b>399</b>	<b>768,2</b>	<b>1399,9</b>	<b>1832,7</b>	<b>2360,4</b>	<b>3365,4</b>	<b>4904,1</b>	<b>5905,2</b>	<b>7148,4</b>	<b>9528,7</b>	<b>7923,5</b>
w tym współspalanie	-	620,5	1236,3	1644,6	2125,6	2963,3	4660,8	5592,5	6388,8	7238,6	3928,5
<b>Biogaz z tego</b>	<b>56</b>	<b>82,2</b>	<b>111,3</b>	<b>160,1</b>	<b>195,2</b>	<b>251,6</b>	<b>319,2</b>	<b>398,4</b>	<b>451,1</b>	<b>565,4</b>	<b>689,7</b>
biogaz z wysypisk odpadów	53	63,3	75,3	92	113,6	148,4	174,8	219,9	233,7	236,5	240,7
biogaz z oczyszczalni ścieków	2	18,1	35,4	66,7	79,5	94,9	122,7	132,4	149,8	193,7	233,5
biogaz pozostały	1	0,8	0,6	1,5	2,1	8,3	21,7	46,1	67,7	135,1	215,5
<b>Biopłyny</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>3</b>	<b>0,9</b>	<b>1,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,6</b>
<b>Energia słoneczna</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0,2</b>	<b>1,1</b>	<b>1,5</b>



# Produkcja energii elektrycznej z odnawialnych nośników (cd)

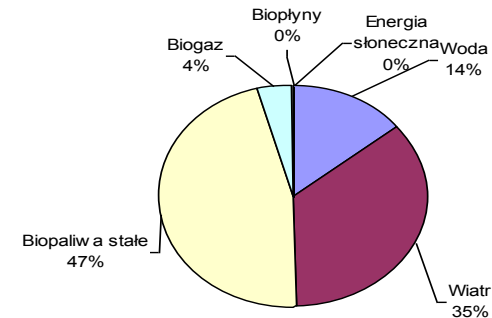


Rok 2003 - produkcja 2 250 GWh



Woda Wiatr Biopaliwa stałe Biogaz

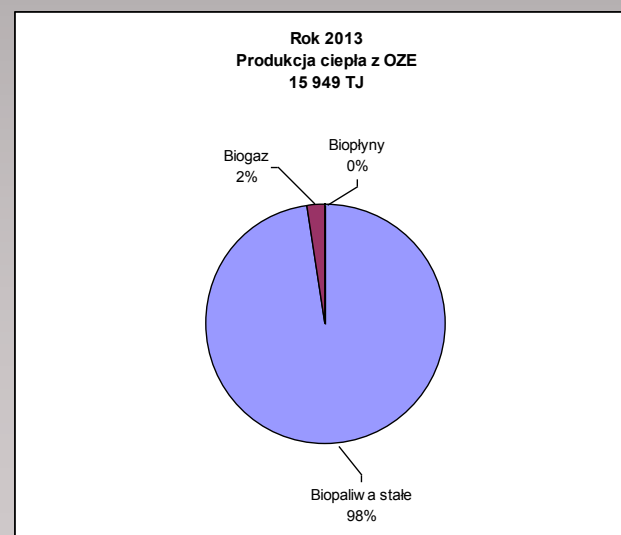
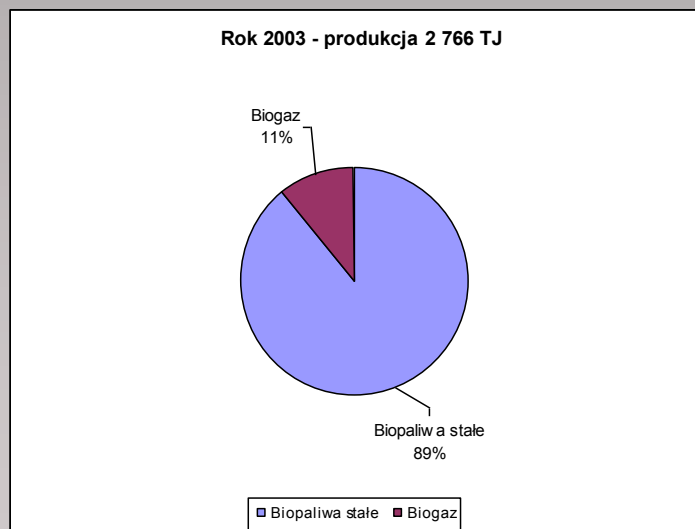
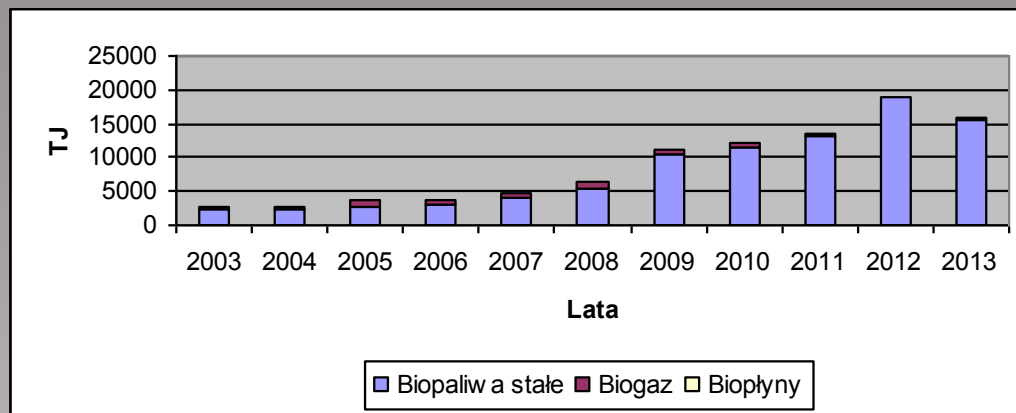
Rok 2013  
Produkcja energii elektrycznej z OZE 17 066,5 GWh



# Produkcja ciepła z odnawialnych nośników [TJ]

Wyszczególnienie	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Ogółem	2766	2791	3589	3748	4706	6340	11270	12231	13452	19052	15949
Biopaliwa stałe	2465	2242	2768	3049	4008	5414	10448	11479	13320	18840	15572
Biogaz z tego	301	549	821	699	698	926	817	751	131	212	377
biogaz z wysypisk odpadów	230	136	91	109	30	148	112	113	62	69	74
biogaz z oczyszczalni ścieków	61	411	727	583	658	734	624	617	23	40	128
biogaz pozostały	10	2	3	7	10	44	80	21	46	103	174
Biopłyny	-	-	-	-	-	-	5	1	1	0,1	0,4

# Produkcja ciepła z odnawialnych nośników (cd)



# Modelowanie procesów dynamicznych

- Procesy dynamiczne w ekonomii i energetyce, w których istnieją zaburzenia losowe można modelować za pomocą **równań stochastycznych typu równań Ito**
- Wykorzystanie **metody Eulera** do rozwiązywania stochastycznych równań różniczkowych umożliwia **symulację** kształtowania się wykorzystania odnawialnych nośników energii w produkcji energii elektrycznej i ciepła
- Proces stochastyczny wielu zmiennych ciągłych w czasie można opisać równaniami różniczkowymi o ogólnej postaci:

$$dX_t = F(t, X_t)dt + G(t, X_t)dW_t$$

gdzie:  $X$  – zmienna stanu,  $W$  – zmienna procesu Wienera (ruchów Browna),  $F$  – funkcja determinująca trend,  $G$  – funkcja dyfuzji

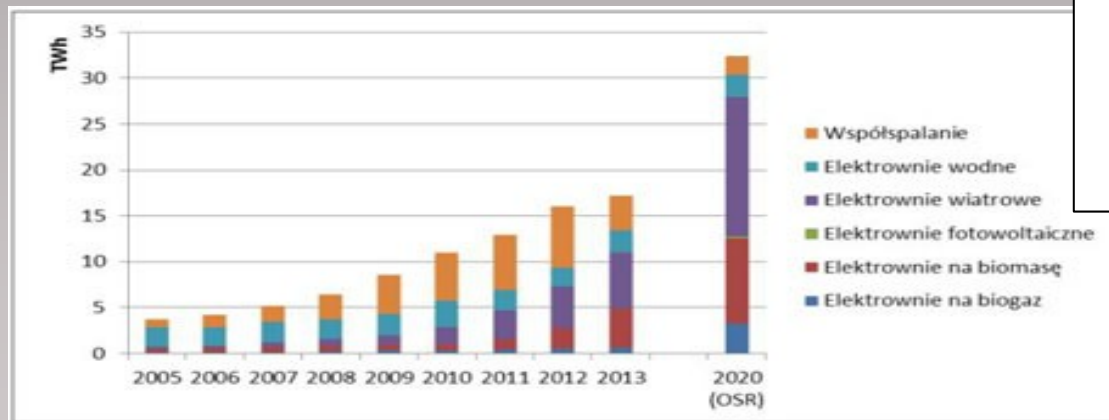
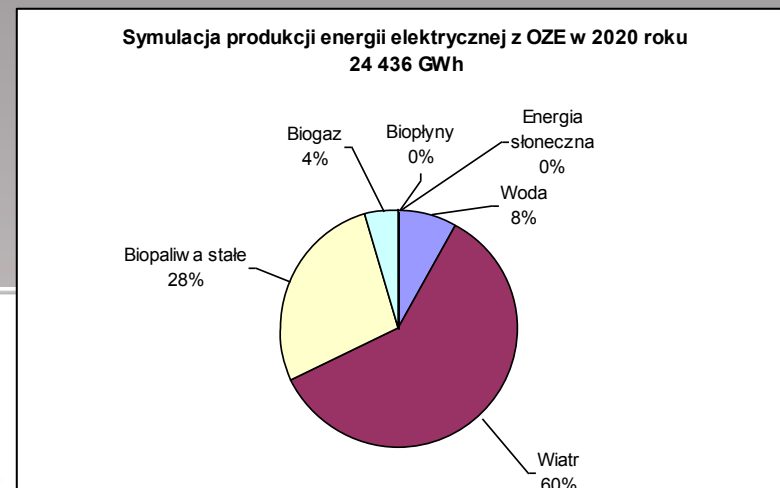
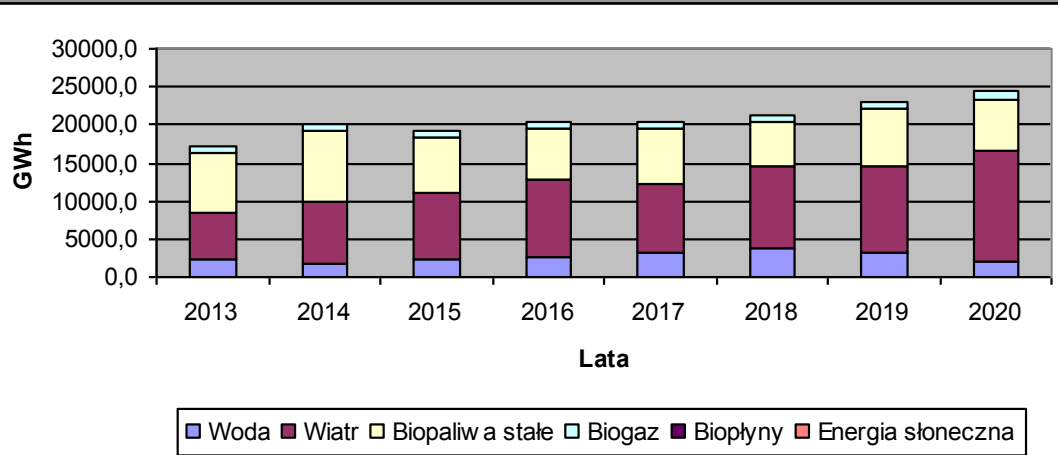
# Modele SDE

## (Stochastic Differential Equations)

Opis modelu	Postać równań różniczkowych
Model względnych zmian zmiennej stanu ze składnikiem losowym opisanym ruchami Browna (GBM – Geometric Brownian Motion) uwzględniający w procesach Wienera korelacje pomiędzy nośnikami	$dX_t = B(t)X_t dt + V(t)X_t dW_t$ $dX_t = \mu X_t dt + \sigma X_t dW_t$
Model stałej elastyczności wariancji (CEV – Constant Elasticity of Variance)	$dX_t = B(t)X_t dt + V(t)X_t^{\alpha(t)} dW_t$ $dX_t = \mu X_t dt + \sigma X_t^{\alpha} dW_t$
Model z rewersją SDEM RD (SDE from Mean-Reverting Drift)	$dX_t = S(t)(L(t) - X_t)dt + D(t, X_t^{\alpha(t)})V(t)dW_t$ $dX_t = S_t(\mu - X_t)dt + \sigma X_t^{\alpha} dW_t$
Model <i>Hull-White/Vasicek</i> (HWV)	$dX_t = S(t)(L(t) - X_t)dt + V(t)dW_t$ $dX_t = S_t(\mu - X_t)dt + \sigma dW_t$

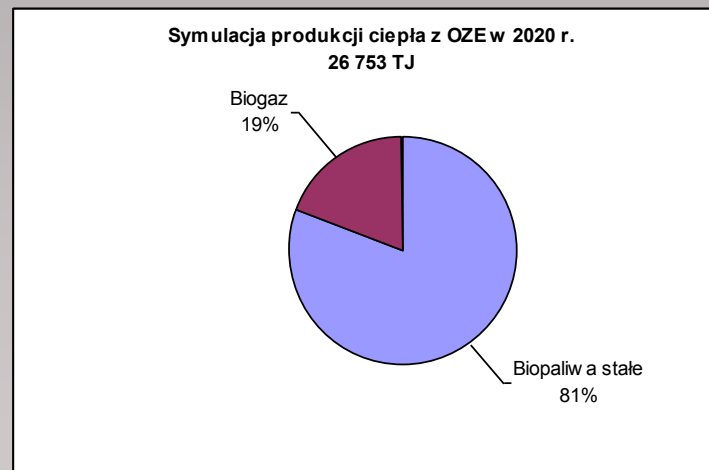
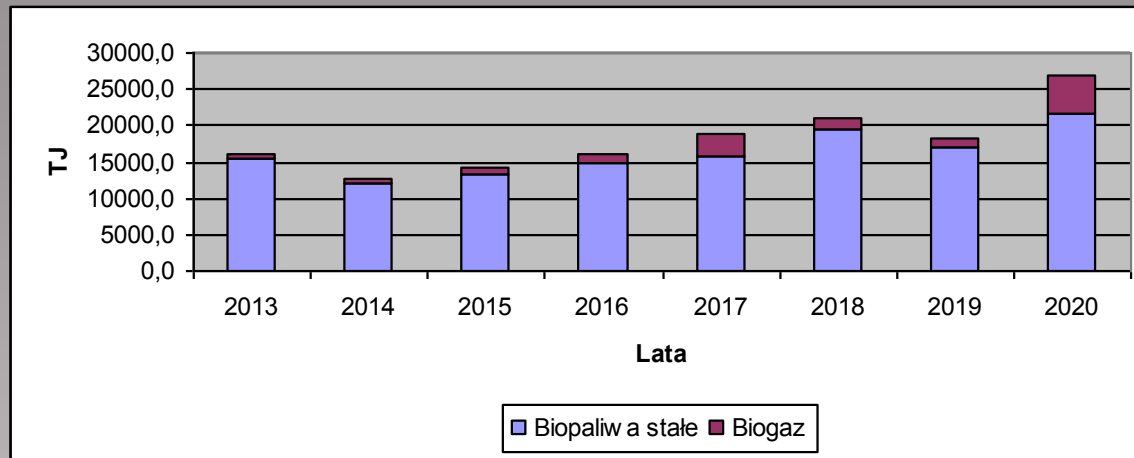
$\mu$  – wartość średnia zmiennej  $X_t$ ,  $\sigma$  – odchylenie standardowe zmiennej  $X_t$ ,  $S_t$  – prędkość rewersji,  $\alpha$  - wykładnik

# Przykładowa symulacja produkcji energii elektrycznej z odnawialnych nośników



Rozwój OZE w czasie i prognozy z Ocena Skutków Regulacji do ustawy o odnawialnych źródłach energii z dn. 07.07.2014 r. [Tobiasz Adamczewski, [ChronmyKlimat.pl](http://ChronmyKlimat.pl)]

# Przykładowa symulacja produkcji ciepła z odnawialnych nośników



REE 2015

# Symulacja produkcji energii elektrycznej z odnawialnych nośników dla roku 2020 dla różnych poziomów ryzyka

Poziom ryzyka	Ogółem produkcja energii elektrycznej	Woda	Wiatr	Biopaliwa stałe	Biogaz	Biopłyny	Energia słoneczna
-	GWh	GWh	GWh	GWh	GWh	GWh	GWh
0,6 $\sigma$	28876,3	2334,4	15414,4	9964,5	1150	0	13
0,8 $\sigma$	26684,4	2202,9	15090,8	8269,8	1117,8	0	3,1
<b><math>\sigma</math></b>	<b>24436</b>	<b>2064,4</b>	<b>14526,7</b>	<b>6760</b>	<b>1084,6</b>	<b>0</b>	<b>0,3</b>
1,2 $\sigma$	22164	1921,2	13749,7	5442,6	1050,5	0	0
1,4 $\sigma$	19903,5	1775,4	12796,4	4315,9	1015,8	0	0



# Symulacja produkcji energii ciepła z odnawialnych nośników dla roku 2020 dla różnych poziomów ryzyka

Poziom ryzyka	Ogółem produkcja ciepła	Biopaliwa stałe	Biogaz
-	TJ	TJ	TJ
0,6 $\sigma$	25356,8	22633,8	2723,0
0,8 $\sigma$	26294,5	22308,9	3985,6
<b><math>\sigma</math></b>	<b>26753,1</b>	<b>21643,4</b>	<b>5109,7</b>
1,2 $\sigma$	26406,7	20668,9	5737,8
1,4 $\sigma$	25072,4	19428,8	5643,6

# Podsumowanie

- Przykładowe symulacje produkcji energii elektrycznej i ciepła oraz struktury odnawialnych nośników do 2020 roku wyznaczone metodą Eulera należy traktować jako możliwe scenariusze, pod warunkiem kontynuowania dotychczasowych tendencji na rynku OZE.
- Do symulacji wykorzystano rozwiązania przybliżone uzyskane z modelu GBM z uwzględnieniem korelacji w przebiegach zmiennych (odnawialnych nośnikach energii) opisanych procesami Wienera.
- Odmienne przebiegi symulacyjne można uzyskać zmieniając założenia o kształtowaniu się zmiennych. Nie uwzględnienie korelacji pomiędzy zmiennymi w modelu GBM prowadzi do odmiennych rezultatów.
- Kolejne scenariusze można uzyskać przy założeniu, że o zachowaniu się zmiennych decydują reguły mechanizmów rynkowych, a nie giełdowych. Wtedy do symulacji należy przyjąć rezultaty z modelu z rewersją (SDEM RD) lub modelu *Hull-White/Vasicek* (HWV).

# Podsumowanie (cd)

Przeprowadzono też zgrubną analizę wpływu niepewności dotyczącej otoczenia modeli na wyniki symulacji. Niepewność związaną z szeregiem czynników, takich jak: niepewność dotyczącą uregulowań prawnych w zakresie OZE, polityki energetyczno-środowiskowej UE i Polski, możliwości pozyskania nośników odnawialnych, ich cen itp., zamodelowano wprowadzając w modelu Wienera składnik losowy, uwzględniający całkowite ryzyko, kwantyfikowane wartością odchylenia standardowego  $\sigma$ .

# Podsumowanie (cd)

W przypadku produkcji energii elektrycznej z odnawialnych nośników obniżenie ryzyka, przejawiające się stabilną, wieloletnią polityką energetyczno-środowiskową, skutkuje nawet 6 % wzrostem produkcji ogółem z nośników odnawialnych w roku 2020 w stosunku do wariantu kontynuacji trendu. Natomiast wzrost ryzyka, związany z niestabilną polityką energetyczno-środowiskową, skutkuje nawet 12 % spadkiem produkcji energii elektrycznej ogółem z nośników odnawialnych w roku 2020 w stosunku do wariantu kontynuacji trendu.

# Podsumowanie (cd)

Podobne wnioski można sformułować w przypadku produkcji ciepła z biopaliw stałych. Analizę produkcji ciepła ogółem z nośników odnawialnych zaburza bardzo silna korelacja poziomu ryzyka, mierzonego wartością odchylenia standardowego  $\sigma$ , z produkcją ciepła z biogazu. Wynika to z bardzo niestabilnego przebiegu historycznego tej wielkości w latach 2003÷2013 (w roku 2008 produkcja ciepła z biogazu 926 TJ, a w roku 2011 produkcja 131 TJ).

# Pytania Recenzenta

1. Zaskakuje znikomy (bliski zeru) udział energii słonecznej w symulacji produkcji energii elektrycznej w 2020 r. Śledząc dynamiczny rozwój fotowoltaiki u naszych zachodnich sąsiadów można chyba oczekiwać większego udziału tych źródeł.
2. Dlaczego w odniesieniu do produkcji ciepła pominięto w ogóle energię słoneczną? Przecież w klimatycznych warunkach Polski są spore możliwości (podgrzewanie, suszenie...). Czy ma tu wpływ brak praktycznie danych historycznych?

# Odpowiedź na pytania Recenzenta

Cytat z opracowania: GUS, *Energia ze źródeł odnawialnych w 2013 r.*, Warszawa 2014

## „2. Uwagi metodyczne

### 2.1. Zakres tematyczny opracowania

Publikacja niniejsza jest „wynikową informacją statystyczną” zawierającą dane statystyczne nt. energii ze źródeł odnawialnych. Informacje te zostały pozyskane w ramach programu badań statystycznych statystyki publicznej realizowanych w latach: 2004 – 2013. **Zakres prezentowanych danych nie daje pełnego obrazu sytuacji w zakresie pozyskiwania i wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych w Polsce, ze względu na znaczne rozproszenie źródeł pozyskiwania i lokalny charakter ich wykorzystywania. Niskie moce większości obiektów wytwarzających i użytkujących energię ze źródeł odnawialnych utrudniają objęcie ich stałymi badaniami statystycznymi.”**

# Odpowiedź na pytania Recenzenta (cd)

**Cytat z opracowania: GUS, *Energia ze źródeł odnawialnych w 2013 r.*, Warszawa 2014**

„...W opracowaniu wykorzystano dane statystyczne uzyskane ze sprawozdań o symbolach:

- ☐ **G-02o** – sprawozdanie o cieple ze źródeł odnawialnych,
- ☐ **G-02b** – sprawozdanie bilansowe nośników energii i infrastruktury ciepłowniczej,
- ☐ **G-03** – sprawozdanie o zużyciu paliw i energii,
- ☐ **E-GD** – ankieta o zużyciu paliw i energii w gospodarstwach domowych,
- ☐ **G-10.1(w)k** – sprawozdanie o działalności podstawowej elektrowni wodnej/elektrowni wiatrowej,
- ☐ **G-10.2** – sprawozdanie o działalności podstawowej elektrowni ciepłej zawodowej,
- ☐ **G-10.3** – sprawozdanie o mocy i produkcji energii elektrycznej i ciepła elektrowni elektrociepłowni) przemysłowej,
- ☐ **G-10.6** – sprawozdanie o mocy i produkcji elektrowni wodnych, wiatrowych i innych źródeł odnawialnych,
- ☐ **RAF-1** – sprawozdanie z rozliczenia procesu przemiany w przedsiębiorstwach wytwarzających i przerabiających produkty rafinacji ropy naftowej,
- ☐ **RAF-2** – sprawozdanie o produkcji, obrocie, zapasach oraz infrastrukturze magazynowej i przesyłowej ropy naftowej i produktów naftowych...”



Dziękuję za uwagę!