GÓRNICTWO I GEOLOGIA 2011
Tom 6 Zeszyt 1

Zygmunt KORBAN
Politechnika Śląska, Gliwice
Katedra Zarządzania i Inżynierii Bezpieczeństwa

WYKORZYSTANIE ANALIZY HARMONICZNEJ W PROCESIE PROGNOZOWANIA POZIOMU ZAGROŻENIA PROMIENIOWANIEM JONIZUJĄCYM NA TERENACH GÓRNICZYCH

Streszczenie. Skutki prowadzenia eksploatacji pokładów węgla w warunkach występowania zagrożenia radiacyjnego rejestrowane są częstokroć także i na powierzchni. O ile w podziemnych wyrobiskach główne źródło zagrożenia promieniowaniem jonizującym stanowią krótkożyciowe produkty rozpadu radonu, o tyle w odniesieniu do terenów powierzchniowych, zlokalizowanych wokół kopalń, zagrożenie to stanowią głównie wody dołowe o podwyższonej zawartości radu i w mniejszym zakresie – stałe odpady kopalniane. Stężenie radu w wodach na powierzchni podlega wahaniom, na co w dużej mierze mają wpływ także warunki klimatyczne związane z naturalnym poziomem wód (okresy letnie i wiosenno-jesienno-zimowe). Zjawisko periodyczności zmian wartości c_{Raw} posłużyło jako materiał wyjściowy do przedstawienia możliwości wykorzystania jednego z modeli szeregów czasowych (analizy harmonicznej) do badania zjawisk powtarzających się w czasie.

THE USE OF HARMONIC ANALYSIS IN THE PROCESS OF FORECASTING THE LEVEL OF IONIZING RADIATION HAZARDS IN MINING AREAS

Summary. The effects of a coal extraction in conditions of radiation hazard are often observed on the ground. In underground excavations the main source of ionizing radiation risk are short-lived decay products of radon, while on the surface of the earth in the areas located around coal mines – mine waters with high radium content (to a lesser extent, also solid mine wastes). The concentration of radium in water on the surface of the ground fluctuates because of climatic conditions connected with natural level of waters (periods of summer and spring-autumn-winter). The phenomenon of periodic changes of the value c_{Raw} serve as start to present the possible use of time series model (harmonic analysis) to study the phenomena repeated over time.

1. Wprowadzenie

Szacuje się, że zasoby geologiczne węgla kamiennego w Polsce wynoszą 78 mld. t (zasoby bilansowe – 42,5 mld. t.) [2], co przy braku alternatywnych źródeł energii, decyduje

o tym, iż w zabezpieczeniu energetycznym kraju węgiel kamienny ma i będzie mieć podstawowe znaczenie[1]. Jednocześnie energia elektryczna i energia cieplna produkowane z węgla są także najtańszymi nośnikami energii – aktualnie koszt produkcji energii elektrycznej z paliw kopalnych stanowi ok. 50% kosztów produkcji przy wykorzystaniu nośników odnawialnych (odpowiednio 4,7 centa/kWh i 9,5 centa/kWh) [3].

Prowadzenie wydobycia tego surowca metodami eksploatacji podziemnej nierozerwalnie związane jest m.in. z występowaniem zagrożeń, które w sposób ogólny można podzielić na naturalne i technologiczne – jakkolwiek podział ten jest czysto umowny, to jednak można przyjąć, że pierwsze z wymienionych powstają niezależnie od człowieka, drugie zaś wynikają z konstrukcji wykorzystywanych maszyn i urządzeń oraz sposobu prowadzenia robót dołowych. Do grupy zagrożeń naturalnych, obok m.in. zagrożenia tąpaniami, metanowego, pyłowego czy wyrzutami gazów i skał, zaliczyć należy także zagrożenie radiacyjne naturalnymi substancjami promieniotwórczymi. Zgodnie z przepisami wykonawczymi do Prawa geologicznego i górniczego we wszystkich podziemnych zakładach górniczych na terytorium RP, należy okresowo prowadzić pomiary zagrożenia radiacyjnego naturalnymi substancjami promieniotwórczymi. Tylko w 2007 roku w kopalniach węgla kamiennego wykonano:

- ponad 2900 pomiarów stężenia energii potencjalnej krótkożyciowych produktów rozpadu radonu. Przekroczenie poziomu stężenia 0,5 μ J/m^3 nastąpiło w 12 wyrobiskach 8 kopalń węgla kamiennego – maksymalna wartość stężenia energii potencjalnej alfa wyniosła 3,67 μ J/m^3;
- 123 pomiary dawek indywidualnych promieniowania gamma – maksymalna (ponad tło naturalne) roczna dawka dla miejsc pracy wynosiła około 3,4 mSv;
- 390 analiz promieniotwórczości wód kopalnianych – maksymalne wartości stężeń radu 226 wynosiły 111,2 kBq/m^3, zaś radu 228 – 59,7 kBq/m^3.
- 141 pomiarów próbek osadów dołowych. W siedmiu kopalniach stwierdzono występowanie osadów, w których sumaryczne stężenie izotopów radu przekraczało wartość 10 kBq/kg (kategoria niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych).

O ile w podziemnych wyrobiskach główne źródło zagrożenia promieniowaniem jonizującym stanowią krótkożyciowe produkty rozpadu radonu, o tyle w odniesieniu do terenów powierzchniowych, zlokalizowanych wokół kopalń, zagrożenie to stanowią głównie wody dołowe o podwyższonej zawartości radu i, w mniejszym zakresie, stałe odpady kopalniane [5, 10].

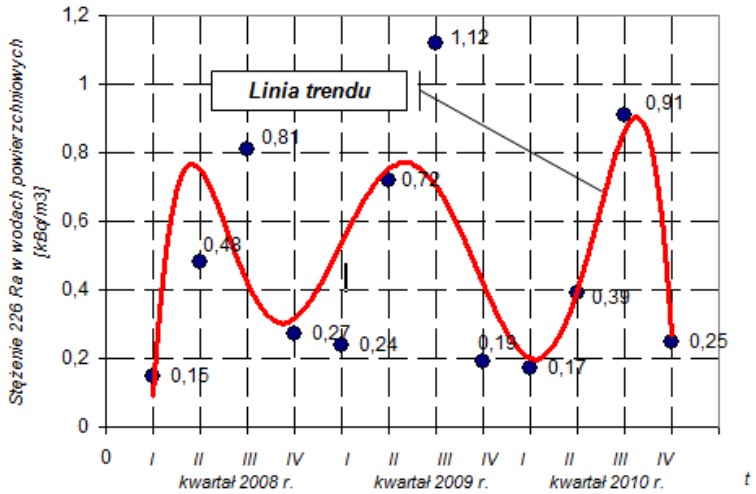
[1] Aktualnie blisko 95% uzyskiwanej w Polsce energii wytwarzana jest z węgla.

W kopalniach GZW występują silnie zmineralizowe wody dołowe (o zawartości soli przewyższającej 200 kg/m^3) i o zróżnicowanym stężeniu izotopów radu. Przykładowo w rejonie południowo-zachodnim GZW zawartości izotopu radu 226 sięgają kilkunastu kBq/m^3, a w rejonie północno-wschodnim zawartości izotopu radu 226 mieszczą się w przedziale od 0 do 6,8 kBq/m^3. Całkowity ładunek izotopu radu 226Ra, dopływającego dziennie do wyrobisk, wynosi ok. 725 MBq, a izotopu 228Ra – 700 MBq. Należy jednak zauważyć, że jedynie ok. 40% radu obecnego w wodach kopalnianych pozostaje w wyrobiskach podziemnych w postaci osadów, pozostałe 60% radu trafia na powierzchnię, a następnie do rzek, powodując skażenia środowiska naturalnego [4, 6, 8, 9].

Usytuowanie kopalń węgla kamiennego w górnych odcinkach Wisły i Odry powoduje, że zasolenie głównych rzek Polski następuje już w ich początkowych odcinkach. Kopalnie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego codziennie odprowadzają do Wisły i Odry łącznie prawie 900 tys. m^3 wody, a dzienny zrzut soli wynosi 11 tys. t. Prowadzone badania [7] wykazują ponadto, jak istotny wpływ na stężenie izotopów radu zawartych w wodach powierzchniowych mają także warunki klimatyczne (pora roku), co, zwłaszcza w okresie nasilających się kontrastów pogodowych (okresy suszy, okresy wzmożonych opadów), przyczynia się do występowania okresowych wahań wartości c_{Raw}.

2. Analiza harmoniczna jako przykład modelu składowej periodycznej

Jedną z metod badania zjawisk okresowości w szeregach czasowych jest metoda analizy harmonicznej [1].

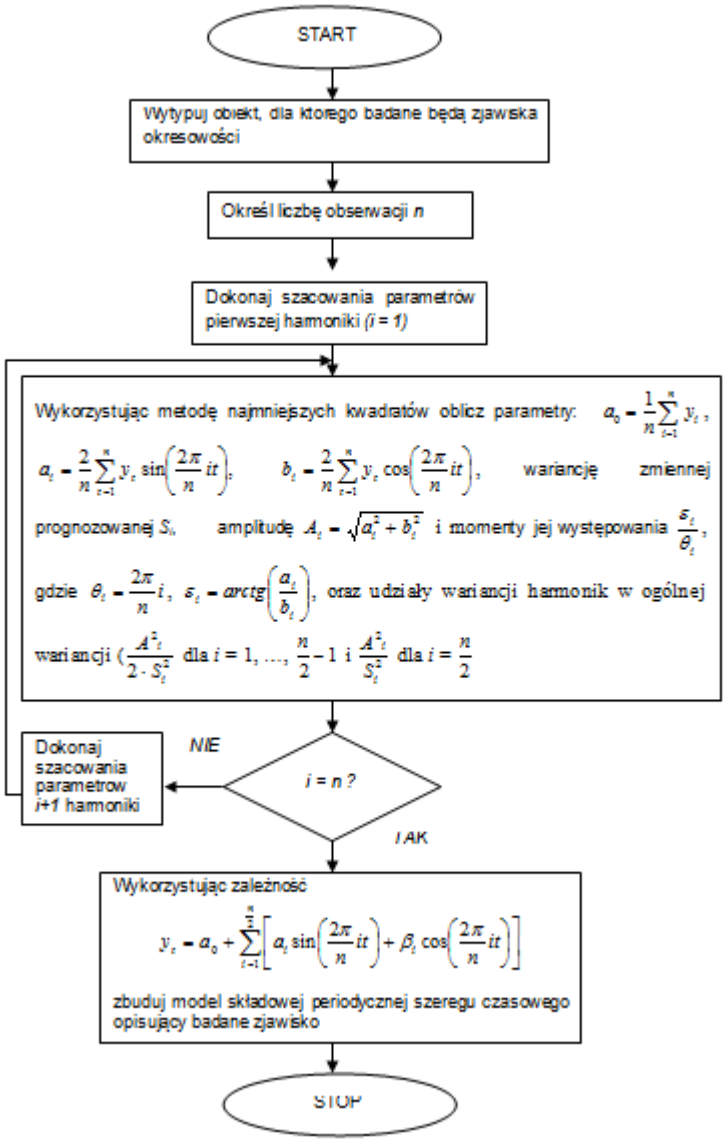


Rys. 1. Dane wyjściowe – stężenie izotopów radu 226 w wodach [kBq/m^3], w kolejnych kwartałach w 2008, 2009 i 2010 roku

Fig. 1. Input data – the concentration of radium 226 isotopes in water [kBq/m3] in successive quarters in 2008, 2009 and 2010

Metoda ta polega na budowie modelu w postaci sumy tzw. harmonik – funkcji sinusoidalnych lub cosinusoidalnych w przyjętym okresie, przy czym pierwsza harmonika *(i =1)* ma okres równy długości okresu badanego, druga (*i* = *2*) – połowie tego okresu itd.

W przypadku *n* obserwacji liczba wszystkich harmonik odpowiada wartości *n/2*. Dane wyjściowe do prognozy na II i III kwartał 2011 r. dla jednego z cieków wodnych zlokalizowanych na obszarze GZW, przedstawiono na rys. 1, zaś algorytm postępowania w analizie harmonicznej – na rys. 2.



Rys. 2. Analiza harmoniczna – algorytm postępowania
Fig. 2. Harmonic analysis – algorithm

Parametr a_0, obliczony na podstawie danych wyjściowych, wyniósł 0,475.

Celem określenia modelu opisującego periodyczność zjawiska wyznaczone zostały parametry kolejnych harmonik – poniżej zamieszczone zostały przykładowe wartości parametrów dla pierwszej ($i = 1$), drugiej ($i = 2$) i szóstej ($i = 6$) harmoniki:

- dla $i = 1$

t	y_t	x	sinx	cosx	y_t sinx	y_t cosx
1	0,15	30	0,500	0,866	0,075	0,130
2	0,48	60	0,866	0,500	0,416	0,240
3	0,81	90	1,000	0,000	0,810	0,000
4	0,27	120	0,866	-0,500	0,234	-0,135
5	0,24	150	0,500	-0,866	0,120	-0,208
6	0,72	180	0,000	-1,000	0,000	-0,720
7	1,12	210	-0,500	-0,866	-0,560	-0,970
8	0,19	240	-0,866	-0,500	-0,165	-0,095
9	0,17	270	-1,000	0,000	-0,170	0,000
10	0,39	300	-0,866	0,500	-0,338	0,195
11	0,91	330	-0,500	0,866	-0,455	0,788
12	0,25	360	0,000	1,000	0,000	0,250
Suma:	5,70				-0,033	-0,525

- dla $i = 2$

t	y_t	x	sinx	cosx	y_t sinx	y_t cosx
1	0,15	60	0,866	0,5	0,1299	0,075
2	0,48	120	0,866	-0,5	0,41568	-0,240
3	0,81	180	0,000	-1,0	0	-0,810
4	0,27	240	-0,866	-0,5	-0,2338	-0,135
5	0,24	300	-0,866	0,5	-0,2078	0,120
6	0,72	360	0,000	1,0	0	0,720
7	1,12	420	0,866	0,5	0,96992	0,560
8	0,19	480	0,866	-0,5	0,16454	-0,095
9	0,17	540	0,000	-1,0	0	-0,170
10	0,39	600	-0,866	-0,5	-0,3377	-0,195
11	0,91	660	-0,866	0,5	-0,7881	0,455
12	0,25	720	0,000	1,0	0	0,250
Suma:	5,70				0,11258	0,535

- dla $i = 6$

t	y_t	x	cosx	y_t cosx
1	0,15	180	-1	-0,15
2	0,48	360	1	0,48
3	0,81	540	-1	-0,81
4	0,27	720	1	0,27
5	0,24	900	-1	-0,24
6	0,72	1080	1	0,72
7	1,12	1260	-1	-1,12
8	0,19	1440	1	0,19
9	0,17	1620	-1	-0,17
10	0,39	1800	1	0,39
11	0,91	1980	-1	-0,91
12	0,25	2160	1	0,25
Suma:	5,70			-1,10

Na analogicznych zasadach dokonano szacowania parametrów trzeciej, czwartej i piątej harmoniki. Zbiorcze zestawienie wartości poszczególnych parametrów harmonik przedstawia tabela 1.

Tabela 1

Zbiorcze zestawienie parametrów harmonik

Nr harmoniki / Parametr	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6
a_i	-00546	0,018763	-0,38	0,015877	-0,05454	0,0
b_i	-0,08747	0,089167	-0,14667	0,0125	-0,00087	-09167
S_i	0,03801	0,04109	0,82100	0,00202	0,01472	0,08316

Na podstawie obliczonych wartości można stwierdzić, iż największe wahania okresowe są udziałem harmonik trzeciej (głównie) i szóstej. Tym samym można przyjąć jako wystarczający, dokładnie opisujący, następujący model:

$$y_t = 0{,}475 - 0{,}38 \sin\left(\frac{2\pi}{12}3t\right) - 0{,}14667 \cos\left(\frac{2\pi}{12}3t\right) - 0{,}09167 \cos\left(\frac{2\pi}{12}6t\right) = 0{,}475 - 0{,}38 \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right) - 0{,}14667 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right) - 0{,}09167 \cos(\pi t).$$

Amplitudy wahań dla obu harmonik wynoszą zatem:

$$A_3 = \sqrt{0{,}38^2 + 0{,}14667^2} = 0{,}4073 \left[\frac{kBq}{m^3}\right];$$

$$A_6 = 0{,}09167 \left[\frac{kBq}{m^3}\right],$$

a ich przesunięcia fazowe na osi czasu:

- dla trzeciej harmoniki

$$\operatorname{tg}\varepsilon_3 = \frac{0{,}38}{0{,}14667} = 2{,}5909$$

$$\varepsilon_3 = \operatorname{arc\,tg}\left(\frac{a_3}{b_3}\right) = \operatorname{arc\,tg}\left(\frac{0{,}38}{0{,}14667}\right) = 68{,}8947$$

$$\theta_3 = \frac{2\pi}{12}i = \frac{2\pi}{12}3 = \frac{\pi}{2} = 90$$

$$\frac{\varepsilon_3}{\theta_3} = 0{,}7655,$$

- dla szóstej harmoniki

$$\mathrm{tg}\,\varepsilon_6 = 0$$

$$\varepsilon_6 = 0$$

$$\frac{\varepsilon_6}{\theta_6} = 0.$$

Tym samym prognoza stężenia izotopów radu w wodach dla II kwartału 2011 roku wynosi:

$$y_{\mathrm{II},\,2011} = 0{,}475 - 0{,}38\sin\left(\frac{\pi}{2}t\right) - 0{,}14667\cos\left(\frac{\pi}{2}t\right) - 0{,}09167\cos(\pi t) = 0{,}475 - 0{,}38$$

$$\sin(7\pi) - 0{,}14667\cos(7\pi) - 0{,}09167\cos(14\pi) = 0{,}7133\left[\frac{kBq}{m^3}\right],$$

a dla III kwartału 2011 roku:

$$y_{\mathrm{III},\,2011} = 0{,}475 - 0{,}38\sin\left(\frac{\pi}{2}t\right) - 0{,}14667\cos\left(\frac{\pi}{2}t\right) - 0{,}09167\cos(\pi t) = 0{,}475 - 0{,}38$$

$$\sin\left(\frac{15\pi}{2}\right) - 0{,}14667\cos\left(\frac{15\pi}{2}\right) - 0{,}09167\cos(15\pi) = 0{,}7096\left[\frac{kBq}{m^3}\right].$$

3. Zakończenie

Każda eksploatacja górnicza jest związana z ingerencją w środowisko naturalne, skutkiem czego do otoczenia przedostają się m.in. także materiały szkodliwe czy niebezpieczne, jak np. izotopy promieniotwórcze. Taka sytuacja powoduje, że zagrożenie radiacyjne występuje także na tych obszarach, gdzie nie wprowadzono do środowiska dodatkowych izotopów promieniotwórczych, ale zjawisko zagrożenia istnieje przez migrację (np. wód). O ile w podziemnych wyrobiskach główne źródło zagrożenia promieniowaniem jonizującym stanowią krótkożyciowe produkty rozpadu radonu, o tyle w odniesieniu do terenów powierzchniowych, zlokalizowanych wokół kopalń, zagrożenie to stanowią głównie wody dołowe o podwyższonej zawartości radu (^{226}Ra, ^{228}Ra). Aktualnie Polska jest jednym z nielicznych państw na świecie, gdzie zagrożenie radiacyjne związane z występowaniem naturalnej promieniotwórczości w podziemnych zakładach górniczych podlegają prawnie usankcjonowanej kontroli. Badania te pozwalają na stwierdzenie występowania m.in. zjawiska periodyczności w odniesieniu do poziomu stężenia izotopów promieniotwórczych radu w wodach powierzchniowych, na co niemały wpływ mają także zjawiska klimatyczne (okresy

suszy i wzmożonych opadów). W artykule przedstawiono możliwości praktycznego wykorzystania jednego z modeli składowej periodycznej (analizy harmonicznej) w procesie prognozowania (szacowania) występowania izotopów promieniotwórczych w wodach powierzchniowych. Jak wynika z obliczeń, największa część wahań okresowych zawartości ^{226}Ra w wodach uwzględniana jest przez trzecią i szóstą harmonikę, które wyjaśniają łącznie ponad 90% wariancji zmiennej prognozowanej.

BIBLIOGRAFIA

1. Box G.E.P., Jenkins G.M.: Analiza szeregów czasowych. PWN, Warszawa 1983.
2. Dubińsk J., Tajduś A.: Nowe wyzwania dla nauki górniczej w świetle przyszłych potrzeb polskiej gospodarki. Polityka energetyczna, t. 10, zeszyt specjalny 1, 2007.
3. Klank M.: Węgiel kamienny jako gwarant bezpieczeństwa energetycznego Polski i jego szanse w Europie. Polityka energetyczna, t. 10, zeszyt specjalny 1, 2007.
4. Lebecka J. i in.: Monitoring of Radiation Exposure from Different Natural Sources in Polish Coal Mines. Int. Conf. on Occupational Safety in Mining, Vol. 2, Toronto 1985.
5. Lebecka J., Chałupnik S., Łukasik B., Wysocka M.: Monitoring and control of radioactive contamination of natural environment caused by mining activity. Proc. of Int. Conference Ecological Aspects of Underground Mining. GIG, Katowce 1993.
6. Lebecka J., Chałupnik S.: Oczyszczanie słonych wód kopalnianych z radu. Przegląd Górniczy, nr 4, 1995.
7. Skowronek J. (red.): Zagrożenia naturalnymi źródłami promieniowania jonizującego w przemyśle wydobywczym. GIG, Katowice 2007.
8. Wilk Z. (red.): Hydrologia polskich złóż kopalin i problemy wodne górnictwa. Wydawnictwo AGH, Kraków 2003.
9. Swolkień J.: Możliwości ograniczenia szkodliwego wpływu wód dołowych na stan rurociągów kolektora „Olza" i środowisko rzeki Odry. Rozprawa doktorska wykonana pod kierunkiem dr. hab. inż. Marian Branny, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Kraków 2007.
10. Zgadaj J., Skubacz K., Chałupnik S.: The influence of radon and it's progeny emitted from exhaust shafts of coal mines on the contamination of the outdoor air. Proc. of International Conference Technologically Enhanced Natural Radioactivity – TENR '96. GIG, Katowice 1996.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Wiesław Piwowarski

Abstract

Each mining exploitation is connected with interference into the natural environment and in consequence harmful or dangerous materials for example radioactive isotopes leak into the environment. This situation causes that the radiation hazard occurs also in those areas where there was not introduced any additional radioactive isotopes into environment, but the phenomenon of threat exist because of migration (f.e. into water). While in the underground

excavations the main source of ionizing radiation risks are short-lived decay products of radon, so much for ground surface located around the mines this threat are mainly mine waters with high content of radium (226Ra, 228Ra). Currently, Poland is one of the few countries in the world, where the radiation hazard connected with the occurrence of natural radioactivity in mines is under control. There are researches allowing to ascertainment of among others the phenomenon of periodicity in relation to the level of concentration of radioactive isotopes of radium in surface waters, on which also have considerable impact weather (droughts and intense rainfall). This paper presents a practical usage of a periodic component model (harmonic analysis) in the process of forecasting (estimating) the occurrence of radioactive isotopes in surface waters. According to the calculation of periodic fluctuations in the largest part of the content ^{226}Ra in waters is considered in the third and sixth harmonic, which explain over 90% variance of the forecast variable.