

Evaluation of the Complementarity of Wind Energy Resources, Solar Radiation and Flowing Water – a Case Study of Piła

Authors

Jakub Jurasz
 Adam Piasecki

Keywords

electric power system, renewable energy, instability

Abstract

The paper analyses the complementarity of electrical energy yield, using a multiannual, monthly and daily approach, for a small hydroelectric power station, wind turbine and photovoltaic plant. The results obtained point to the existence of a strong negative correlation between the solar industry and the wind industry from the perspective of monthly changes. The energy yield generated by a hydroelectric power station is significantly correlated with the generation yield of wind sources. When considering a multiannual perspective, the existence of a correlation between small-scale water and solar power plants was identified. The conclusions of this study may serve as vital rationales when planning the contribution of these sources to the Polish National Power System (KSE).

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2016208

Introduction

The production of electrical energy from variable renewables is a considerable burden for the Polish National Power System. This stems from the fact that for many years its development was dependent on power units generating energy from brown and hard coal. Changing electrical energy demands were and continue to be balanced by energy stored by pumped-storage power stations. The development of renewable energy sources and their increasingly prominent share in Poland's energy mix provide the power station control process with some uncertainties relating to the yield of electrical energy from photovoltaic or wind power plants. The level of uncertainty linked to these sources is to some extent offset by the favourable impact of spatial distribution on the levelling of the energy yield curve [1, 2], and the development of the forecasting methods of energy production in different time horizons [2]. This study attempts to evaluate the complementarity of wind energy resources, solar radiation and flowing water on the basis of data collected for the town of Piła (Wielkopolska Voivodeship). The results obtained may be of assistance at the planning stage of the development of renewable resources, contributing to a reduction of the costs of their instabilities.

Data – methodology – energy yield

The analysis was conducted on the basis of three time series which include the years 1985–2004 and which describe, as follows: the average daily flow of the Gwda River (measurement point at profile Piła located at 21.2 km of the river course, which

closes the river Gwda drainage area, with an area of 4704 km²) [3], the daily total energy from solar radiation falling onto a plane inclined at an angle of 30° [4] and the hourly wind speeds at the height of 10 metres obtained from [5]. The wind-related data was verified against the data resulting from [3], and then calculated for the height of 100 metres, the target height of the axis of the wind turbine rotor with rated power of 2 MW, on the basis of the dependencies presented in [6]. Nonetheless, as indicated in [14], the data of the Institute of Meteorology and Water Management (IMGW), which originates from a single sensor mounted at the height of 10 metres, cannot be considered as dependable and their conversion to greater heights above the ground level is burdened with error. In addition, this data is averaged using the daily approach, and the use of averaged values may result in underestimation. The correctness of the calculations was evaluated based on the existing measurements relating to the Margonin Wschód Wind Farm [9]. Tab. 1 presents the essential statistics linked to the previously mentioned time series.

The energy yield from a wind turbine and a photovoltaic system were calculated in accordance with the dependencies presented in [7], while the production of electrical energy by a hydroelectric power station was based on the data obtained from [3] and the calculation methods included in [8]. The results obtained were verified against the data presented in [9] in relation to a wind farm, and [10], in relation to a small hydroelectric power station. The disparity in the results did not exceed 5%, and it should be noted that comparable results might have been obtained

Statistics	Flow [m ³ /s]	Insolation [kWh/m ² /day]	Wind speed at 100 metres [m/s]
Average	27.693	3.113	5.999
Deviation	9.437	1.985	2.794
Variance	89.048	3.940	7.805
Skewness	1.233	0.572	0.502
Kurtosis	2.718	-0.703	0.130

Tab. 1. Characteristics of variable time series used in the evaluation of electrical energy yield in the years of 1985–2004

for different time intervals. The evaluation correctness for PV was assessed on the basis of references in the literature [8, 11] regarding the functioning of these types of energy sources in Poland – the results obtained were deemed dependable.

The concept of complementarity

The concept of complementarity in the production of energy from different sources of energy may be understood as their capacity to generate electrical energy in a complementary way. The complementarity of energy sources may be assessed from the point of view of time, space or both these dimensions simultaneously. As this study only relates to a single location, special focus has been put on the time complementarity – using the multiannual, monthly and daily approach. Fig. 1 is an example of a perfect complementarity of two sources of energy whose yield curve is a sinusoid. In this case, the perfect complementarity is characterised by the value of the correlation coefficient equaling 1.

The operation of three unstable energy sources may appear as shown in Fig. 2, where similarly to Fig. 1, a perfect complementarity of these sources can be identified. In reality, sources I and II could be a photovoltaic generator and a wind turbine, while source III could be a fuel cell [12]. However, this study focuses on the ability of wind, solar and water sources to complement each other.

Results

On the basis of previously mentioned sources, the energy yield generated by particular sources was calculated. Further calculations analysed the size of generated energy in reference to 1 MW of installed power. It should be noted that the hydroelectric power station located on the Gwda River has the maximum capacity of 1.1 MW, and the energy yield from the wind turbine was based on the actual power curve for the Vestas V90 turbine with rated power of 2 MW. Fig. 3 depicts histograms of the electrical energy yield defined using the daily approach, created with the use of the analysis of a time series of 20-years with suitable variables. Designations assumed: SHPS – small hydroelectric power station, PV – photovoltaic plant, WT – wind turbine, TOTAL – total yield of previous three energy sources. It ought to be recognised that not even a single MWh of energy was generated for nearly 1800 days

(approximately 25% of time series records). From this perspective, the photovoltaic plant, considering its 100% reliability, is a more dependable source of energy – it must be remembered, however, that local climatic conditions (insolation, wind speed) are of key importance in this distinction, and consequently it is not possible to draw further conclusions on the basis of a single location. The distribution of electrical energy produced by small hydroelectric power stations has the biggest impact on the shape of the histogram for the total yield. One can observe no cases of zero electrical energy production and approx. 1200 days when the production of electrical energy was close to the rated value. The shape of these distributions is primarily determined by the statistical parameters of time series (flow, wind speed, insolation) and the method used to calculate the yield of electrical energy – start speed and maximum speed for a wind turbine, or the maximum capacity (maximum flow rate) in the case of a hydroelectric power station.

In order to evaluate the variability of the individual sources of energy for the value of the daily yield, an average value was calculated, as well as standard deviation, and a coefficient of variation which binds the two previous parameters in the form of a quotient. It can be observed that the hydroelectric power station is characterised by the largest value of the average daily production of electrical energy and limited standard deviation in relation to it. Consequently, the coefficient of variation is more than half the size than that for the photovoltaic plant, and more than four times smaller than that for the wind turbine. The result

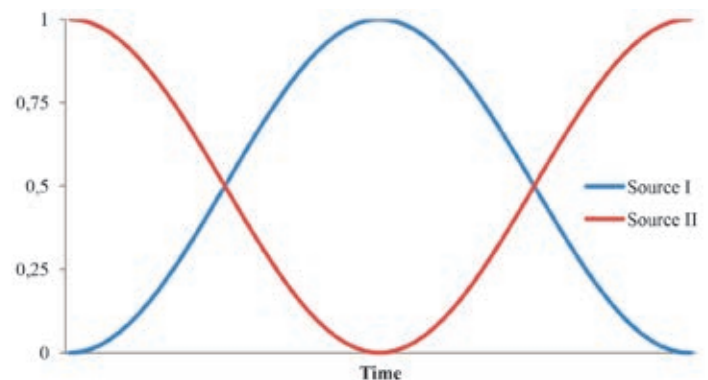


Fig. 1. An example of a perfect complementarity of two energy sources

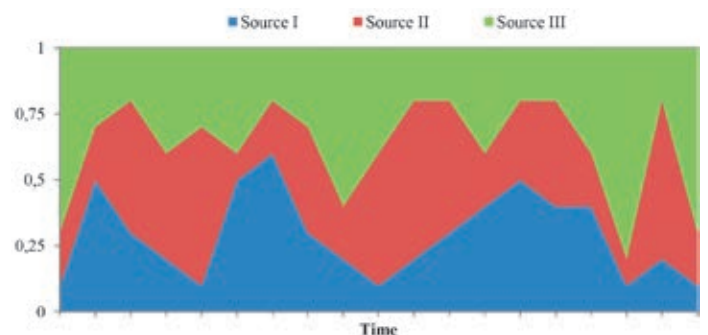


Fig. 2. Three hypothetical energy sources perfectly complementing each other within a time range relating to energy production

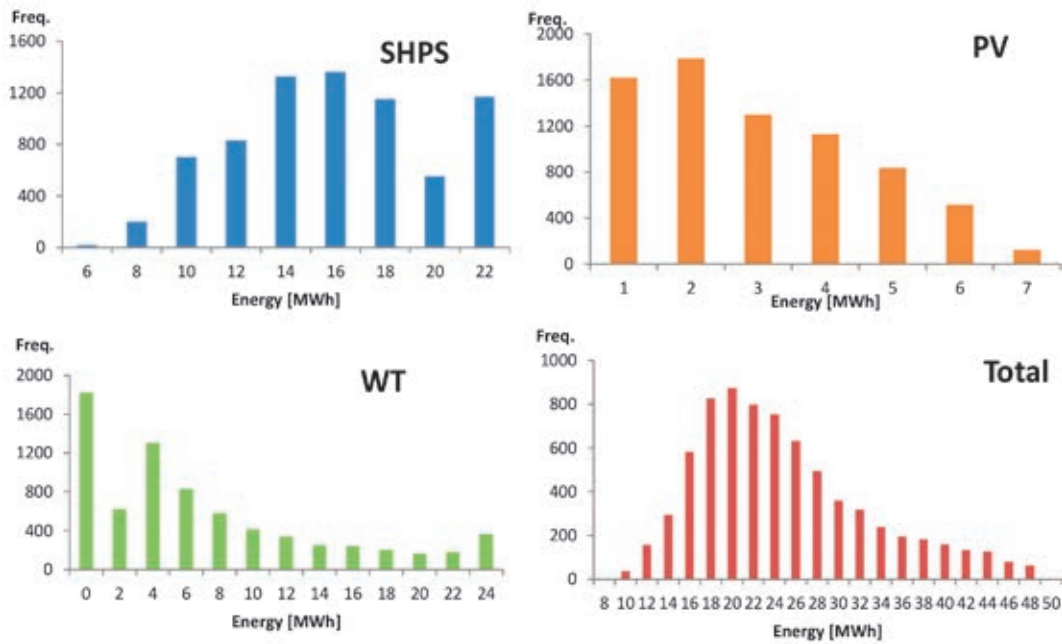


Fig. 3. Yield histograms for specific energy sources for the years 1985–2004

of this high value of the coefficient of variation is the perception of a particular source as unstable, often referred to as chimeric.

Fig. 4 presents statistical parameters for the electrical energy yield from three sources defined using the daily approach. Based on the data from 1985–2004, an average total monthly energy yield was calculated for the individual sources (Fig. 5). As mentioned previously, this yield is depicted as converted to 1 MW of installed power. As a result, the photovoltaic plant generates within a year approx. 13% of the electrical energy yield of the hydroelectric power station and 40% of the wind turbine. Taking into consideration the monthly variability of the insolation value and the shape of the energy yield curve from Fig. 5, it could be observed that the installation of additional capacities in photovoltaics would enable partial elimination of the minimum total yield (SHPS, PV, WT) generated in the summer months (June–August).

The last stage of the analysis of the temporal variability is the multiannual time horizon (Fig. 6). Here, the assessment included only the variability of the total annual yield of energy from a particular energy source, as presented in Fig. 6. As can be seen in the case of photovoltaic plants and wind farms, this variability is relatively limited, and from the point of view of the coefficient of variation, it amounts to 3% and 7%, respectively. A higher value for this parameter was noted in the case of the hydroelectric power station, which equalled 13% for average annual production of about 5.5 MWh with standard deviation at 0.72 MWh.

The most crucial stage of the evaluation was defining whether, in the event of a drop in the quantity of energy generated by a single source within a particular time interval, other sources demonstrate an advantageous dependency and for that same time interval they begin to generate more electrical energy.

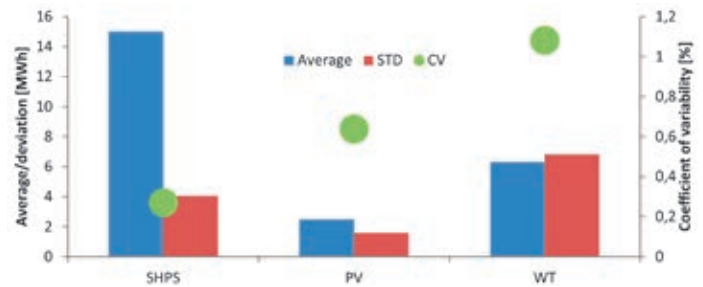


Fig. 4. Comparison of three energy sources using statistical parameters – for the daily yield

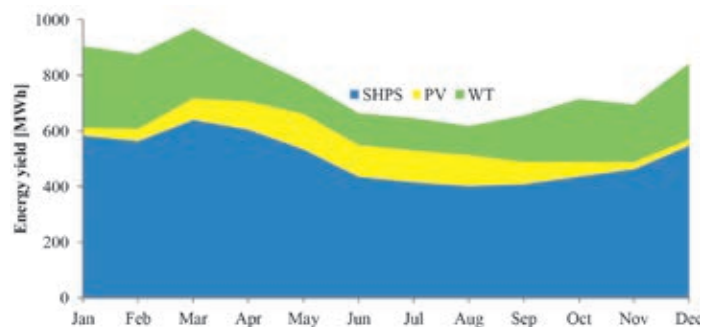


Fig. 5. Average monthly yield of energy from specific energy sources

It seems that the analysis of the course of the diagrams in Fig. 5 confirms this hypothesis, as the drop in the energy yield from SHPS and WT is accompanied by an increase in the production of electrical energy by PV. This dependency is depicted in Tab. 2 with the use of correlation coefficients. Depending on the assumed interpretation angle of their value, the monthly approach suggests that the wind and solar power generation methods are strongly correlated negatively. Consequently, through manipulation of

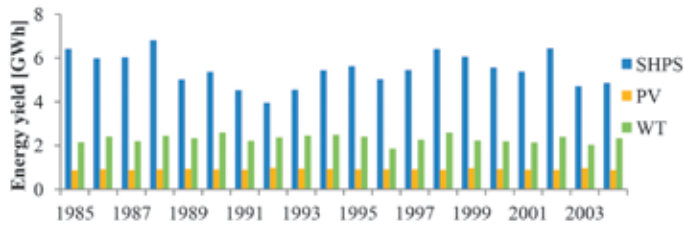


Fig. 6. Average monthly yield of energy from specific energy sources

the capacities installed in specific sources, and by making their total annual yields similar, one could even attempt partial leveling of the yield curve. Attention should be paid to the correlation between SHPS and WT, whose monthly value equals approx. 0.6. In the case of a daily time interval it is rather difficult to discuss a significant correlation between these energy sources. Moreover, the analysis should be conducted using the hourly approach. In view of the specificity, the variable insolation level (only during the day) and the wind speed (day and night), it would be impossible to state if on a sunny date the wind farms as a rule would not generate any energy by solely basing the analysis on the correlation coefficients listed in Tab. 2. Some indications relating to the hourly complementarity of wind and solar resources may be supplied by analysing the system data linked to the generation of electrical energy by Polish wind farms [13]. Using the multi-annual approach, only the correlation between the photovoltaic sources and the hydroelectric power station ($R^2 = -0.48$) seems crucial. This dependency may be explained by the occurrence of years characterised by different precipitation levels, which in turn indirectly (cloud coverage) translates into insolation and directly into the quantity of river water.

In the course of the calculations made, a total of 7305 yield values of electrical energy for every type of analysed energy source were generated. These values, normalised to the range 0–1, were depicted in the form of a contour diagram shown in Fig. 7. The diagram served to demonstrate the operation of a hydroelectric power station depending on the yield generated by PV and WT. Attention should be paid to the partial positioning of the contour lines along the $y = x$ line. The positioning of the contour lines in Fig. 7 confirms the mutual dependencies between the analysed sources of energy. Energy generation by PV is near the maximum (0.8–1), when WT is at a low level (0–0.2). At that point, one should expect generation of energy at a level not exceeding 0.5 of maximum generation (summer months). However, if the wind turbines generate energy at the level of (0.8–1), the production of energy by SHPS may approach values exceeding 0.7. It is probable that the dependencies shown in Fig. 7 result from a monthly and still poorly analysed daily correlation between the specific sources of energy.

The dependencies and results from the previous stages of the study may serve to optimise the functioning of the electric power system. This is made more likely by the fact that unstable sources of renewable energy, particularly wind and solar power generation, are gaining in importance.

Daily	SHPS	PV	WT
SHPS	1	-0.20	0.17
PV	-0.20	1	-0.32
WT	0.17	-0.32	1

Monthly	SHPS	PV	WT
SHPS	1	-0.29	0.60
PV	-0.29	1	-0.90
WT	0.60	-0.90	1

Multiannual	SHPS	PV	WT
SHPS	1	-0.48	0.21
PV	-0.48	1	-0.01
WT	0.21	-0.01	1

Tab. 2. Values of correlation coefficients for different time steps

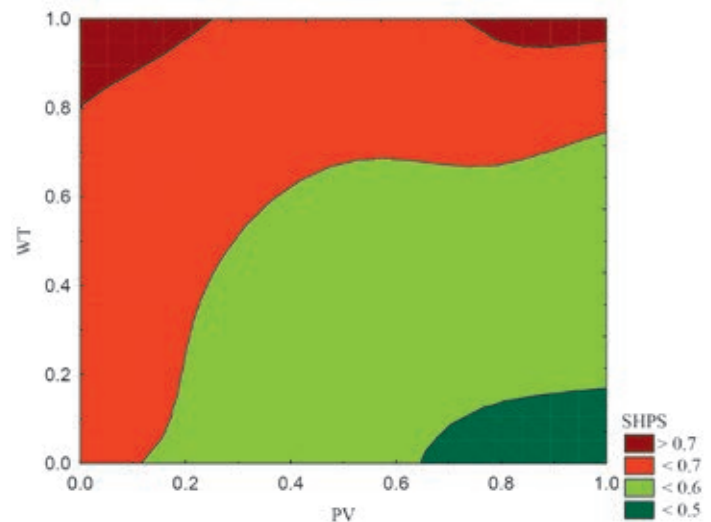


Fig. 7. Contour diagram depicting SHPS in relation to PV and WT. SHPS – levelling of the smallest squares, weighed by distance

Overview

The growing share and the importance of renewable energy sources in the domestic energy balance are increasing challenges on every level of its functioning. Planning of the development and the share of specific unstable renewable energy sources should take into consideration their characteristics and the correlations between them, in addition to purely economic calculations.

The analysis has established an advantageous correlation between the wind and solar power generation when the monthly totals approach and the multiannual perspective between hydro and solar energy was taken into consideration. It seems that these findings could serve as guidelines for local authorities in

establishing solutions aiming at ensuring energy self-sufficiency. In the longer term it is advisable to perform further studies on this subject matter in order to verify the conclusions obtained against other areas and regions of Poland.

REFERENCES

1. J. Jurasz, J. Mikulik, "Wpływ dystrybucji przestrzennej na stabilność źródeł fotowoltaicznych" [Spatial distribution impact on photovoltaic sources stability] in: *Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska* [Interdisciplinary Issues in Engineering and Environmental Protection], edited by A. Kotowski, K. Piekarska, B. Kaźmierczak, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2015.
2. J. Kleissl, "Solar Energy Forecasting and Resource Assessment", Waltham: Academic Press (Elsevier) 2013.
3. *Rocznik Hydrologiczny*, Institute of Meteorology and Water Management – Państwowy Instytut Badawczy, 1994.
4. Solar Energy Services for Professionals, www.soda-pro.com.
5. Global Modelling and Assimilation Office, www.gmao.gfsc.nasa.gov.
6. G. Majewski, B. Nasiłowska, "Energia wiatru – ocena zasobów i problemy inwestycji w odnawialne źródła energii na przykładzie gminy Latowicz (woj. mazowieckie)" [Wind energy – assessment of resources and investment problems in renewable sources of energy based on the gmina of Latowicz (Masovian Voivodeship)], *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences)*, No. 51, 2011, pp. 61–71.
7. G. Notton, S. Diaf, L. Stoyanov, "Hybrid Photovoltaic / Wind Energy Systems For Remote Locations", *Energy Procedia*, Vol. 6, 2011, pp. 666–677.
8. J. Zimny, "Odnawialne źródła energii w budownictwie niskoenergetycznym" [Renewable energy sources in low-energy buildings], Kraków – Warsaw 2010.
9. Report on the environmental impact of the planned project. Construction of stage II of the Margonin Wschód wind farm with accompanying infrastructure, www.margonin.pl.
10. www.ew.koronowo.pl.
11. J. Lenarczyk, "Wynik sezonowych badań wydajności energetycznej instalacji fotowoltaicznej o mocy szczytowej 668 W" [Results of seasonal tests of energy efficiency of the photovoltaic installation with a peak power of 668 W], *Problemy Inżynierii Rolniczej*, Vol. 1, 2013, pp. 151–161.
12. B. Ceran, K. Sroka, "Performance Analysis of a Hybrid Generation System of Wind Turbines, Photovoltaic Modules, and a Fuel Cell", *Acta Energetica*, No. 2/23, 2015, pp. 36–42, DOI:10.12736/isnn.2300-3022.2015204.
13. www.pse.pl.
14. M. Duraczyński, "Badanie i analiza energii wiatru dla potrzeb energetyki w Polsce Południowo-Wschodniej" [Research and analysis of wind energy for the energy sector in South-East Poland], doctoral thesis, AGH University of Science and Technology in Kraków, Kraków 2012/2013.

Jakub Jurasz

AGH University of Science and Technology

e-mail: jakubkamiljurasz@gmail.com

PhD student at the AGH University of Science and Technology in Kraków in production engineering. His interests include: studying the use of renewable energy sources in production processes and functioning of the electric power system with the growing share of unstable sources of electrical energy.

Adam Piasecki

AGH University of Science and Technology

e-mail: adm.piasecki@gmail.com

PhD student at the AGH University of Science and Technology in Kraków. Specialises in hydrological aspects, including water resource management. Participant of numerous domestic and international conferences, author and co-author of several dozen articles.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 98–102. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Ocena komplementarności zasobów energii wiatru, promieniowania słonecznego oraz wód płynących – studium przypadku Piła

Autorzy

Jakub Jurasz
Adam Piasecki

Słowa kluczowe

system elektroenergetyczny, energia odnawialna, niestabilność

Streszczenie

W pracy dokonano analizy komplementarności uzysku energii elektrycznej w ujęciu wieloletnim, miesięcznym oraz dobowym dla małej elektrowni wodnej, turbiny wiatrowej oraz farmy fotowoltaicznej. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić istnienie silnej ujemnej korelacji pomiędzy energetyką słoneczną oraz wiatrową z perspektywy miesięcznych zmian. Uzysk energii z elektrowni wodnej jest istotnie skorelowany z generacją źródeł wiatrowych. Dla wieloletniego horyzontu czasowego wskazano na istnienie korelacji pomiędzy małą energetyką wodną a słoneczną. Płynące z opracowania wnioski mogą być istotnymi przesłankami na etapie planowania udziału tych źródeł w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym.

Wstęp

Produkcja energii elektrycznej w zmieniających się źródłach odnawialnych jest znaczącym obciążeniem dla Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. Jego rozwój był bowiem przez wiele lat oparty na blokach energetycznych pozyskujących energię z węgla brunatnego i kamiennego. Wahania w zapotrzebowaniu na energię elektryczną były i są bilansowane poprzez magazyny energii w postaci elektrowni szczytowo-pompowych. Rozwój odnawialnych źródeł energii oraz ich coraz wyraźniejszy udział w koszyku energetycznym Polski obciąża proces sterowania pracą elektrowni kolejnymi niewiadomymi w postaci uzysku energii z farm fotowoltaicznych czy też elektrowni wiatrowych. Stopień niepewności dotyczących tych źródeł jest do pewnego stopnia niwelowany poprzez korzystny wpływ dystrybucji przestrzennej na wygładzenie krzywej uzysku energetycznego [1, 2] oraz rozwój metod prognozowania produkcji energii w różnym horyzoncie czasowym [2]. W poniższym opracowaniu podjęto próbę oceny komplementarności zasobów energii wiatru, słońca oraz wód płynących, na podstawie danych zebranych dla miasta Piły (województwo wielkopolskie). Otrzymane wyniki mogą być pomocne na etapie planowania rozwoju źródeł odnawialnych, tak by minimalizować powstające koszty ich niestabilności.

Dane – metodologia – uzysk energii

Analizę przeprowadzono na podstawie trzech szeregów czasowych obejmujących lata 1985–2004 i opisujących odpowiednio: średni przepływ dobowy na rzece Gwdzie (punkt pomiarowy profil Piła znajdujący się na 21,2 km biegu rzeki, zamykający zlewnię Gwdy o powierzchni 4704 km²) [3], dobową sumę energii promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę nachyloną pod kątem 30° [4] oraz godzinowe prędkości wiatru na wysokości 10 metrów pozyskane z [5]. Dane odnośnie wietrzności zweryfikowano z danymi pochodzącymi z [3], a następnie przeliczono na wysokość 100 metrów, docelową wysokość osi

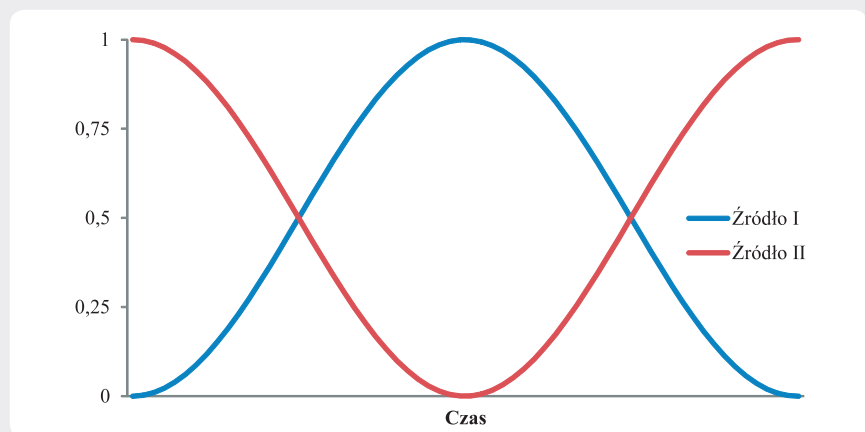
Statystyka	Przepływ [m ³ /s]	Nasłonecznienie [kWh/m ² /dzień]	Prędkość wiatru na 100 metrach [m/s]
Średnia	27,693	3,113	5,999
Odchylenie	9,437	1,985	2,794
Wariancja	89,048	3,940	7,805
Skrzywienie	1,233	0,572	0,502
Kurtoza	2,718	-0,703	0,130

Tab. 1. Charakterystyka szeregów czasowych zmiennych użytych w szacowaniu uzysku energii elektrycznej w latach 1985–2004

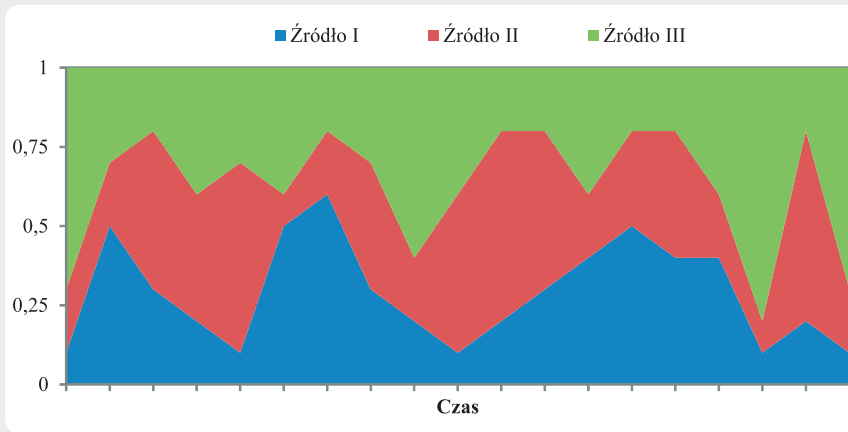
wirnika turbiny o mocy znamionowej 2 MW, na podstawie zależności przedstawionych w [6]. Jednakże, jak wskazują [14], dane Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW), pochodzące z pomiarów pojedynczego czujnika zamontowanego na wysokości 10 metrów, nie są miarodajne, a ich przeliczanie na większą wysokość nad poziomem gruntu obarczone jest błędem. Ponadto dane te są uśredniane w ujęciu dobowym, co może prowadzić do niedoszacowania ze względu na posługiwanie

się wartościami średnimi. Poprawność obliczeń oceniono na podstawie istniejących pomiarów odnoszących się do Parku Wiatrowego Margonin Wschód [9]. W tab. 1 przedstawiono podstawowe statystyki wspomnianych szeregów czasowych.

Uzysk energii z turbiny wiatrowej oraz systemu fotowoltaicznego obliczono zgodnie z zależnościami przedstawionymi w [7], natomiast produkcję energii elektrycznej z elektrowni wodnej oparto



Rys. 1. Przykład idealnej czasowej komplementarności dwóch źródeł energii



Rys. 2. Trzy hipotetyczne źródła energii doskonale uzupełniające się w czasowym wymiarze produkcji energii

na danych pozyskanych z [3] oraz metodzie obliczeń zawartej w [8]. Uzyskane wyniki zweryfikowano z danymi przedstawionymi w [9] odnośnie elektrowni wiatrowej oraz [10] w wypadku MEW (mała elektrownia wodna). Rozbieżność wyników nie przekraczała 5%, przy czym należy mieć na uwadze, że porównywane uzyski mogły zostać opracowane dla różnych przedziałów czasowych. Poprawność oszacowania dla PV oceniono na podstawie literaturowych doniesień [8, 11] na temat funkcjonowania tego typu źródeł energii w Polsce – uzyskane wyniki uznano za wiarygodne.

Pojęcie komplementarności

Pojęcie komplementarności w wytwarzaniu energii z różnych źródeł energii może być rozumiane jako ich zdolność do generowania energii elektrycznej bądź ciepłej w sposób uzupełniający się. Komplementarność źródeł energii może zostać oceniona z punktu widzenia czasu, przestrzeni lub obu tych wymiarów jednocześnie. Ze względu na odwoływanie się w tym opracowaniu do jednej lokalizacji, uwagę skupiono wyłącznie na komplementarności czasowej, w skali: wieloletniej, miesięcznej oraz dobowej. Na rys. 1 zaprezentowano przykład idealnej komplementarności dwóch źródeł energii, których krzywa uzysku ma postać sinusoidy. Idealna komplementarność w tym wypadku odznacza się wartością współczynnika korelacji równą 1.

Praca trzech niestabilnych źródeł energii może wyglądać tak, jak przedstawiono to na rys. 2, gdzie podobnie jak na rys. 1 występuje doskonała czasowa komplementarność tych źródeł. W rzeczywistości źródła I oraz II mogłyby być generatorem fotowoltaicznym i turbiną wiatrową, natomiast źródło III ogniwem paliwowym [12]. W tym opracowaniu rozważano jednak zdolność do uzupełniania się źródeł wiatrowych, słonecznych oraz wodnych.

Wyniki

Na podstawie wspomnianych wcześniej źródeł dokonano przeliczenia energii generowanej przez poszczególne źródła. W późniejszych obliczeniach wielkość generowanej energii rozpatrywano w odniesieniu do 1 MW mocy zainstalowanej. Należy zaznaczyć, że istniejąca na Gwdzie elektrownia wodna cechuje się mocą

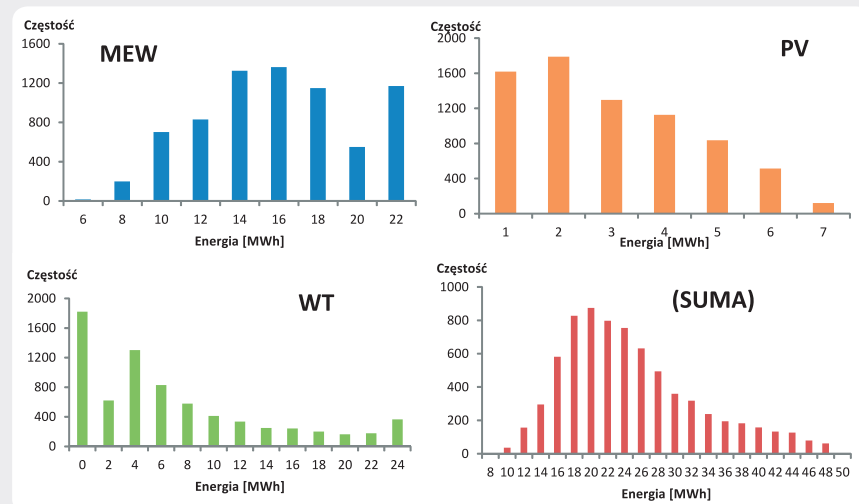
maksymalną 1,1 MW, a uzysk z turbiny wiatrowej oparto na krzywej mocy rzeczywistej turbiny Vestas V90 o mocy znamionowej 2 MW. Na rys. 3 przedstawiono histogramy uzysku energii elektrycznej w ujęciu dobowym, na podstawie analizy 20-letniego szeregu czasowego odpowiednich zmiennych. Przyjęte oznaczenia: MEW – mała elektrownia wodna, PV – elektrownia fotowoltaiczna, WT – turbina wiatrowa, SUMA – zestawienie sumarycznego uzysku wcześniejszych trzech źródeł energii. Na uwagę zasługuje fakt, że w wypadku energetyki wiatrowej przez blisko 1800 dni (około 25% rekordów szeregu czasowego) nie została wygenerowana nawet pojedyncza MWh energii. Z tej perspektywy elektrownia fotowoltaiczna, zakładając jej 100-proc. niezawodność, jest pewniejszym źródłem energii – przy tym rozróżnieniu kluczowe są lokalne warunki klimatyczne (nasłonecznienie, prędkość wiatru), tak więc na podstawie jednej lokalizacji nie sposób wyciągać dalszych wniosków. Rozkład produkcji energii elektrycznej z MEW w największym stopniu wpływa na kształt histogramu dla uzysku sumarycznego. Można zaobserwować brak przypadków o zerowej produkcji energii elektrycznej oraz ok. 1200 dób, gdy produkcja energii elektrycznej była bliska znamionowej. Kształt tych rozkładów

determinowany jest w głównej mierze przez parametry statystyczne szeregów czasowych (przepływ, prędkość wiatru, nasłonecznienie) oraz sposób, w jaki obliczany był uzysk energii elektrycznej – prędkość startowa oraz maksymalna dla turbiny wiatrowej czy też maksymalny przelęg (maksymalne natężenie przepływu) w wypadku elektrowni wodnej.

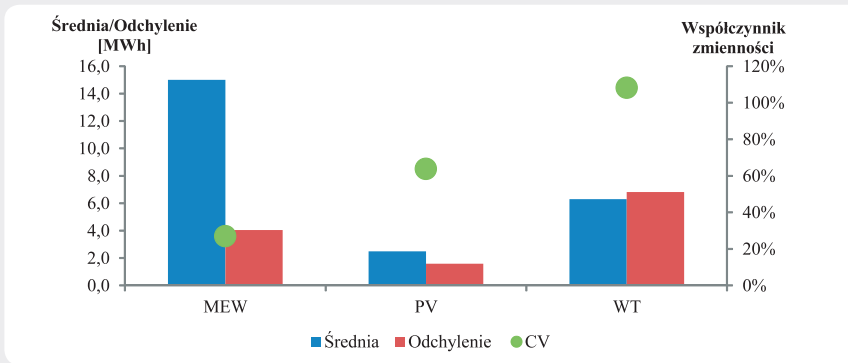
W celu zbadania zmienności poszczególnych źródeł energii dla wartości uzysku dziennego obliczono wartość średnią, odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności, który wiąże dwa wcześniejsze parametry w postaci ilorazu. Można zaobserwować, że elektrownia wodna cechuje się największą wartością średniej dziennej produkcji energii elektrycznej oraz w stosunku do niej niewielkim odchyleniem standardowym. W efekcie jej współczynnik zmienności jest nieco ponad dwa razy mniejszy niż ten dla elektrowni fotowoltaicznej oraz przeszło cztery razy od tego dla turbiny wiatrowej. Konsekwencją wysokiej wartości współczynnika zmienności jest postrzeganie danego źródła jako niestabilnego, często również określanego mianem chimerycznego.

Na rys. 4 przedstawiono parametry statystyczne dla uzysku energii elektrycznej z trzech źródeł w ujęciu dobowym. Na podstawie danych z lat 1985–2004 wylizczono średni sumaryczny miesięczny uzysk energii z poszczególnych źródeł (rys. 5). Jak już wspomniano, uzysk ten przedstawiany jest w przeliczeniu na 1 MW mocy zainstalowanej. Tym samym elektrownia fotowoltaiczna generuje w skali roku ok. 13% uzysku energii elektrycznej elektrowni wodnej oraz 40% turbiny wiatrowej. Biorąc pod uwagę miesięczną zmienność wartości nasłonecznienia oraz kształt krzywej uzysku energii z rys. 5, można domniemywać, że instalacja dodatkowych mocy wytwórczych w fotowoltaice pozwoliłaby na częściową eliminację minimum sumarycznego uzysku (MEW, PV, WT) powstającego w miesiącach letnich (czerwiec – sierpień).

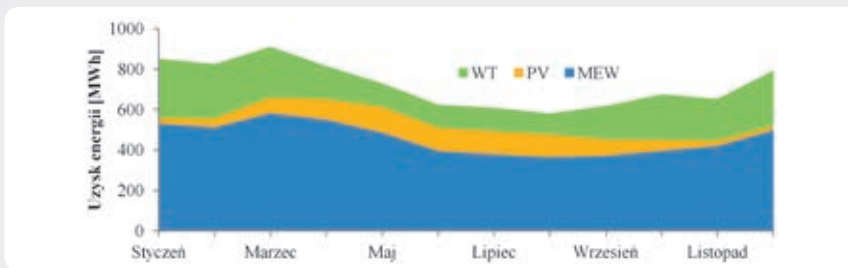
Ostatnim etapem rozważań zmienności czasowej jest wieloletni horyzont czasowy (rys. 6). Tutaj ocenie poddano wyłącznie



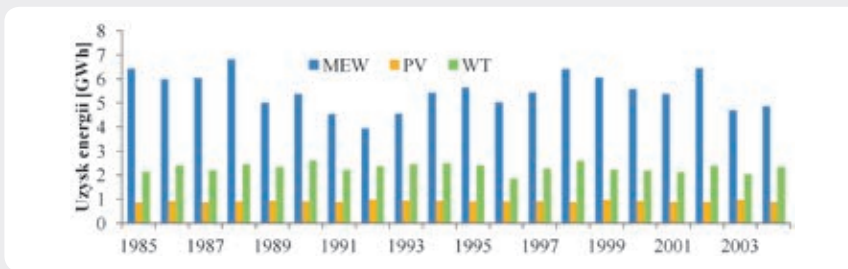
Rys. 3. Histogramy uzysku z poszczególnych źródeł energii na przestrzeni lat 1985–2004



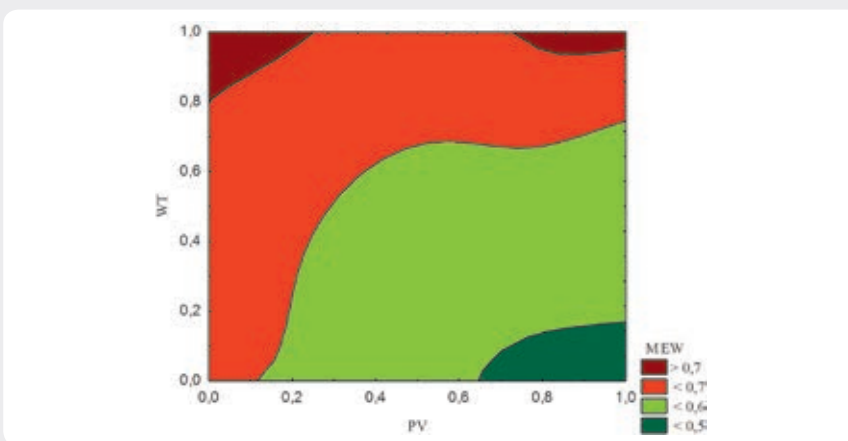
Rys. 4. Porównanie trzech źródeł energii za pomocą parametrów statystycznych – dla uzysku dziennego



Rys. 5. Średni miesięczny uzysk energii z poszczególnych źródeł energii



Rys. 6. Sumaryczny roczny uzysk energii z poszczególnych źródeł energii



Rys. 7. Wykres warstwowy MEW względem PV i WT. MEW – wygładzanie najmniejszych kwadratów, ważone odległością

zmienność sumarycznego rocznego uzysku energii z każdego źródła energii, co przedstawiono na rys. 6. Jak widać, w wypadku elektrowni fotowoltaicznych i wiatrowych zmienność ta jest stosunkowo niewielka, a z punktu widzenia współczynnika

zmienności wynosi odpowiednio 3% i 7%. Większą wartość tego parametru odnotowano dla elektrowni wodnej i wynosił on 13% dla średniej rocznej produkcji około 5,5 MWh przy odchyleniu standardowym wynoszącym 0,72 MWh.

Dobowa	MEW	PV	WT
MEW	1	-0,20	0,17
PV	-0,20	1	-0,32
WT	0,17	-0,32	1

Miesięczna	MEW	PV	WT
MEW	1	-0,29	0,60
PV	-0,29	1	-0,90
WT	0,60	-0,90	1

Wieloletnia	MEW	PV	WT
MEW	1	-0,48	0,21
PV	-0,48	1	-0,01
WT	0,21	-0,01	1

Tab. 2. Wartości współczynników korelacji dla różnych kroków czasowych

Najistotniejszym etapem badania było określenie, czy jeśli w danym oknie czasowym następuje spadek ilości energii generowanej z jednego źródła, to pozostałe wykazują korzystną zależność i dla tego samego okresu zaczynają produkować więcej energii elektrycznej. Wydaje się, że analiza przebiegu wykresów na rys. 5 potwierdza tę hipotezę, gdyż spadkowi uzysku z MEW oraz WT towarzyszy wzrost produkcji energii elektrycznej z PV. Zależność tę przedstawiono w tab. 2 za pomocą współczynników korelacji. W zależności od przyjętej konwencji interpretacji ich wartości, w ujęciu miesięcznym widać, że energetyka wiatrowa i słoneczna są ze sobą silnie ujemnie skorelowane. Tym samym, manipulując mocami zainstalowanymi w poszczególnych źródłach, tak by ich sumaryczny roczny uzysk był do siebie zbliżony, można dążyć do częściowego wygładzenia krzywej uzysku. Na uwagę zasługuje korelacja między MEW a WT, która w ujęciu miesięcznym wynosi ok. 0,6. W wypadku dobowego przedziału czasu trudno jest mówić o występowaniu znaczącej korelacji pomiędzy tymi źródłami energii. Co więcej, rozważania należałoby prowadzić w ujęciu godzinowym. Ze względu na specyfikę, zmienności nasłonecznienia (wyłącznie dzień) oraz prędkości wiatru (dzień i noc), na podstawie zawartych w tab. 2 wartości współczynników korelacji nie sposób stwierdzić, czy w słoneczny dzień z reguły nie będzie generowana energia z turbin wiatrowych. Pewnych przesłanek co do godzinowej komplementarności zasobów wiatru i słońca może dostarczyć analiza danych systemowych dotyczących generacji energii elektrycznej w polskich elektrowniach wiatrowych [13]. W ujęciu wieloletnim istotna wydaje się wyłącznie korelacja pomiędzy źródłami fotowoltaicznymi oraz elektrownią wodną ($R^2 = -0,48$). Zależność tę można tłumaczyć występowaniem lat charakteryzujących się różną sumą opadów atmosferycznych, co pośrednio (zachmurzenie) przekłada się na nasłonecznienie i bezpośrednio na ilość odprowadzanej wody rzekami.

W ramach obliczeń wygenerowano łącznie 7305 wartości uzysku energii elektrycznej dla każdego z analizowanych źródeł energii. Wartości te, znormalizowane do przedziału 0–1, zestawiono w postaci wykresu warstwiczowego zaprezentowanego na rys. 7. Zaprezentowano na nim pracę elektrowni wodnej w zależności od uzysku generowanego przez PV oraz WT. Na uwagę zasługuje częściowe ułożenie się warstwiczów prostej $y = x$. Ułożenie warstwiczów na rys. 7 potwierdza wzajemne zależności między analizowanymi źródłami energii. Produkcja energii z PV jest bliska maksimum (0,8–1), gdy WT jest na niskim poziomie (0–0,2). Należy wówczas oczekiwać produkcji energii w wysokości nieprzekraczającej 0,5 generacji maksymalnej (miesiące letnie). Jednak gdy turbiny wiatrowe będą generować energię na poziomie (0,8–1), produkcja energii z MEW może zbliżyć się do wartości przekraczających 0,7. Prawdopodobnie zależności przedstawione na rys. 7 wynikają z miesięcznej i słabo jeszcze rozpoznanej dobowej korelacji pomiędzy poszczególnymi źródłami energii. Przedstawione zależności i wyniki z wcześniejszych etapów pracy mogą posłużyć do optymalizacji funkcjonowania systemu energetycznego. Zwłaszcza że coraz większą rolę odgrywają w nim niestabilne źródła energii odnawialnej, w tym przede wszystkim energia wiatrowa i słoneczna.

Podsumowanie

Rosnący udział i znaczenie odnawialnych źródeł energii w krajowym bilansie energetycznym jest i będzie stawał się coraz większym wyzwaniem na każdej płaszczyźnie

jego funkcjonowania. Odpowiednie planowanie rozwoju oraz udziału poszczególnych źródeł niestabilnej energii odnawialnej winno oprócz rachunku ekonomicznego zostać oparte na ich charakterystyce oraz relacji pomiędzy nimi.

Analiza wykazała korzystną relację pomiędzy energetyką wiatrową i słoneczną w ujęciu sum miesięcznych oraz z perspektywy wieloletniej pomiędzy energią wodną i słoneczną. Wydaje się, że dzięki temu może to stanowić wskazówkę dla władz lokalnych w zakresie wypracowania rozwiązań zmierzających do zapewnienia samowystarczalności energetycznej.

W dalszej perspektywie wskazane jest przeprowadzenie kolejnych badań na ten temat, w celu weryfikacji wysuniętych wniosków w innych obszarach i regionach Polski.

Bibliografia

- Jurasz J., Mikulik J., Wpływ dystrybucji przestrzennej na stabilność źródeł fotowoltaicznych [w:] Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska, red. Kotowski A., Piekarska K., Kaźmierczak B., Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2015.
- Kleissl J., Solar Energy Forecasting and Resource Assessment, Waltham: Academic Press (Elsevier) 2013.
- Rocznik Hydrologiczny 1994, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.
- Solar Energy Services for Professionals, www.soda-pro.com.
- Global Modeling and Assimilation Office, www.gmao.gfsc.nasa.gov.
- Majewski G., Nasiłowska B., Energia wiatru – ocena zasobów i problemy inwestycji w odnawialne źródła energii na przykładzie gminy Latowicz (woj. mazowieckie), *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 2011, nr 51, s. 61–71.
- Notton G., Diaf S., Stoyanov L., Hybrid Photovoltaic / Wind Energy Systems For Remote Locations, *Energy Procedia* 2011, Vol. 6, s. 666–677.
- Zimny J., Odnawialne źródła energii w budownictwie niskoenergetycznym, Kraków – Warszawa 2010.
- Raport o oddziaływaniu planowanego przedsięwzięcia na środowisko. Budowa II obwodu farmy wiatrowej Margonin Wschód wraz z infrastrukturą towarzyszącą, www.margonin.pl.
- www.ew.koronowo.pl.
- Lenarczyk J., Wynik sezonowych badań wydajności energetycznej instalacji fotowoltaicznej o mocy szczytowej 668 W, *Problemy Inżynierii Rolniczej* 2013, z. 1, s. 151–161.
- Ceran B., Sroka K., Performance Analysis of a Hybrid Generation System of Wind Turbines, Photovoltaic Modules, and a Fuel Cell., *Acta Energetica* 2015, nr 2/23, s. 36–42, DOI:10.12736/isnn.2300-3022.2015204.
- www.pse.pl.
- Duraczyński M., Badanie i analiza energii wiatru dla potrzeb energetyki w Polsce Południowo-Wschodniej, praca doktorska, AGH w Krakowie, Kraków 2012/2013.

mgr inż. Jakub Jurasz

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
 e-mail: jakubkamiljurasz@gmail.com

Doktorant Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w dyscyplinie inżynieria produkcji. Jego zainteresowania obejmują: wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w procesach produkcyjnych oraz funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego przy rosnącym udziale niestabilnych źródeł energii elektrycznej.

mgr Adam Piasecki

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
 e-mail: adm.piasecki@gmail.com

Doktorant Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Zajmuje się szeroko pojętą problematyką hydrologiczną, w tym gospodarką wodną. Uczestnik wielu konferencji krajowych i międzynarodowych, a także autor i współautor kilkudziesięciu artykułów.