

The Use of Process Energy Characteristics to Predict Energy Performance Indicators on an Ongoing Basis

Author

Izabela Sadowska

Keywords

energy management, energy intensity, industry

Abstract

This paper presents possible uses of process energy characteristics for ongoing monitoring of energy indicators. The method of ongoing monitoring of indicators consists in comparison of indicators determined on the basis of the processes' energy characteristics. The method is primarily applicable in early detection and elimination of excessive and irrational energy consumption and in adjustments of the current energy management.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2016312

1. Introduction

Methods utilising energy indicators are widely used for many tasks. Such methods are a common approach in statistical analyses concerning the energy economy. They are used for benchmarking comparisons of production processes. They are also used to monitor the effectiveness of implemented energy-saving measures. Their application in the formulation of energy policies as well as in forecasting of demand for energy media is commonplace. The classical approach is mainly characterised by analyses on the macroeconomic scale and determination of indicators over relatively long time periods typical for statistical data collection cycles.

While implementation of classical methods is known and has long been put into practice for periodical assessment of the energy economy, the introduction of online energy management procedures requires modification of traditional solutions [1, 5]. Indicators determined on the basis of short-term measurements are characterised by significant variability. Online energy management procedures require an effective method that makes it possible to determine comparative quantities for short-term indicators. This problem is particularly significant in industrial facilities where there is high diversity of means by which energy media are used. In Poland, where there has been poor development of measuring instrumentation and centralised collection of consumption data, the introduction of advanced energy management technologies faces numerous barriers. The most important among them include high costs of considered projects as well as low awareness of energy maintenance services resulting from the fact that they are not convinced of the purposefulness of measures like these.

The growing popularity of solutions based on online control of media mainly arises from the development of modern measuring techniques and capabilities of gathering and processing large amounts of data. Processing of gathered data is the most

complex stage in the process of online indicator control. This stage is mainly based on finding the right dependency within aggregated data. Therefore, analysis must be adapted to the technological nature of the facility. It is advisable for identification of energy indicators to take place at the highest possible level of detail, by defining the analysed energy consumption process as an individual process, identifiable to the greatest possible extent. Information gained in this manner provide much greater capabilities of interpretation in comparison to standard point analysis. Aggregated indicator values determined for points, such as energy consumption per product unit, make online process control impossible because they contain information encompassing all stages of production. In the proposed approach, it is recommended to modify current habits and tendencies of those managing energy media. The desired change involves adjusting the determined indicators to reflect the actual nature of the process, not habits and intuition.

Progress in information technologies within this scope is creating favourable conditions for changing current analytical practices with high delay to process analysis performed nearly immediately. Classical static methods are replaced by the introduction of online operational improvements.

Online control is understood as inferencing on the basis of indicators determined within time periods that are as short as possible. A short time period is understood as the period required for reliable collection of measuring data about energy consumption and production volume. A day is a short time period in energy management processes at industrial facilities.

2. Energy characteristics of the process

2.1. Optimisation problem

Reliable characterisation of the community of interest to the researcher must cover investigation of relationships between

variables. Counteracting excessive electricity consumption cannot only be limited to observing its level as processes are performed. Defining the nature of an energy medium should be linked to simultaneous monitoring of data that may have a significant impact on the studied variable [4]. Proper classification of the process under consideration may be helpful in understanding its character. Charts compiling data on production and energy consumption in specific time periods are helpful at this stage of considerations.

The choice of description of electricity consumption as a function of production mainly results from the availability of measuring data. The fact that the considered quantities are measured at the desired time intervals also speaks in favour of this approach. The integrity and reliability of the statistical material is therefore not without significance.

Traditional measures related to monitoring of media consumption at a facility are dependent, above all, on the extent to which media consumption is metered. The structures of data collection computer systems at the studied industrial facility vary significantly. Differences are due to:

- diversity of energy media
- number of measuring points
- the enterprise's organisational structure
- available transmission networks
- needs of energy maintenance services in the scope of monitoring and recording data on consumption of individual media.

In the case of such an expansive system structure, encompassing measuring points in the entire production facility, it should be assumed that once per day will be the most appropriate period enabling monitoring of consumed media. The choice of daily analysis of quantities of consumed media is dictated by the necessity of reading all media in all departments at the same time every day. Configuration of the measurement collection system in question is based on electronic or manual readings, depending on the medium. Complications arising from attempts to shorten time segments (e.g. hourly) are related to a lack of access to measurements at the same time for all media. Measurement of production volume data becomes particularly difficult. Acquisition of hourly results would therefore lead to a lack of simultaneous reading, burdening the results of online analysis with errors due to non-simultaneity of measurements.

A history of energy consumption would make it possible to develop proper rules of its use [1, 5]. Continuous adherence to defined standards is the first stage of implementing process control procedures from the perspective of energy consumption in real time. With production volume and energy consumption measurements, taken at selected time intervals (e.g. a day), at one's disposal, it is now possible to first present the dependency between variables graphically in the form of a scatter plot.

When analysing scatter plots, assessment of the general nature of relationships and deviations from them is the most important. An approximate functional dependency is a typical form of dependency. The definition of the curve best fitting gathered data

is referred to in the literature as the basic energy characteristic curve [1, 4]. Representation of a functional dependency by means of a basic energy characteristic curve means that only two parameters are accounted for under the assumption of a constant value of other factors. It is very difficult to determine the complete energy characteristic of the beer production process (and this would be of little effectiveness in practice) due to the nature of changes that occur.

Selection of the best form of the characteristic equation is mainly based on the application of statistical methods. Based on a sufficiently large number of measurements obtained over the course of normal operation, the typical approach of fitting functions to results will be applied first. Access to daily measurements of two feature values (x_i, y_i) , where x_i is the i -th measurement of daily production volume, and y_i is the i -th measurement of daily electricity consumption, enables adjustment of the linear dependency of multiple predictors for construction of a linear function between two variables. The application of linear regression makes it possible to define a dependency in the form of:

$$y = bx + c \tag{1}$$

where: b, c – constants characterising a given process

The intersection point of the function with the energy axis, defined as constant " c ", will be interpreted as "idle" consumption. The dimension of the free term, measured e.g. in kWh/day, links energy consumption only to the reference period selected in analysis. The value signifies the amount of electricity required to maintain production capacity at minimum level.

Constant " b ", called the slope coefficient of a line, provides information on how much electricity must be consumed to produce every production unit. The structure of this constant, expressed in kWh/unit, indicates the possibilities for interpretation of its dimension as a dynamic energy consumption indicator. The expressed indicator provides information on the level of variability in energy consumption directly in the result of the unit change in production volume.

The method of determining the values of parameters b and c of the linear function, describing the effect of variable x , or daily production volume in units/day on variable y , or daily electricity consumption in kWh/day, is based on application of the least squares method. The least squares method is based on the assumption that the sum of the squares of deviations of observed electricity consumption values from values theoretically calculated on the basis of the selected function is the least. This basic assumption has been written as follows:

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

where: x_i – i -th measurement of daily production volume [unit/day], y_i – i -th measurement of daily electricity consumption [kWh/day], \hat{y}_i – i -th value of theoretical daily electricity consumption [kWh/day], b, c – constants characterising the given process.

Acceptance of the linear method of assigning electricity consumption values to production values in first order arises from the conjecture that there is a linear, causal relationship between variables. Assessment of scatter charts gives rise to the suspicion that identical production increases are accompanied by identical increases of energy demand.

2.2. Results of annual regression analysis of daily variables – case study

The method described in this paper is proposed as a general method for investigating energy consumption in industry. A facility representing the food industry was selected for the purposes of testing. Model tests were conducted on the example of a brewery belonging to a concern associating five breweries. This group of brewery facilities achieves a total of approx. 30% of annual beer sales in Poland. Due to the high quality of the energy economy in the brewery in question, energy consumption results of beer production are a point of reference for other breweries. The possibility of utilising energy characteristics of the beer production process will be based, first of all, on annual observation of measurements of daily electricity consumption and production volume of the brewery. Annual observation of the parameters of linear regression functions of daily energy consumption in total for the brewery, calculated in Tab. 1, and for individual departments relative to daily beer production, calculated according to formula 2, enables preliminary classification of departments in the context of the technological process under consideration. When analysing the parameters of annual energy characteristics, production processes performed

by individual departments can be divided according to the strength of the dependency of consumption on production volume.

Coefficient of determination R_r^2 determined according to dependency:

$$R_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^r (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^r (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

where: \hat{y}_i – i -th value of theoretical daily electricity consumption [kWh/day], y_i – i -th measurement of daily electricity consumption [kWh/day], \bar{y} – value of annual arithmetic mean from daily electricity consumption measurements [kWh/day], r – number of daily measurements per year equal to 0.762 in Total for Brewery, informs that 76.2% of daily electricity consumption variability at the Brewery is predicted by the daily beer production volume. Approximated values have been calculated for the cases of, among other departments, Compressed Air Plant 87.3%, Water Treatment Station with a result of 86.3%, and Brewhouse 85.8%. Inverse measures were obtained e.g. at the Old Bottling Plant, where only 5.5% of consumed energy arises from beer production by the Brewery.

Figure 1 visualises the actual variability of the results of annual parameters of regression dependencies tabulated above. Visual evaluation of energy characteristics helps to complement investigation of dependencies between daily variables from an annual perspective. A comparison of successive annual charts makes it possible to evaluate the scatter of points resulting from daily measurements in specific cases. Differences in the slopes of regression lines are also observed.

A comparison of the results of annual regression of daily measurements to static indicators obtained continuously may prove insufficiently accurate. Determined deviations between daily values measured in real time and expected values, determined from annual characteristics, do not account for information about seasonality of production. Effective analysis of daily variability requires expansion of annual analysis by evaluation of monthly progressions.

2.3. Monthly evaluation of the effect of daily beer production on daily electricity consumption by the brewery

The goal of these considerations is to determine whether variability of characteristics for individual months in a year will improve the quality of representation of daily values. The variability of energy consumption of the process over the course of a year (variation of monthly volumes) has been demonstrated in previous considerations.

Visual evaluation of energy characteristics in representative months during the year (in Fig. 2) is an expansion of implementation of online control procedures based on regression function parameters determined in tables.

Referencing monitored daily electricity consumption measurements in total for the brewery and daily beer production to

	b_r [kWh/h]	c_r [kWh/day]	R_r^2 [-]
TOTAL FOR BREWERY	2.5094	20,550.1	0.762
division into the Brewery's departments			
Raw Materials Warehouse	0.0674	68.9	0.691
Old Bottling Plant	0.0209	405.3	0.055
Water Treatment Station	0.0510	262.2	0.863
Administration	0.0360	513.6	0.252
UniTanks	0.0240	892.2	0.285
CO2 Plant	-0.1865	2,703.2	0.276
Filtration	0.1542	660.5	0.695
Compressed Air Plant	0.2509	893.6	0.873
Brewhouse	0.4476	316.0	0.858
Can Line	0.2096	1,987.2	0.324
Other unmetered	0.1516	4,378.1	0.178
Bottle Line	0.6559	1,149.0	0.644
Refrigeration machine room	0.4650	4,829.0	0.263

Tab. 1. Parameter values of linear functions and coefficients of determination for annual variability of daily data

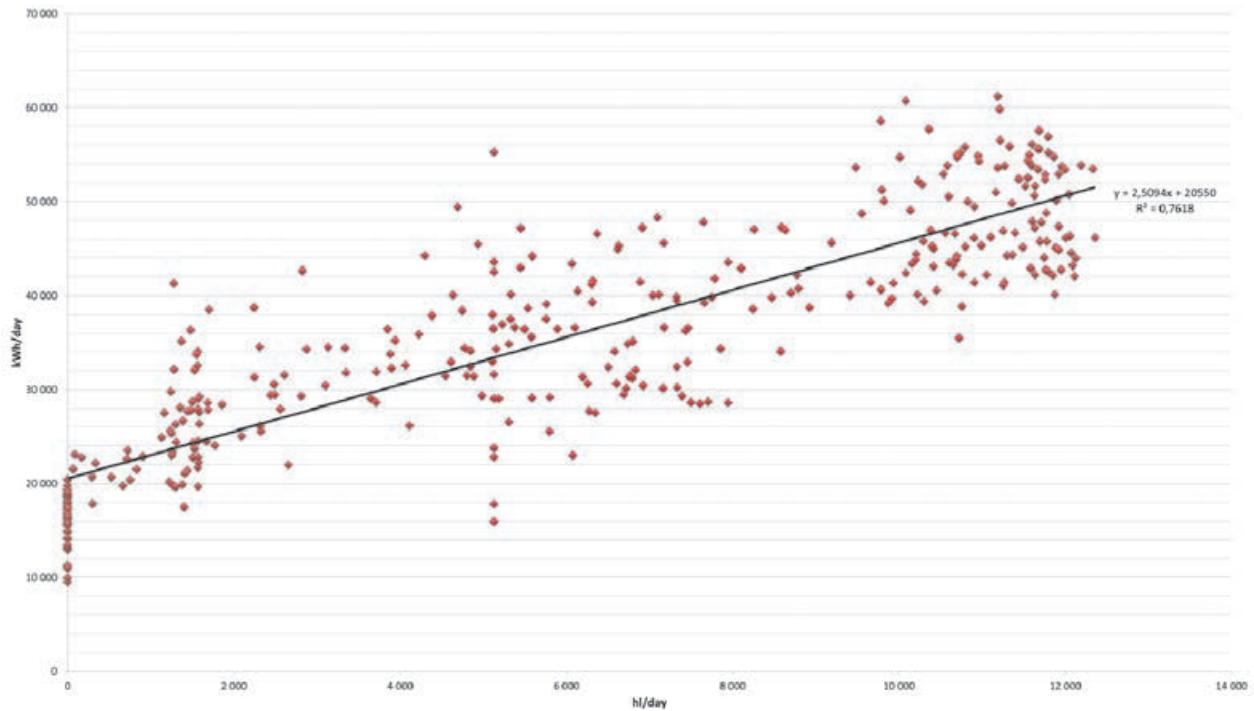


Fig. 1. Annual variability of daily electricity consumption in Total for Brewery as a function of daily beer production

place of	measure of	standard deviation of daily indicators over the course of a year [kWh/hl]	standard deviation of remainders according to annual characteristics [kWh/hl]	relationship of standard deviation of remainders to standard deviation [-]
TOTAL FOR BREWERY		25,493	2,675	0,105
division into the Brewery's departments				
Raw Materials Warehouse		0,165	0,103	0,624
Old Bottling Plant		0,983	0,589	0,599
Water Treatment Station		0,337	0,040	0,119
Administration		0,704	0,165	0,234
UniTanks		0,911	0,179	0,196
CO2 Plant		4,577	1,534	0,335
Filtration		0,551	0,353	0,642
Compressed Air Plant		1,096	0,347	0,316
Brewhouse		0,645	0,361	0,560
Can Line		1,924	0,853	0,443
Other unmetered		3,703	1,892	0,511
Bottle Line		1,780	1,150	0,646
Refrigeration machine room		7,775	2,668	0,343

Tab. 3. Results of measures of daily indicator variability over the course of a year, determined on the basis of classical analysis and the annual characteristic

determined monthly energy characteristics should be the foundation of continuously conducted energy management.

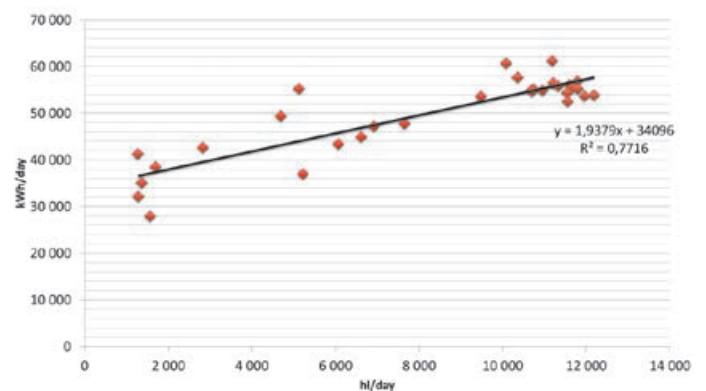


Fig. 2. Monthly variability of daily electricity consumption in Total for Brewery as a function of daily beer production (July)

Considering the diversity of means by which energy is used, arising from the nature of the production process, it is recommended to continue considerations regarding the causes of deviations of measured values from expected values at individual departments of the brewery.

3. Comparative analysis of indicators determined from the energy characteristic to actual indicators

3.1. Selection of comparative method

It was assumed that annual variability of energy demand can be approximated by characteristic curves of daily beer production variability as a function of daily electricity consumption. A characteristic curve is understood as the progression of expected electricity consumption values, or the best approximation of

measure of fitting month no	TOTAL FOR BREWERY		
	standard deviation of daily indicators over the course of a month [kWh/hl]	standard deviation of remainders according to monthly characteristics [kWh/hl]	relationship of standard deviation of remainders to standard deviation [-]
1	28.624	5.896	0.206
2	54.315	7.519	0.138
3	60.365	9.576	0.159
4	4.448	0.922	0.207
5	13.279	1.373	0.103
6	5.455	1.085	0.199
7	7.536	1.586	0.210
8	6.614	1.311	0.198
9	8.732	1.802	0.206
10	13.569	1.912	0.141
11	5.010	1.880	0.375
12	5.933	1.291	0.218

Tab. 4. Results of measures of daily indicator variability over the course of successive months, determined on the basis of classical analysis and the monthly characteristics for the brewery in total

reality. The energy characteristics described in section 2 are ultimately intended to serve as the basis for evaluation of online energy management.

Continuous determination of energy consumption standards at a production facility is based on comparing actual measures of daily indicators to those obtained by means of a function.

Verification of the usefulness of generated progressions, conducted at this stage of research, will be based on assessment of the errors that will be committed when estimating indicators on the basis of determined energy characteristics.

Estimation of remainder variance is the starting point for assessment of errors that characteristic equations of energy are burdened with. This stage must be realised due to the measure of deviation, or mean-square error, accepted in analysis. This error arises directly from the square root of the variance of deviations.

Determined measures of deviation between indicators calculated from the econometric equation and indicators calculated on the basis of actual daily measurements express the actual difference between theoretical and actual values in kWh/hl. Comparison of mean-square deviations from those calculated according to classical analysis by standard deviations is an excellent tool for answering the question of which of these approaches is more useful for estimation and evaluation of online readings of measuring instruments.

3.2. Evaluation of annual characteristic

Based on estimation of aggregated daily data, determined indicators made it possible to determine expected daily indicators with the accuracy given in Tab. 2 in the column of standard deviation results for remainders. Estimation of daily indicators on the basis of the appropriate annual characteristics leads to a noticeable reduction of the standard error value (compared to classical analysis). The column of results of mean-square deviation relationships, when compared to standard deviation relationships, is proof of this. Improvement of results was achieved in all departments under consideration.

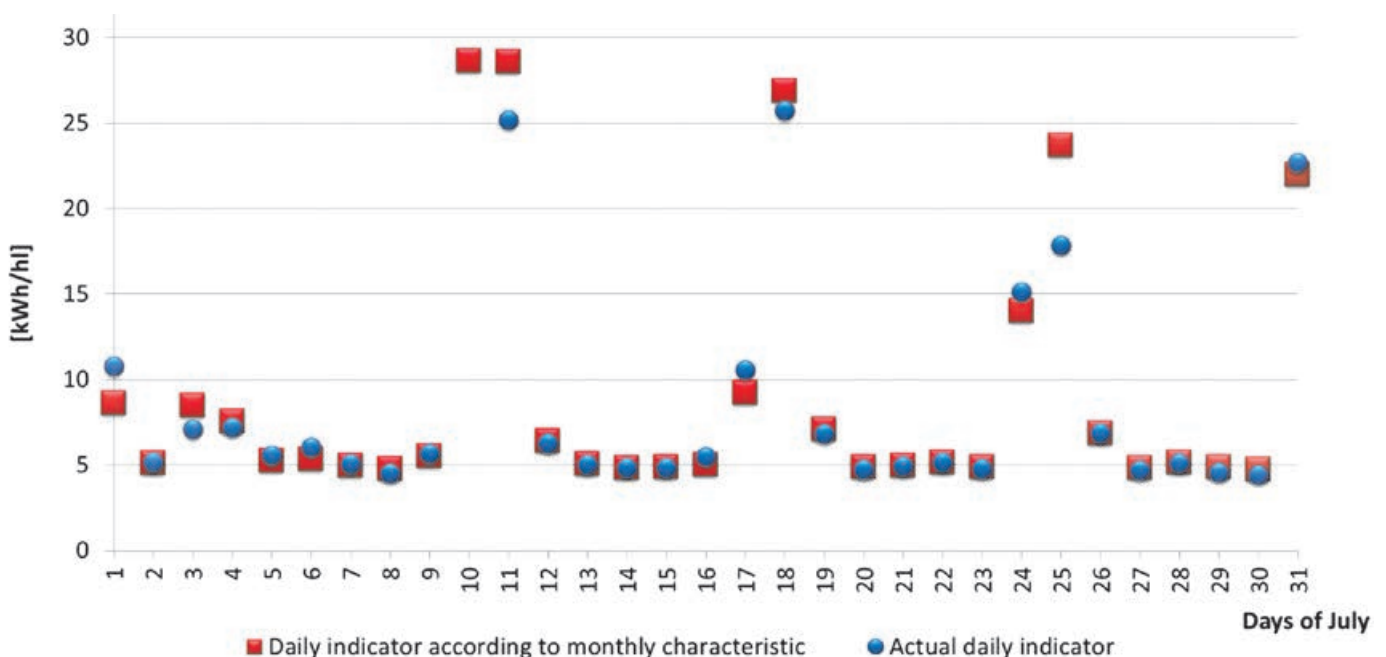


Fig. 3. Chart of actual daily indicators and indicators determined by means of the monthly characteristic in Total for Brewery in July

3.3. Results of fitting monthly functions

The tabular compilation of deviations between daily values of indicators determined according to actual measurements and according to monthly characteristics confirms benefits observed on the example of annual functions. However, it seems that determining monthly functions to detail the annual function seems to be the most valuable.

Considering the case of the entire brewery, attention must be paid to the results of comparisons in Tab. 3 obtained successively in February, March, May and October. Standard deviations calculated in these months reached 60.365 kWh/hl in March, 54.315 kWh/hl in February, and 13.279 kWh/hl in May. The greatest deviation values of daily indicators around their monthly means, as given above, were reduced by over 80% in all of the listed cases. Observed changes of the deviation measure accepted in analysis are also noticeable in other months. From the perspective of the need to estimate indicators continuously, improvement is advisable in the months in which indicators are the most scattered.

The indicator scatter charts illustrated in Fig. 3 confirm the advantage of the method of determining daily indicators by means of a monthly chart, as discussed above. The majority of points determined on the basis of the characteristic correspond to actual points. Despite the lack of perfect consistency of coordinates, a relatively good fit of actual indicators to model indicators is observed. The level of matching is acceptable enough to conclusively confirm the effectiveness of the method selected for evaluation of online energy management.

4. Summary

The compilation of standard deviations and mean-square deviations expresses the measure of benefits arising from the application of energy characteristics. Results in months in which classical deviations were greatest are proof of this fact.

When considering months in which no improvement is seen, it should be emphasised that these are the months with the lowest standard deviation results from among the others. However, such observations are decidedly less common. Verification of results of the quotient of deviations in the indicated cases at a level close to one also suggests that the results themselves are very similar, despite the lack of success. Thus, the application of energy characteristics is also acceptable in these cases (although it does not result in significant improvement of inferencing quality).

REFERENCES

1. P. Bućko, Zastosowanie regresji liniowej do analizy obciążeń cieplnych [Application of linear regression for thermal loads analysis], Rynek Energii, No. 5/2009.
2. I. Dobrzańska, Prognozowanie w elektroenergetyce [Forecasting in power engineering], Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.
3. W. Kamrat, Metody oceny efektywności inwestowania w elektroenergetyce [Methods for assessment of the effectiveness of investment in power engineering], Gdańsk 2004.
4. J. Szargut et al., Racjonalizacja użytkowania energii w zakładach przemysłowych. Poradnik audytora energetycznego [Rationalising energy use in industrial facilities. An Energy Auditor's Guidebook], Fundacja Poszanowania Energii, Warsaw 1994.
5. A. Wilczyński, Racjonalne użytkowanie energii w przedsiębiorstwie. Racjonalność w Funkcjonowaniu Organizacji. Gospodarka – Społeczeństwo [Rational energy use in an enterprise. Rationality in an Organisation's Operation. Economy – Society], Oficyna Wydawnicza PWSZ w Nysa 2009.

Izabela Sadowska

Gdańsk University of Technology
 e-mail: izabela.sadowska@pg.gda.pl

Graduated from the Faculty of Electrical and Control Engineering at Gdańsk University of Technology (2008). Currently a lecturer at the Department of Electrical and Power Engineering of Gdańsk University of Technology. She conducts research in the field of energy efficiency, particularly concerning the energy consumption of economic processes. Finance and banking are among her other interests.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 133–138. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Wykorzystanie charakterystyk energetycznych procesu do przewidywania wskaźników energetycznych na bieżąco

Autor

Izabela Sadowska

Słowa kluczowe

gospodarka energetyczna, energochłonność, przemysł

Streszczenie

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

1. Wprowadzenie

Metody wykorzystujące wskaźniki energetyczne są szeroko stosowane do wielu zadań, np. w analizach statystycznych stanu gospodarki, do porównań benchmarkingowych procesów produkcyjnych, 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.

O ile implementacja klasycznych metod jest znana i praktykowana od dawna w okresowej ocenie gospodarki energetycznej, to wprowadzenie procedur bieżącej zarządzania energią wymaga modyfikacji tradycyjnych rozwiązań [1, 5]. Wskaźniki wyznaczone na podstawie pomiarów krótkookresowych charakteryzują się znaczną zmiennością. Procedury bieżącej zarządzania energią wymagają efektywnej metody pozwalającej wyznaczać wielkości porównawcze dla wskaźników krótkookresowych. Problem ten staje się istotny szczególnie w obiektach przemysłowych, w których występuje duże zróżnicowanie sposobów użytkowania nośników energii. W krajowej sytuacji, gdzie rozwój opomiarowania i centralnego gromadzenia danych o zużyciu jest słaby, wprowadzenie zaawansowanych technologii zarządzania energią napotyka na liczne bariery. Do najważniejszych zalicza się wysokie koszty rozważanych przedsięwzięć oraz niską świadomość służb energetycznych, wynikającą z braku przekonania o celowości tego typu działań. 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 z wykonywaną standardową analizą punktową.

Wyznaczane punktowo wartości wskaźników zagregowanych typu zużycie energii na jednostkę produktu uniemożliwiają bieżącą kontrolę procesu, ponieważ zawierają informacje obejmujące wszystkie etapy produkcji. W proponowanym podejściu zaleca się modyfikację dotychczasowych nawyków i skłonności zarządzających nośnikami energii. Zmiana polega na przystosowywaniu wyznaczonych wskaźników do rzeczywistej specyfiki procesu, a nie do przyzwyczajenia i intuicji.

Postęp technologii informatycznych w tym zakresie stwarza dogodne warunki do zmiany dotychczasowych praktyk analizy z dużym opóźnieniem czasowym na analizę procesu wykonywaną niemalże bezzwłocznie. Klasyczne metody statyczne zastępują się wprowadzaniem bieżących usprawnień eksploatacyjnych.

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 zbiorowości musi obejmować swoim zasięgiem badanie powiązań pomiędzy zmiennymi. Przeciwdziałanie nadmiernemu zużyciu energii elektrycznej nie może się ograniczać wyłącznie do obserwacji jej poziomu podczas zachodzących procesów. Określenie natury nośnika energetycznego powinno się wiązać 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 elektrycznej w funkcji produkcji wynika głównie z dostępności danych pomiarowych. Za takim podejściem przemawia również fakt, że rozpatrywane wielkości są mierzone w pożądanym odstępie czasu. Nie bez znaczenia jest zatem jednolitość oraz wiarygodność materiału statystycznego.

Tradycyjne działania związane z nadzorem zużycia nośników wewnątrz zakładu uzależnione są przede wszystkim od zakresu opomiarowania poboru nośników. Struktury komputerowych systemów zbierania danych w badanym zakładzie przemysłowym są bardzo różne. Różnice 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 czas pomiaru umożliwiające 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 wiązałoby się zatem z brakiem jednoczesności odczytu, a tym samym obarczałoby wyniki analizy bieżącej błędami ze względu na niejednoczesność pomiarów.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 133–138. When referring to the article please refer to the original text.

PL

	b_r [kWh/hl]	c_r [kWh/day]	R_r^2 [-]
TOTAL FOR BREWERY	2.5094	20,550.1	0.762
division into the Brewery's departments			
Raw Materials Warehouse	0.0674	68.9	0.691
Old Bottling Plant	0.0209	405.3	0.055
Water Treatment Station	0.0510	262.2	0.863
Administration	0.0360	513.6	0.252
UniTanks	0.0240	892.2	0.285
CO2 Plant	-0.1865	2,703.2	0.276
Filtration	0.1542	660.5	0.695
Compressed Air Plant	0.2509	893.6	0.873
Brewhouse	0.4476	316.0	0.858
Can Line	0.2096	1,987.2	0.324
Other unmetered	0.1516	4,378.1	0.178
Bottle Line	0.6559	1,149.0	0.644
Refrigeration machine room	0.4650	4,829.0	0.263

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

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

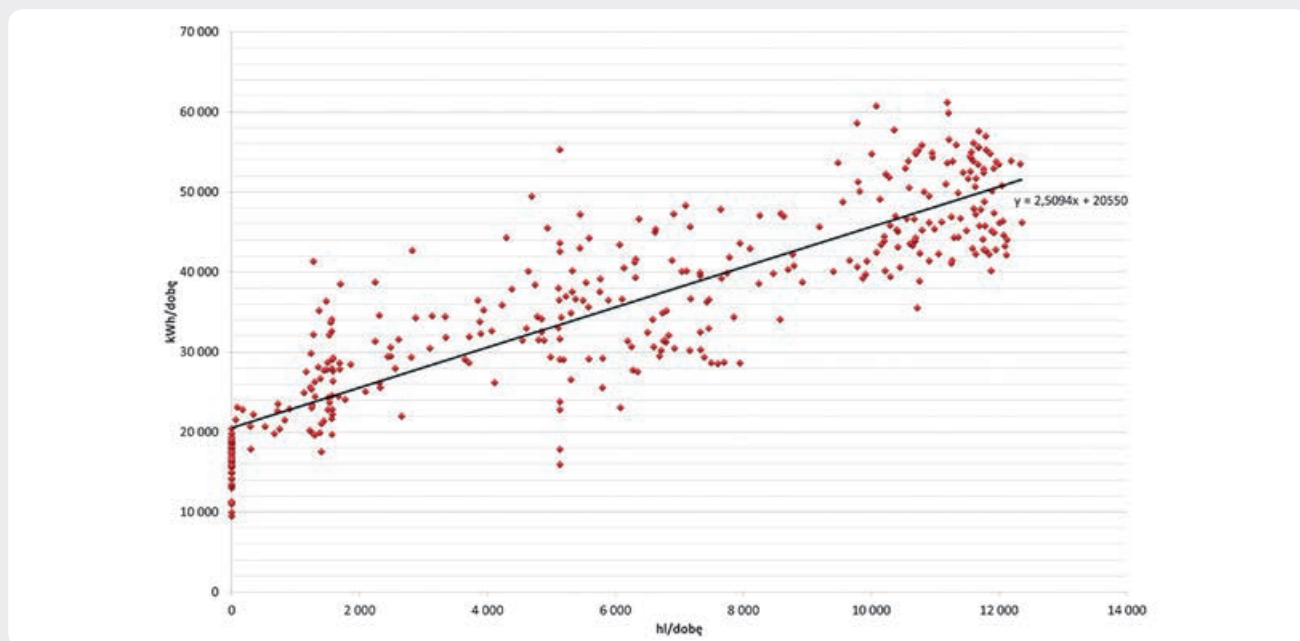
pomiarami wielkości produkcji oraz zużycia energii w wybranych odstępach czasu (np. na dobę), można w pierwszej kolejności przedstawić graficznie zależność pomiędzy zmiennymi w postaci wykresu rozproszenia. W analizie wykresów rozproszenia najbardziej istotna jest ocena ogólnego charakteru powiązań i 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 pomiarów uzyskanych w czasie normalnej eksploatacji, w pierwszej kolejności zostanie 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 będzie interpretowany 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.



Rys. 1. Zmienność roczna dobowego zużycia energii elektrycznej przez browar ogółem w funkcji dobowej produkcji piwa

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 133–138. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Stała „b”, nazywana współczynnikiem nachylenia prostej, informuje, ile energii elektrycznej należy zużyć, aby wyprodukować 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 wyznaczenia 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 odchyleń 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. Na potrzeby testowania wybrano zakład reprezentujący przemysł spożywczy. Badania modelowe przeprowadzono na przykładzie browaru należącego do koncernu zrzeszającego pięć browarów. Grupa zakładów piwowarskich osiąga łącznie ok. 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 tab. 1 parametry liniowych funkcji regresji dobowego zużycia energii przez

Miejsce pomiaru	Miara dopasowania	Odchylenie standardowe wskaźników dobowych w roku	Odchylenie standardowe reszt wg charakterystyk rocznych	Relacja odchylenia standardowego reszt do odchylenia standardowego
		[kWh/hl]	[kWh/hl]	[-]
BROWAR OGÓŁEM		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 ₂		4,577	1,534	0,335
Filtracja		0,551	0,353	0,642
Zakład sprężania powietrza		1,096	0,347	0,316
Warzelnia		0,645	0,361	0,560
Linia puszkki		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

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

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.

Wyznaczono współczynnik determinacji R_r^2 według zależności:

$$R_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^r (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^r (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

gdzie:

\hat{y}_i – i -ta wartość teoretyczna dobowego zużycia energii elektrycznej [kWh/dobę], y_i – i -ty pomiar dobowego zużycia energii elektrycznej [kWh/dobę], \bar{y} – wartość rocznej średniej arytmetycznej pomiarów dobowych zużycia energii elektrycznej [kWh/dobę], r – liczba pomiarów dobowych w roku.

Współczynnik determinacji wynoszący 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 m.in. w przypadku zakładu sprężonego powietrza 87,3%, stacji uzdatniania wody z wynikiem 86,3%, czy warzelni 85,8%. Odwrotne miary uzyskano np. w starej butelkowni, gdzie tylko 5,5% zużywanej energii wynika z produkcji piwa przez browar.

Na rys. 1 przedstawiono 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.

Zestawianie wyników regresji rocznej pomiarów dobowych do uzyskiwanych wskaźników statycznych na bieżąco może się okazać niewystarczająco dokładne. Wyznaczone odchyłki pomiędzy dobowymi wartościami mierzonymi w czasie rzeczywistym a wielkościami oczekiwanymi, wyznaczanymi z charakterystyk rocznych, pozabawione są wiadomości o sezonowości produkcji. Skutecznie przeprowadzana analiza zmienności dobowej wymaga rozszerzenia analizy rocznej o ocenę przebiegów miesięcznych.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 133–138. When referring to the article please refer to the original text.

PL

2.3. Miesięczna ocena wpływu dobowej produkcji piwa na dobowe zużycie energii elektrycznej przez browar

Celem rozważań jest stwierdzenie, czy zróżnicowanie charakterystyk dla poszczególnych miesięcy roku spowoduje poprawę jakości odwzorowania wartości dobowych. Zmienność energochłonności procesu w ciągu roku (zróżnicowanie wielkości miesięcznych) została wykazana w poprzednich rozważaniach.

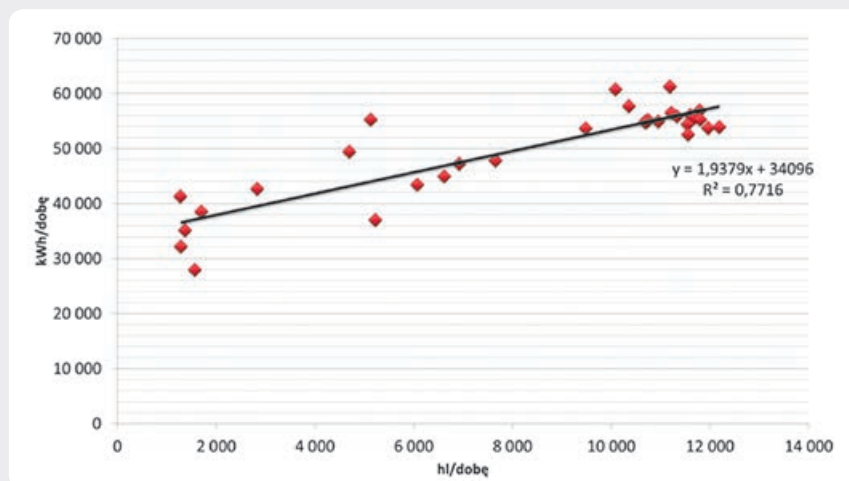
Rozwinięciem wdrażania procedur bieżącej kontroli na podstawie wyznaczonych tabelarycznie parametrów funkcji regresji jest ocena wizualna charakterystyk energetycznych w reprezentatywnych miesiącach roku (rys. 2).

Odniesienie monitorowanych dobowo pomiarów zużycia energii elektrycznej przez browar ogółem oraz dobowej produkcji piwa do wyznaczonych miesięcznie charakterystyk energetycznych powinno stanowić fundament realizowanej na bieżąco gospodarki energetycznej. Uwzględniając zróżnicowanie sposobów użytkowania energii, wynikających z charakteru procesu produkcyjnego, zaleca się jednak kontynuację rozważań o przyczynach odchyłań wartości mierzonych wobec oczekiwanych na poszczególne działy browaru.

3. Analiza porównawcza wskaźników wyznaczonych z charakterystyki energetycznej ze wskaźnikami rzeczywistymi

3.1. Dobór metody porównawczej

Przyjęto, że zmienność roczną zapotrzebowania na energię można przybliżyć charakterystycznymi wykresami zmienności dobowej produkcji piwa w funkcji dobowego



Rys. 2. Zmienność miesięczna dobowego zużycia energii elektrycznej przez browar ogółem w funkcji dobowej produkcji piwa (lipiec)

zużycia energii elektrycznej. Przez wykres charakterystyczny rozumie się przebieg wartości oczekiwanej zużycia energii elektrycznej, czyli najbardziej przybliżonej rzeczywistości. Opisane w rozdziale 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 za pomocą funkcji. Przeprowadzona na tym etapie badań weryfikacja użyteczności generowanych przebiegów będzie

się opierać 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 odchyłań.

Wyznaczone miary odchylenia pomiędzy wskaźnikami wyliczonymi z równania ekonometrycznego a wskaźnikami obliczonymi na podstawie realnych pomiarów dobowych są wyrażone 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 tab. 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 odchyłań średniokwadratowych w stosunku do standardowych. Poprawę wyników uzyskano we wszystkich rozpatrywanych działach.

3.3. Wyniki dopasowania funkcji miesięcznych

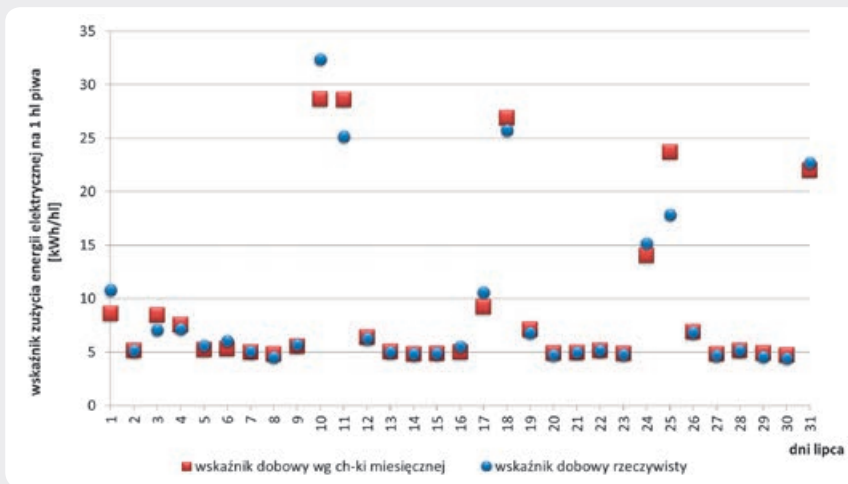
Zestawienie tabelaryczne odchyłek pomiędzy dobowymi wartościami wskaźników wyznaczonych według rzeczywistych pomiarów oraz zgodnie z charakterystykami miesięcznymi, stanowi potwierdzenie

Miara dopasowania	BROWAR OGÓŁEM		
	Odchylenie standardowe wskaźników dobowych w miesiącu	Odchylenie standardowe reszt wg charakterystyk miesięcznych	Relacja odchylenia standardowego reszt do odchylenia standardowego
	[kWh/hl]	[kWh/hl]	[-]
Nr miesiąca			
1	28,624	5,896	0,206
2	54,315	7,519	0,138
3	60,365	9,576	0,159
4	4,448	0,922	0,207
5	13,279	1,373	0,103
6	5,455	1,085	0,199
7	7,536	1,586	0,210
8	6,614	1,311	0,198
9	8,732	1,802	0,206
10	13,569	1,912	0,141
11	5,010	1,880	0,375
12	5,933	1,291	0,218

Tab. 3. Wyniki miar zmienności wskaźników dobowych w kolejnych miesiącach wyznaczonych na podstawie analizy klasycznej oraz charakterystyk miesięcznych dla browaru ogółem

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 133–138. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 3. Wykres wskaźników dobowych rzeczywistych oraz wyznaczonych za pomocą charakterystyki miesięcznej dla browaru ogółem w lipcu

zauważonych korzyści na przykładzie funkcji rocznych. Najbardziej wartościowe wydaje się jednak uszczegółowienie funkcji rocznej na miesięczne.

Rozpatrując przypadek browaru ogółem, należy zwrócić uwagę na wyniki zestawień w tab. 3, uzyskane kolejno w lutym, marcu, maju i październiku. Obliczane w tych miesiącach odchylenia standardowe sięgały 60,365 kWh/hl w marcu, 54,315 kWh/hl w lutym po 13,279 kWh/hl w maju. Wymienione największe wartości odchylenia wskaźników dobowych wokół ich średnich miesięcznych zostały zredukowane we wszystkich wymienionych przypadkach o ponad 80%. Obserwowane zmiany przyjętej w analizie miary odchyłki są zauważalne także w pozostałych miesiącach. Z punktu widzenia konieczności szacowania wskaźników na bieżąco to jednak poprawa

w najbardziej rozproszonych wskaźnikowo miesiącach jest najbardziej wskazana.

Potwierdzeniem dostrzeżonej powyżej przewagi metody określania wskaźników dobowych za pomocą wykresu miesięcznego są wykresy punktowe wskaźników zilustrowane na rys. 3. 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.

4. Podsumowanie

Zestawienie odchylenia standardowych wraz z odchyleniami średniokwadratowymi

wyraża miarę korzyści z zastosowania charakterystyk energetycznych. Świadczą o tym fakcie przede wszystkim wyniki w miesiącach, w których klasyczne odchylenia były na najwyższym poziomie.

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

Bibliografia

1. Bućko P., Zastosowanie regresji liniowej do analizy obciążeń cieplnych, *Rynek Energii* 2009, nr 5.
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. i in., 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.

Izabela Sadowska

dr inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: izabela.sadowska@pg.gda.pl

Absolwentka Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (2008). Obecnie wykładowczyni w Katedrze Elektroenergetyki swojej macierzystej uczelni. Prowadzi prace badawcze w obszarze efektywności energetycznej, a szczególnie energochłonności procesów gospodarczych. Dodatkowymi zainteresowaniami są finanse i bankowość.