

## **OCENA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA KLASYCZNEJ ANALIZY WSKAŹNIKOWEJ DO BIEŻĄCEGO ZARZĄDZANIA ENERGIĄ ELEKTRYCZNĄ W WYBRANYM ZAKŁADZIE PRZEMYSŁOWYM**

**Izabela SADOWSKA<sup>1</sup>, Paweł BUĆKO<sup>2</sup>**

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: (58) 347 26 63 e-mail: izabela.sadowska@pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: (58) 347 17 81 e-mail: pawel.bucko@pg.gda.pl

**Streszczenie:** Wszystkie zakłady przemysłowe mogą efektywnie wykorzystywać nośniki energii przy zastosowaniu odpowiednich technik i metod zarządzania. Wybór najlepszej metody powinien opierać się przede wszystkim na zachowaniu ciągłości usprawniania gospodarki energetycznej. Zastosowanie metod wskaźnikowych to jeden z podstawowych zabiegów praktykowanych w celu prowadzenia efektywnej kontroli procesów np. produkcyjnych. Najważniejszym elementem wydaje się prawidłowe zdefiniowanie metod pomiaru, kontroli, dokumentowania i analizowania kluczowych wskaźników energochłonności. W referacie przedstawiono mocne i słabe strony stosowania metod statycznych. Klasyczna analiza wskaźnikowa daje ograniczone możliwości w zakresie wykrywania stanów alarmowych, co wynika przede wszystkim z niedostatku informacji o występujących związkach przyczynowo-skutkowych. Duża liczba wskaźników może stać się barierą w sprawnym posługiwaniu się nimi w aspekcie szybkiej i precyzyjnej oceny przebiegu procesu.

**Słowa kluczowe:** gospodarka energetyczna, energochłonność, przemysł.

### **1. WPROWADZENIE**

Prowadzenie poprawnej gospodarki energetycznej jest obecnie jednym z podstawowych zadań służb energetycznych w zakładach przemysłowych. Oczekuje się od nich bieżącego zarządzania użytkowaniem nośników energetycznych. Przy zmieniającej się wydajności procesów produkcyjnych do oceny bieżącego zużycia próbuje się wykorzystywać metody wskaźnikowe. Za pomocą analizy wskaźników zużycia nośników energetycznych podejmowane są próby wykrywania niekorzystnych zmian w prowadzonej gospodarce energetycznej. Wczesne rozpoznanie stanów „alarmowych” jest warunkiem koniecznym dla możliwości podjęcia szybkich działań naprawczych i uniknięcia groźnych następstw. Istnienie zakłóceń w procesie produkcyjnym jest nieodłącznym jego elementem. Wykrycie tych niepokojących stanów staje się możliwe dzięki odpowiedniej obserwacji procesu. Monitoring zużycia nośników na bieżąco umożliwia wykrycie pewnych symptomów, które zazwyczaj sygnalizują konieczność podjęcia interwencji [1].

Wiedza na temat zalet i wad używanych narzędzi służących do kontroli procesów produkcyjnych pozwala szczegółowo zdefiniować ich przeznaczenie. Dotychczasowe

próby wnioskowania o zużyciu nośników na bieżąco na podstawie wyznaczanych wskaźników normatywnych są mało wiarygodne [1, 3, 4]. Wiąże się to głównie z dużą liczbą analizowanych danych i często trudnościami ze wskazaniem pożądanego poziomu wskaźników. Na podstawie standardowych pomiarów zużycia można wyliczyć bardzo dużą liczbę wskaźników charakteryzujących badany proces. Liczba ta może nie tyle ułatwić, co utrudnić dokonywanie precyzyjnych analiz. Częstotliwość posługiwania się wskaźnikami jest bardzo zróżnicowana [1, 2, 3, 5].

Klasyczna analiza wskaźnikowa jest jednym z najczęściej wdrażanych sposobów oceny energochłonności procesów produkcyjnych. Wieloletnie doświadczenia w praktykowaniu metod wskaźnikowych wyznaczyły kierunek działań tworząc z tych metod fundament prowadzonej gospodarki energetycznej. Duże zainteresowanie tą procedurą wynika przede wszystkim z jej prostoty. Bazuje ona głównie na przetwarzaniu zbieranych danych. Generowane w ten sposób wskaźniki są w przystępny sposób interpretowalne. Rezultaty obróbki danych rozumie z powodzeniem nawet niewyspecjalizowany personel [1]

Zawarta w artykule ocena możliwości wykorzystania klasycznej analizy wskaźnikowej została przeprowadzona dla wybranego zakładu przemysłu spożywczego specjalizującego się w produkcji piwa. Przedmiotem analizy jest instalacja do produkcji piwa o maksymalnej wydajności około 700 ton na dobę, czyli wytwarzająca około 2,3 mln hl piwa gotowego rocznie. Browar ten kultywuje ponad 130-letnie tradycje piwowarskie. W związku z postępowaniem technicznym przeprowadzono przez te lata sukcesywnie wiele prac modernizacyjnych oraz wprowadzono nowe maszyny i rozwiązania techniczne. Produkcja piwa jest obecnie monitorowana komputerowo.

Przekazane dane przez rozważany zakład produkcyjny pozwoliły na początku przeprowadzić tradycyjne wnioskowanie o poziomie wyznaczonych wskaźników. Dysponując dobowymi pomiarami dwóch wartości cech ( $x_i$  oraz  $y_i$ ), gdzie  $x_i$  oznacza  $i$ -ty pomiar dobowej wielkości produkcji piwa w hl, natomiast  $y_i$  oznacza  $i$ -ty pomiar dobowego zużycia energii elektrycznej w kWh, wykonano dla całego analizowanego okresu obliczenia wskaźników:

- dobowych wg:

$$w_i^d = \frac{y_i}{x_i} \quad (1)$$

gdzie:  $x_i$  –  $i$ -ta dobowa wielkości produkcji piwa ogółem

[hl/dobę]

$y_i$  –  $i$ -ty pomiar dobowego zużycia energii

elektrycznej przez odbiór [kWh/dobę]

$w_i^d$  –  $i$ -ty dobowy wskaźnik zużycia energii

elektrycznej na hektolitr wyprodukowanego piwa [kWh/hl]

- miesięcznych wg:

$$w_j^m = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} y_i}{\sum_{i=1}^{n_j} x_i} \quad (2)$$

gdzie:  $w_j^m$  –  $j$ -ty miesięczny wskaźnik zużycia energii

elektrycznej na hektolitr wyprodukowanego piwa [kWh/hl]

$n_j$  – liczba dni opomiarowanych w miesiącu

$j$  – numer kolejnego miesiąca

- rocznych wg:

$$w^r = \frac{\sum_{i=1}^p y_i}{\sum_{i=1}^p x_i} \quad (3)$$

gdzie:  $w^r$  – roczny wskaźnik zużycia energii elektrycznej na

hektolitr wyprodukowanego piwa [kWh/hl]

$p$  – liczba dni w roku

Punktem wyjścia w typowej analizie wskaźnikowej jest rozumowanie o przebiegu procesu na podstawie wielokierunkowych porównywań uzyskiwanych rezultatów obliczeń. W praktyce najczęściej spotyka się dwa miarodajne zestawienia z:

- wyznaczonymi modelowo dla badanego sektora wielkościami granicznymi,
- uzyskiwanymi podczas wieloletniej obserwacji wielkościami historycznymi.

Istotą doboru metody pomiaru energochłonności jest głównie jej cel oraz podmiot, który będzie posługiwał się jej wynikami. W przypadku wskaźników używanych w prostych metodach ilościowych odbiorca zawęży je w szczególności do podmiotów nadzorujących cały zakład produkcyjny. Informacje zawarte w wynikach świadczą jedynie o sytuacji przedsiębiorstwa na tle uzyskiwanych w danej branży wielkości referencyjnych (tzw. „benchmarking”) [1, 2]. Konfrontacja miar realnych z reprezentatywnymi daje wyłącznie wyobrażenie o kierunku prowadzonej gospodarki energetycznej. Celem głównym jest natomiast umożliwienie podejmowania racjonalnych decyzji dotyczących zarządzaniem nośnikami w przyszłości. Ograniczenie dostępu do szczegółowych danych oraz prostota interpretacji może okazać się kluczem w realizacji tego typu zadania [1].

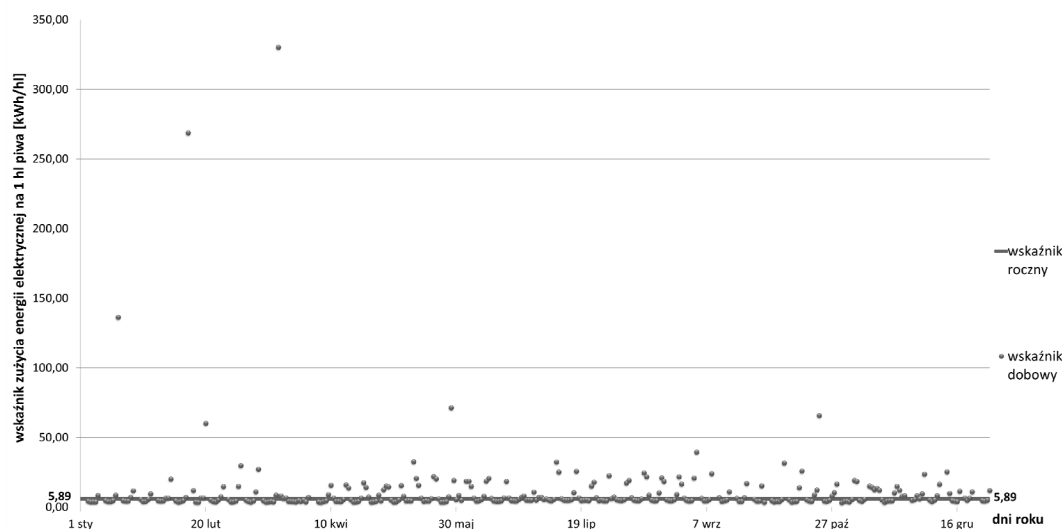
W niniejszym artykule analizowana jest możliwość wykorzystania, jako wartości porównawczej dla obliczonych na bieżąco wskaźników dobowych, wartości rocznej lub miesięcznej wskaźnika.

## 2. BIEŻĄCA ANALIZA PUNKTOWA

### 2.1. Sformułowanie zadania

Wyliczenie wskaźników punktowych na podstawie zależności od 1 do 3 umożliwi w pierwszej kolejności ocenę powiązań klasycznych wskaźników energochłonności. Zaproponowana modyfikacja klasycznej analizy wskaźnikowej polega na dostosowaniu mierników punktowych do oceny dynamiki skali zmian poziomu nośników energetycznych. Tradycyjne zero-jedynkowe (dobre/złe) kryteria tracą na znaczeniu w obliczu aktualnych rozwiązań. Nowe podejście analityczne polega na rozpoznaniu złożonych procesów produkcyjnych, podziale na elementy proste oraz próbie identyfikacji powiązań pomiędzy nimi, szczególnie zależności przyczynowo-skutkowych.

Rozszerzenie klasycznej analizy wskaźnikowej polegać będzie na prezentacji wykresów miar. W każdym proponowanym przypadku zachowana zostanie kolejność przedstawiania zgodnie z podziałem na okresy analizy. Implementacja klasycznej analizy wskaźnikowej do bieżących metod zarządzania energią przebiegać będzie według naturalnej dekompozycji czasu. Przyjęty harmonogram postępowania zakłada opis zmienności od ogółu do szczegółu, czyli od zmienności rocznej, poprzez miesięczną do dobowej.



Rys. 1. Zestawienie zmienności rocznej wskaźników dobowych w odniesieniu do wskaźnika rocznego

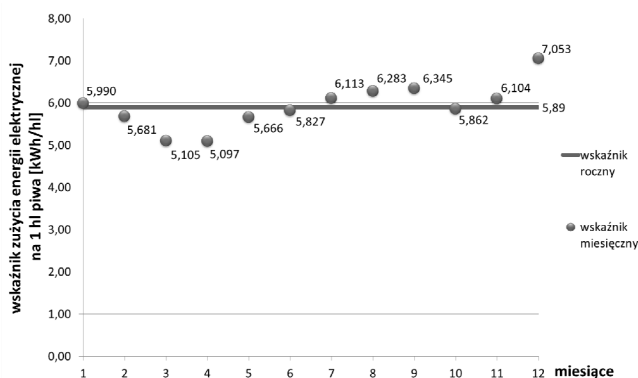
## 2.2. Zależności wskaźnikowe

Obliczany zwyczajowo wskaźnik roczny informuje w bardzo niewielkim stopniu o faktycznym zapotrzebowaniu dobowym na nośniki. Zobrazowana na rysunku 1 zmienność wskaźników dobowych zużycia energii elektrycznej przez browar w odniesieniu do całkowitej produkcji dobowej piwa gotowego w perspektywie roku ujawnia wielkość obszaru zmienności. Układ wskaźników dobowych na wykresie rocznym umożliwia dostrzeżenie zmienności tygodniowej. Świadczy o tym periodyczne pogrupowanie wskaźników dobowych obliczonych dla dni roboczych. Naniesienie na wykresie wskaźnika rocznego na poziomie 5,89 kWh/hl wyznacza obserwowalny podział wskaźników dobowych.

Częstotliwość występowania wskaźników dobowych poniżej i powyżej linii stałej (wyznaczonej na podstawie wskaźnika rocznego) klasyfikuje doby ze względu na cykl pracy zakładu. Zapotrzebowanie na energię w czasie dni roboczych generuje wskaźniki poniżej wartości wskaźnika rocznego, natomiast te powyżej sugerują o weekendowych przerwach w produkcji. Wybór opisu kształtowania się zużycia energii elektrycznej w funkcji produkcji wynika głównie z dostępności danych pomiarowych. Za takim podejściem przemawia również fakt, że rozpatrywane wielkości są mierzone w odpowiednio długich odstępach czasu. Nie bez znaczenia jest zatem jednolitość oraz wiarygodność materiału statystycznego.

Istotna jest również liczba i wielkość skrajnych wartości wskaźników. Dzięki wykresowi rocznemu zauważa się występowanie dni, dla których wskaźniki uzyskują wartość nawet 330 kWh/hl. Kontrola bieżąca wielkości dobowych mogłaby nie tylko wykryć stany niepokojące, ale również ocenić czy jest to wynik przypadku czy wynik wadliwie prowadzonej gospodarki energetycznej.

Roczny wykres zmienności dobowej niestety nie informuje o sezonowości pracy zakładu. Cykliczność wskaźników dobowych zawiera się standardowo w obszarze od 3,11 do 40 kWh/hl. Nie ma w tej zmienności wyraźnych spadków ani wzrostów wskaźników właściwych dla pór roku. Rozwiązaniem tego problemu może okazać się zatem wykres pokazany na rysunku 2, oddający zmienność roczną wskaźników miesięcznych.

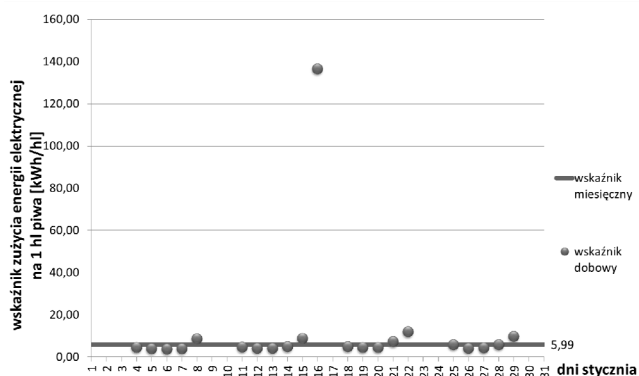


Rys. 2. Zestawienie zmienności rocznej wskaźników miesięcznych w odniesieniu do wskaźnika rocznego

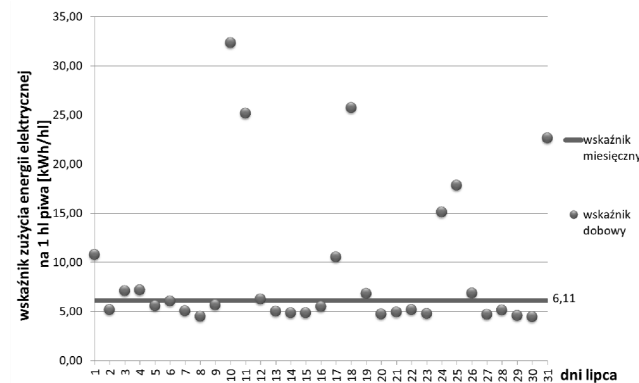
W porównaniu do obszaru zmienności wskaźników dobowych, wartości wskaźników miesięcznych w analizowanym okresie zdecydowanie mniej odbiegają od zaznaczonego linią czerwoną wskaźnika rocznego. Wskaźniki dobowe osiągały okresowo wzrost do około 600% wartości wskaźnika rocznego. Miesięczne natomiast w najgorszym przypadku

dla grudnia (7,053 kWh/hl) wzrosły maksymalnie o 19,75% w stosunku do poziomu rocznego.

Najodpowiedniejsze do bieżącej kontroli prowadzonej gospodarki energetycznej jest porównanie wskaźników dobowych z wyznaczonym wskaźnikiem miesięcznym. Analizę zmienności miar dobowych w odniesieniu do stałego wskaźnika miesięcznego przedstawiono na przykładzie reprezentatywnych miesięcy dla okresu zimowego (styczeń) oraz okresu letniego (lipiec). Wahania wyników obliczeń dla dni roboczych w styczniu (rys. 3) zawierają się w granicy od 3,7 do 11,84 kWh/hl. Poziom styczniowych wskaźników dobowych rośnie zatem maksymalnie o 100% w stosunku do wskaźnika miesięcznego (5,99 kWh/hl). Tendencji tej nie da się jednak zauważyć dla wskaźników obliczonych dla miesiąca lipca (rys. 4). Wartości wskaźników dla dni lipcowych nie identyfikują w tak jednoznaczny sposób występowania zmienności tygodniowej. Jest ona jednak pośrednio zauważalna w trzech ostatnich tygodniach miesiąca. Wysokość wskaźników weekendowych mieści się pomiędzy 10,5 a 32,3 kWh/hl.



Rys. 3. Zestawienie zmienności miesięcznej wskaźników dobowych w odniesieniu do wskaźnika miesięcznego stycznia



Rys. 4. Zestawienie zmienności miesięcznej wskaźników dobowych w odniesieniu do wskaźnika miesięcznego lipca

Oscylujące najbliżej poziomu wskaźnika miesięcznego (6,11 kWh/hl) wskaźniki dobowe świadczą o tym, że w tych dniach zakład pracował z maksymalną zdolnością produkcyjną. Osiągane w tych dniach wartości wskaźników zawarte są w przedziale od 4,4 do 6,8 kWh/hl.

Wyznaczenie wskaźników dobowych ujawniło konieczność pominięcia rachunków w dobach charakteryzujących się przerwą w produkcji. Zużywana energia elektryczna przez browar w czasie trwania styczniowych weekendów jest zestawiana z zerową produkcją piwa. Wdrożenie klasycznej analizy wskaźnikowej nie ma uzasadnienia w momentach wstrzymania produkcji, ponieważ uzyskiwane w ten

sposób wyniki dążą do nieskończoności, nie wnosząc racjonalnych konkluzji do wnioskowania o ich wymiarze. Autorzy artykułu zdecydowali się pominąć te doby w obliczeniach wskaźników dobowych.

Spostrzec należy, że wskaźniki dobowe zazwyczaj rosną w ostatnich dniach roboczych poszczególnych tygodni czyli w piątki. Wyjaśnieniem tej sytuacji jest utrzymywanie stałego poziomu zapotrzebowania na energię przez zakład produkcyjny przy jednoczesnym ograniczaniu produkcji piwa ogółem. Na szczególną interpretację zasługuje skrajana wartość wskaźnika dobowego w dniu 16 stycznia, która wyniosła 136,3 kWh/hl. Ten dzień był sobotą. Miara wskaźnika została zdeterminowana wykazaną w tym dniu produkcją piwa na poziomie około 7% standardowej produkcji zimowej doby roboczej, przy niewielkim spadku konsumpcji energii dobowej.

Wykorzystanie położenia statycznych wskaźników dobowych względem poziomu wskaźnika miesięcznego jest zdecydowanie bardziej uzasadnione w okresie zimowym. Przeprowadzana w ten sposób ocena zużycia energii elektrycznej przez browar na bieżąco jest możliwa dzięki obserwowalnej regularności zmienności punktów na wykresie. Wdrożenie tych działań w okresie letnim wiąże się z trudnościami, głównie ze względu na brak widocznych tendencji zmienności miar punktowych. Zestawienie na rys. 4 pomiarów parametrów w dobach lipcowych ujawnia wady kontroli przeprowadzanej przez służby energetyczne.

### 3. PODSUMOWANIE

Wykres punktowy nie świadczy o skutecznym zarządzaniu energią elektryczną w wymiarze dobowym. Wskaźniki charakteryzują się dużym zróżnicowaniem. Występuje zauważalnie więcej przypadków niepoprawnej oceny zapotrzebowania na nośniki energetyczne w konfrontacji z poziomem produkcji. Zmienność miesięczna miar punktowych wizualizuje braki w racjonalnej ocenie poprawności prowadzonej gospodarki energetycznej na bieżąco.

Podsumowaniem oceny efektywności metod wskaźnikowych w kontekście bieżącej oceny prowadzonej gospodarki energetycznej jest sumaryczne zestawienie wyników w tabeli 1. Analiza wartości wskaźników miesięcznych w stosunku do wartości wskaźnika rocznego dla wybranego zakładu produkcyjnego stanowi realny dowód poświadczający prawdziwość opisanych powyżej konkluzji. Zestawienie kompletu miar statycznych uwiarygodnia zatem wielokrotnie wymieniane wady analiz punktowych.

Tab. 1. Zestawienie wskaźników miesięcznych oraz rocznych w wybranym zakładzie przemysłowym

nr miesiąca $j$	wsk. miesięczny $w_j^m$ [kWh/hl]	wsk. roczny $w^r$ [kWh/hl]
1	5,990	5,894
2	5,681	
3	5,105	
4	5,097	
5	5,666	
6	5,827	
7	6,113	
8	6,283	
9	6,345	
10	5,862	
11	6,104	
12	7,053	

Można uogólnić prezentowane wyniki w postaci wniosku, że ani wskaźnik roczny ani zróżnicowane wskaźniki miesięczne nie pozwalają na skuteczne porównywanie z obserwowanymi na bieżąco wskaźnikami dobowymi. W prowadzonej na bieżąco kontroli wskaźników energetycznych w obiekcie przemysłowym trzeba poszukiwać innych wartości porównawczych dla obliczanych na bieżąco krótkookresowych (dobowych) wskaźników zużycia energii. Celowe jest uwzględnienie złożonych zależności zapotrzebowania na energię od bieżącej intensywności procesu produkcyjnego [5].

### 4. BIBLIOGRAFIA

1. Bućko P.: Kontrola wskaźników energetycznych w procedurach zarządzania użytkowaniem energii elektrycznej. Rynek Energii nr 4/2001.
2. Charun H.: Podstawy gospodarki energetycznej. Politechnika Koszalińska, Koszalin 2004.
3. Wojdalski J., Drózd B.: Efektywność energetyczna zakładów przemysłu spożywczego. Zarys problematyki i podstawowe definicje. Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego. nr 3-4/2012.
4. Szargut J., Ziębik A., Koziół J., Janiczek R., Kurpisz K., Chmielniak T., Wilk R.: Racjonalizacja użytkowania energii w zakładach przemysłowych. Poradnik audytora energetycznego. Fundacja Poszanowania Energii. Warszawa 1994.
5. Sadowska I.: Metody analizy energochłonności w przemyśle. Rozprawa doktorska. Gdańsk 2015.

## THE POSSIBILITY OF USING DETERMINED CHARACTERISTICS OF PROCESSES TO CALCULATE COMPARATIVE INDICATORS FOR ONLINE ENERGY CONSUMPTION CONTROL

All industries may efficiently use energy carriers using appropriate techniques and methods of management. Choosing the best method should be based primarily on the continuity of improving energy economy. The use of indicator methods is one of the basic procedures practiced in order to conduct effective control processes. The most important element seems to be the correct definition of methods for measuring, controlling, documenting and analyzing key indicators of energy consumption. The paper presents the strengths and weaknesses of the use of static methods. Classical indicator analysis provides limited opportunities for the detection of alarm conditions, primarily because of the shortage of information about any cause-effect relationships. The multitude of indicators could become a barrier to the smooth handling it in the context of rapid and precise evaluation of the process.

**Keywords:** energy economy, energy intensity, industry.