

## OCENA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA CHARAKTERYSTYK ENERGETYCZNYCH PROCESU DO PRZEWIDYWANIA WSKAŹNIKÓW ENERGETYCZNYCH NA BIEŻĄCO

Izabela SADOWSKA

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
tel.: 58 347 2663; e-mail: izabela.sadowska@pg.gda.pl

**Streszczenie:** W artykule autorka zaprezentowała możliwości wykorzystania charakterystyk energetycznych procesu do bieżącej kontroli wskaźników energetycznych. Metoda bieżącej kontroli wskaźników wykorzystuje jako wartości porównawcze wskaźniki wyznaczane na podstawie charakterystyk energetycznych procesów. Metoda ma przede wszystkim mieć zastosowanie do wczesnego wykrywania i eliminowania nadmiernego, nieracjonalnego zużycia nośników energii oraz zmian w prowadzonej gospodarce energetycznej.

**Słowa kluczowe:** gospodarka energetyczna, energochłonność, prze-mysł

### 1. WPROWADZENIE

Metody wykorzystujące wskaźniki energetyczne są szeroko stosowane do wielu zadań. Są powszechnym podejściem w analizach statystycznych dotyczących stanu gospodarki. Wykorzystywane są do porównań benchmarkingowych procesów produkcyjnych. Wykorzystywane są do monitorowania skuteczności wdrożeń działań energooszczędnych. Dość powszechne jest ich stosowanie w formułowaniu polityk energetycznych oraz w prognozowaniu zapotrzebowania na nośniki energetyczne. Klasyczne podejście charakteryzuje głównie prowadzenie analiz w skali makroekonomicznej oraz wyznaczanie wskaźników w stosunkowo długich okresach czasu, charakterystycznych dla cykli zbierania danych statystycznych.

Wzrost popularności rozwiązań polegających na bieżącej kontroli nośników wynika głównie z rozwoju nowoczesnych technik pomiarowych oraz możliwości gromadzenia i obróbki komputerowej dużej liczby danych. Obróbka zgromadzonych danych jest najbardziej złożonym etapem w procesie bieżącej kontroli wskaźników. Etap ten opiera się głównie na znalezieniu prawidłowej zależności pomiędzy agregowanymi danymi. Wymaga się zatem dostosowania analizy do specyfiki technologicznej obiektu. Wskazane jest, aby rozpoznawanie wskaźników energetycznych odbywało się na jak najwyższym poziomie uszczegółowienia, definiując analizowany proces użytkowania energii jako pojedynczy i w największej mierze identyfikowalny. Uzyskane w ten sposób informacje dają o wiele większe możliwości interpretacyjne w porównaniu do wykonywanej standardowo analizy punktowej.

Wyznaczane punktowo wartości wskaźników zagregowanych typu zużycie energii na jednostkę produktu unie-możliwiają bieżącą kontrolę procesu ponieważ zawierają informację obejmującą wszystkie etapy produkcji. W proponowanym podejściu zaleca się modyfikację dotychczasowo-

wych nawyków i skłonności zarządzających nośnikami energii. Zmiana polega na przystosowywaniu wyznaczonych wskaźników do rzeczywistej specyfiki procesu, a nie do przyzwyczajień i intuicji.

Przez bieżącą kontrolę rozumie się wnioskowanie na podstawie wskaźników wyznaczanych w możliwie krótkich okresach czasu. Przez krótki okres czasu rozumie się okres niezbędny do wiarygodnego zebrania danych pomiarowych o zużyciu energii i wielkości produkcji. W procesach zarządzania energią w obiektach przemysłowych najczęściej takim okresem jest doba.

### 2. CHARAKTERYSTYKI ENERGETYCZNE PROCESU

#### 2.1. Sformułowanie zadania

Miarodajna charakterystyka interesującej badacza zbi-orowości musi obejmować swoim zasięgiem badanie powią-zań pomiędzy zmiennymi. Przeciwdziałanie nadmiernemu zużyciu energii elektrycznej nie może ograniczać się wy-łącznie do obserwacji jej poziomu podczas zachodzących procesów. Określenie natury nośnika energetycznego po-winno wiązać się z jednoczesnym monitoringiem danych, które mogą mieć istotny wpływ na badaną zmienną [4]. Właściwa klasyfikacja rozważanego procesu może pomóc zrozumieć jego charakter. Pomocne na tym etapie rozważań okazują się wykresy, na których zebrano dane o produkcji i zużyciu energii w ustalonych okresach czasu.

Wybór opisu kształtowania się zużycia energii elek-trycznej w funkcji produkcji wynika głównie z dostępności danych pomiarowych. Za takim podejściem przemawia również fakt, że rozpatrywane wielkości są mierzone w po-żądanych odstępach czasu. Nie bez znaczenia jest zatem jednolitość oraz wiarygodność materiału statystycznego.

Tradycyjne działania związane z nadzorowaniem zuży-cia nośników wewnątrz zakładu uzależnione są przede wszystkim od zakresu opomiarowania poboru nośników. Struktury komputerowych systemów zbierania danych w badanym zakładzie przemysłowym są bardzo różne. Róż-nice wynikają z:

- różnorodności nośników energetycznych,
- liczby punktów pomiarowych,
- struktury organizacyjnej przedsiębiorstwa,
- dostępnych sieci transmisyjnych,
- potrzeb służb energetycznych w zakresie monitorowania i rejestracji danych o zużyciu poszczególnych nośników.

W przypadku tak rozbudowanej struktury systemu, która obejmuje zasięgiem punktów pomiarowych cały zakład produkcyjny, należy założyć, że najbardziej odpowiedni okres umożliwiający bieżące nadzorowanie zużywanych nośników wynosi raz na dobę. Wybór dobowej analizy wielkości zużywanych mediów jest podyktowany koniecznością odczytu wszystkich nośników we wszystkich działach o tej samej porze dla każdej doby. Konfiguracja rozpatrywanego systemu zbierania pomiarów opiera się w zależności od nośnika na odczytach elektronicznych oraz ręcznych. Komplikacje wynikające z próby skracania odcinków czasu (np. godzinowych) są związane z brakiem dostępu do pomiarów w tym samym momencie dla wszystkich mediów. Kłopotliwy staje się zwłaszcza pomiar danych na temat wielkości produkcji. Pozyskanie wyników godzinowych wiązało się zatem z brakiem jednoczesności odczytu, a tym samym obarczałoby wyniki analizy bieżącej błędami ze względu na niejednoczesność pomiarów.

Wiadomości o sposobie użytkowania energii w przeszłości pozwalają na wypracowanie prawidłowych zasad jej użytkowania [1, 5]. Przestrzeganie określonych standardów na bieżąco stanowi pierwszy etap wdrażania procedur kontroli procesów technologicznych pod względem użytkowania energii w czasie rzeczywistym. Dysponując pomiarami wielkości produkcji oraz zużycia energii w wybranych odstępach czasu (np. na dobę) można w pierwszej kolejności przedstawić graficznie zależność pomiędzy zmiennymi w postaci wykresu rozproszenia.

Analizując wykresy rozproszenia najbardziej istotna jest ocena ogólnego charakteru powiązań i odstępstw od niej. Typową formą zależności jest przybliżona zależność funkcyjna. Definicja krzywej najlepiej pasującej do zgromadzonych danych określana jest w literaturze jako podstawowa charakterystyka energetyczna [1, 4]. Ujęcie zależności funkcyjnej za pomocą podstawowej charakterystyki energetycznej oznacza uwzględnienie tylko dwóch parametrów przy założeniu stałej wartości pozostałych czynników. Wyznaczenie pełnej charakterystyki energetycznej procesu produkcji piwa jest bardzo trudne (i w praktyce mało efektywne) ze względu na specyfikę zachodzących zmian.

Dobranie najlepszej postaci równania charakterystyki opiera się głównie na wykorzystaniu metod statystycznych. Bazując na dostatecznie dużej liczbie uzyskanych w czasie normalnej eksploatacji pomiarów zostanie w pierwszej kolejności wykorzystane typowe podejście dopasowania funkcji do wyników. Dostęp dobowych pomiarów dwóch wartości cech  $(x_i, y_i)$ , gdzie  $x_i$  oznacza  $i$ -ty pomiar dobowej wielkości produkcji, natomiast  $y_i$  oznacza  $i$ -ty pomiar dobowego zużycia energii elektrycznej umożliwia dostosowanie zależności liniowej wielu zmiennych objaśniających do skonstruowania funkcji liniowej między dwiema zmiennymi. Zastosowanie regresji liniowej pozwala zdefiniować zależność typu:

$$y = bx + c \quad (1)$$

gdzie:  $b, c$  – stałe charakteryzujące dany proces.

Określony jako stała  $c$  punkt przecięcia wykresu funkcji z osią energii interpretowany będzie jako zużycie „jałowe”. Mierzony np. w kWh/dobę wymiar wyrazu wolnego wiąże zużycie energii jedynie z wybranym w analizie okresem odniesienia. Wartość natomiast oznacza niezbędną ilość energii elektrycznej do utrzymania zdolności produkcyjnej na minimalnym poziomie.

Stała  $b$  nazywana współczynnikiem nachylenia prostej informuje ile energii elektrycznej należy zużyć aby wypro-

dukować każdą kolejną jednostkę produkcji. Wyrażona w kWh/j.nat. konstrukcja tej stałej świadczy o możliwości interpretacji jej wymiaru jako dynamicznego wskaźnika zużycia energii. Wyrażony wskaźnik informuje bezpośrednio o poziomie zmienności zużycia energii w wyniku jednostkowej zmiany poziomu produkcji.

Sposób wyznaczania wartości parametrów  $b$  i  $c$  funkcji liniowej, opisującej wpływ zmiennej  $x$  czyli dobowej wielkości produkcji w j.nat./dobę na zmienną  $y$  to znaczy dobowe zużycie energii elektrycznej w kWh/dobę, opiera się na wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów. Metoda najmniejszych kwadratów opiera się na założeniu, że suma kwadratów odchyłeń zaobserwowanych wartości zużycia energii elektrycznej od wartości teoretycznie obliczonych na podstawie wybranej funkcji jest najmniejsza. Podstawowe założenie zapisane zostało następująco:

$$F = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_i (y_i - c - bx_i)^2 = \min \quad (2)$$

gdzie:  $x_i$  –  $i$ -ty pomiar dobowej wielkości produkcji [j.nat/dobę],

$y_i$  –  $i$ -ty pomiar dobowego zużycia energii elektrycznej [kWh/dobę],

$\hat{y}_i$  –  $i$ -ta wartość teoretyczna dobowego zużycia energii elektrycznej [kWh/dobę],

$b, c$  – stałe charakteryzujące dany proces.

Przyjęcie w pierwszej kolejności liniowego sposobu przyporządkowania wartości zużycia energii elektrycznej wartościom produkcji wynika z przypuszczenia, że pomiędzy zmiennymi występuje liniowy związek o charakterze przyczynowo-skutkowym. Oceniając wykresy rozproszenia podejrzewa się, że jednakowym przyrostom produkcji towarzyszą jednakowe przyrosty zapotrzebowania na energię.

## 2.2. Wyniki analizy regresji rocznej zmiennych dobowych – studium przypadku

Opisywana w artykule metoda jest proponowana jako ogólna do badań energochłonności w przemyśle. Do potrzeb testowania wybrano zakład reprezentujący przemysł spożywczy. Badania modelowe przeprowadzono na przykładzie browaru należącego do koncernu zrzeszającego pięć browarów. Grupa zakładów piwowarskich osiąga łącznie około 30% sprzedaży rocznej piwa w Polsce. Ze względu na wysoką jakość prowadzonej gospodarki energetycznej w badanym browarze, wyniki energochłonności produkcji piwa stanowią punkt odniesienia dla pozostałych zakładów.

Możliwość wykorzystania charakterystyk energetycznych procesu produkcji piwa opierać się będzie w pierwszej kolejności na obserwacji rocznej pomiarów dobowych zużycia energii elektrycznej oraz wielkości produkcji browaru. Obliczone w tabeli 1 parametry liniowych funkcji regresji dobowego zużycia energii przez browar ogółem oraz poszczególne działy względem dobowej produkcji piwa na podstawie wzoru (2) dla rocznej obserwacji umożliwiają wstępną klasyfikację działów w kontekście rozważanego procesu technologicznego. Analizując parametry rocznych charakterystyk energetycznych można podzielić realizowane przez poszczególne działy procesy produkcyjne według siły zależności zużycia od wielkości produkcji.

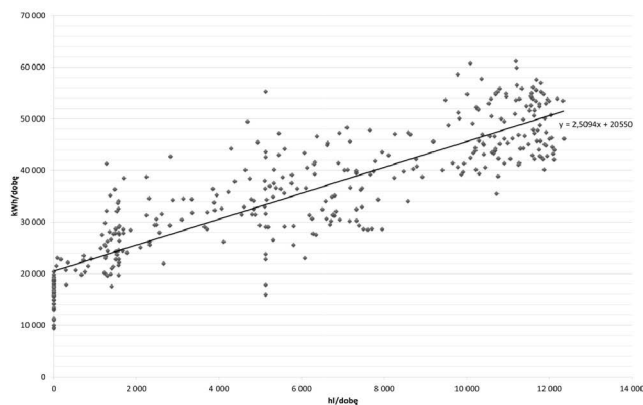
Wyznaczony współczynnik determinacji  $R^2$  wynosząc dla Browaru Ogółem 0,762 informuje, że 76,2% dobowej zmienności zużycia energii elektrycznej przez Browar jest wyjaśnione kształtowaniem się dobowej wielkości produkcji piwa. Przybliżone wartości wyliczono między innymi w przypadku Zakładu Sprężonego Powietrza 87,3%, Stacji

Uzdatniania Wody z wynikiem 86,3% czy Warzelnia 85,8%. Odwrotne miary uzyskano np. w Starej Butelkowni, gdzie tylko 5,5% zużywanej energii wynika z produkcji piwa przez Browar.

Tablica 1. Wartości parametrów funkcji liniowych oraz współczynników determinacji rocznej zmienności danych dobowych

	$b_r$ [kWh/hl]	$c_r$ [kWh/dobę]	$R_r^2$ [-]
BROWAR OGÓLEM	2,5094	20 550,1	0,762
Podział na działy Browaru			
Magazyn Surowców	0,0674	68,9	0,691
Stara Butelkownia	0,0209	405,3	0,055
SUW	0,0510	262,2	0,863
Administracja	0,0360	513,6	0,252
UniTanki	0,0240	892,2	0,285
Zakład CO <sub>2</sub>	-0,1865	2 703,2	0,276
Filtracja	0,1542	660,5	0,695
Zakład Sprężonego Powietrza	0,2509	893,6	0,873
Warzelnia	0,4476	316,0	0,858
Linia Puszeki	0,2096	1 987,2	0,324
Pozostałe nieopomiarowane	0,1516	4 378,1	0,178
Linia Butelki	0,6559	1 149,0	0,644
Maszynownia Chłodnicza	0,4650	4 829,0	0,263

Rysunek 1 wizualizuje rzeczywistą zmienność stabelaryzowanych powyżej wyników parametrów rocznych zależności regresyjnych. Ocena wzrokowa charakterystyk energetycznych pomaga dopełnić badanie zależności pomiędzy zmiennymi dobowymi w ujęciu rocznym. Porównanie kolejnych wykresów rocznych umożliwia oszacowanie rozrzutu punktów wynikających z pomiarów dobowych w konkretnych przypadkach. Obserwuje się także różnice w kątach nachylenia prostych regresyjnych.



Rys. 1. Zmienność roczna dobowego zużycia energii elektrycznej przez Browar Ogółem w funkcji dobowej produkcji piwa

### 3. OCENA CHARAKTERYSTYKI ROCZNEJ

#### 3.1. Dobór metody porównawczej

Przyjęto, że zmienność roczną zapotrzebowania na energię można przybliżyć charakterystycznymi wykresami zmienności dobowej produkcji piwa w funkcji dobowego zużycia energii elektrycznej. Przez wykres charakterystyczny rozumie się przebieg wartości oczekiwanej zużycia energii elektrycznej czyli najbardziej przybliżonej rzeczywistości. Opisanie w punkcie 2 charakterystyki energetyczne mają służyć docelowo jako podstawa do oceny gospodarki energetycznej na bieżąco.

Wyznaczanie na bieżąco standardów zużycia energii w zakładzie produkcyjnym polega na przyrównywaniu realnych miar wskaźników dobowych do tych uzyskiwanych przy pomocy funkcji. Przeprowadzona na tym etapie badań weryfikacja użyteczności generowanych przebiegów opiera się będzie na ocenie błędów, jakie będą popełniane przy szacowaniu wskaźników na podstawie wyznaczonych charakterystyk energetycznych.

Punktem wyjściowym oceny błędów, jakimi obarczone są równania charakterystyk energetycznych jest oszacowanie wariancji resztowej. Realizacja tego etapu jest konieczna ze względu na przyjętą w analizie miarę odchyłki czyli błędu średniokwadratowego. Błąd ten wynika bezpośrednio z pierwiastkowania wariancji odchyłek.

Wyznaczone miary odchylenia pomiędzy wskaźnikami wyliczonymi z równania ekonometrycznego a wskaźnikami obliczonymi na podstawie realnych pomiarów dobowych wyrażają w kWh/hl o ile faktycznie różnią się wielkości teoretyczne od rzeczywistych. Porównanie odchyłek średniokwadratowych z wyliczonymi zgodnie z analizą klasyczną odchyleniami standardowymi stanowi doskonałe narzędzie do odpowiedzi na pytanie, które z podejść jest bardziej użyteczne do szacowania i oceny bieżących wskazań przyrządów pomiarowych.

#### 3.2. Ocena charakterystyki rocznej

Wyznaczane wskaźniki na podstawie estymacji zagregowanych danych dobowych umożliwiły wyznaczenie spodziewanych wskaźników dobowych z dokładnością zestawioną w tabeli 2 w kolumnie wyników odchylenia standardowego reszt. Szacowanie wskaźników dobowych na podstawie odpowiednich charakterystyk rocznych prowadzi do zauważalnego obniżenia miary błędu odchyłki (w stosunku do analizy klasycznej). Dowodem na to jest kolumna wyników relacji odchyłek średniokwadratowych w stosunku do standardowych. Poprawę wyników uzyskano we wszystkich rozpatrywanych działach.

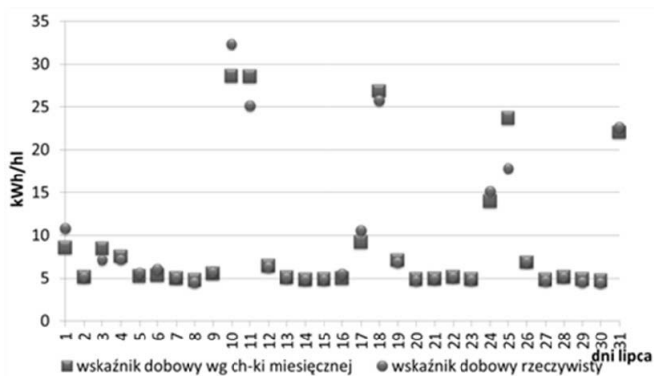
Tablica 2. Wyniki miar zmienności wskaźników dobowych w roku wyznaczonych na podstawie analizy klasycznej oraz charakterystyki rocznej

Miejsce pomiaru	Miara dopasowania	Odchylenie standardowe wskaźników dobowych w roku	Odchylenie standardowe reszt wg ch-k rocznych	Relacja odchylenia standardowego reszt do odchylenia standardowego
		[kWh/hl]	[kWh/hl]	[-]
BROWAR OGÓLEM		25,493	2,675	0,105
Podział na działy Browaru				
Magazyn Surowców		0,165	0,103	0,624
Stara Butelkownia		0,983	0,589	0,599
SUW		0,337	0,040	0,119
Administracja		0,704	0,165	0,234
UniTanki		0,911	0,179	0,196
Zakład CO <sub>2</sub>		4,577	1,534	0,335
Filtracja		0,551	0,353	0,642
Zakł. Spręż. Powietrza		1,096	0,347	0,316
Warzelnia		0,645	0,361	0,560
Linia Puszeki		1,924	0,853	0,443
Pozostałe nieopomiarowane		3,703	1,892	0,511
Linia Butelki		1,780	1,150	0,646
Maszynownia Chłodnicza		7,775	2,668	0,343

### 3.3. Wyniki dopasowania funkcji miesięcznych

Zestawienie tabelaryczne odchyłek pomiędzy dobowymi wartościami wskaźników wyznaczonych według rzeczywistych pomiarów oraz zgodnie z charakterystykami miesięcznymi stanowią potwierdzenie zauważonych korzyści na przykładzie funkcji rocznych. Najbardziej wartościowe wydaje się jednak uszczegółowienie funkcji rocznej na miesięczne.

Potwierdzeniem dostrzeżonej powyżej przewagi metody określania wskaźników dobowych za pomocą wykresu miesięcznego są wykresy punktowe wskaźników zilustrowane na rys. 2. Wyznaczone na podstawie charakterystyki punkty w przewadze pokrywają się z rzeczywistymi. Pomimo braku idealnej zgodności współrzędnych zauważa się relatywnie duże dopasowanie wskaźników rzeczywistych do modelowych. Stopień przyporządkowania jest na tyle akceptowalny żeby ostatecznie potwierdzić efektywność wybranej metody oceny gospodarki energetycznej na bieżąco.



Rys. 2. Wykres wskaźników dobowych rzeczywistych oraz wyznaczonych za pomocą charakterystyki miesięcznej dla Browaru (ogółem w lipcu)

### 4. PODSUMOWANIE

Zestawienie odchyłek standardowych wraz z odchyleniami średniokwadratowymi wyraża miarę korzyści z zastosowania charakterystyk energetycznych. Świadczy o tym fakcie przede wszystkim poprawa wyników odchylenia standardowego reszt wobec odchylenia standardowego wskaźników we wszystkich badanych działach browaru

Rozpatrując działy, w których obserwuje się niewielką poprawę należy podkreślić, że są to działy o najniższych wynikach odchyłek standardowych spośród pozostałych. Obserwacje te są jednak zdecydowanie rzadziej obserwowalne. Weryfikacja wyników ilorazu odchyłek we wskazanych przypadkach na poziomie bliskim jedności sugeruje również, że same wyniki są sobie bardzo bliskie. Stosowanie charakterystyk energetycznych w tych przypadkach jest więc także dopuszczalne (choć nie powoduje istotnej poprawy jakości wniosowania).

### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Bućko P.: Zastosowanie regresji liniowej do analizy obciążeń cieplnych. Rynek Energii nr 5/2009.
2. Dobrzańska I.: Prognozowanie w elektroenergetyce. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2002.
3. Kamrat W.: Metody oceny efektywności inwestowania w elektroenergetyce. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2004.
4. Szargut J., Ziębik A., Kozioł J., Janiczek R., Kurpisz K., Chmielniak T., Wilk R.: Racjonalizacja użytkowania energii w zakładach przemysłowych. Poradnik audytora energetycznego. Fundacja Poszanowania Energii. Warszawa 1994.
5. Wilczyński A.: Racjonalne użytkowanie energii w przedsiębiorstwie. Racjonalność w Funkcjonowaniu Organizacji. Gospodarka – Społeczeństwo. Oficyna Wydawnicza PWSZ w Nysie. Nysa 2009.

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

Ensuring sustainable economic development of a country requires exercising effective energy management. Due to ever the increasing demand for energy, evaluating consumption effectiveness becomes necessary to reach essential goals. Energy economy should be evaluated within a specific branch of industry, using a specific indicator value. Determining a value of an indicator describing energy consumption enables comparing energy intensity at a certain consumption level This paper overviews applied methods of energy consumption analysis in Brewery Industry. Stages of the method for on-line control energy consumption indicators are establishing a basis for predicting from past energy consumption data, using this to establish the expected energy consumption indicators, calculating the difference between actual and predicted energy consumption indicators, which decide on the necessity to conduct an effective energetic economy.

**Keywords:** energetic economy, energy consumption, industry