

## Energy Consumption Analysis Methods in Industry

### Author

Izabela Sadowska

### Keywords

energetic economy, energy consumption, industry

### Abstract

This paper overviews applied methods to evaluate energy consumption in Industry. The most important law regulations are presented, which decide on the necessity to conduct an effective energetic economy. Basic assumptions are defined to calculate direct and cumulative energy consumption. The pros and cons of using each method are presented.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2014311

## 1. General information

The issue of efficient energy management is one of the essential enablers of the common European energy policy. In times of growing energy demand and the resulting increasing costs of its generation and consumption, an approach to rationalising consumption is a priority for a proper economic development. One of the prerequisites for a rational energy economy is a holistic approach, which considers economy as a whole, combined with a selective approach to every participant separately. Therefore discussions concerning energy efficiency improvements need to be carried out in parallel to political, technical and economic actions in order to verify that the adopted mechanisms are working correctly.

The European Union sees energy efficiency as one of the three strategic goals of its energy policy. Energy intensity of the Polish economy is now estimated to be twice that of the EU average (Fig. 1). Improvements in this respect are essential for the Polish economy. According to the findings of the European Commission presented in Directive 2006/32/EC on energy end-use efficiency and energy services [1], it has been unambiguously stated that: “there is a need for improved energy end-use efficiency...” [1]. Implementation of stipulations of this document is supposed to lead to:

- improved security of supply
- reduced primary energy consumption
- prevention of dangerous climate change

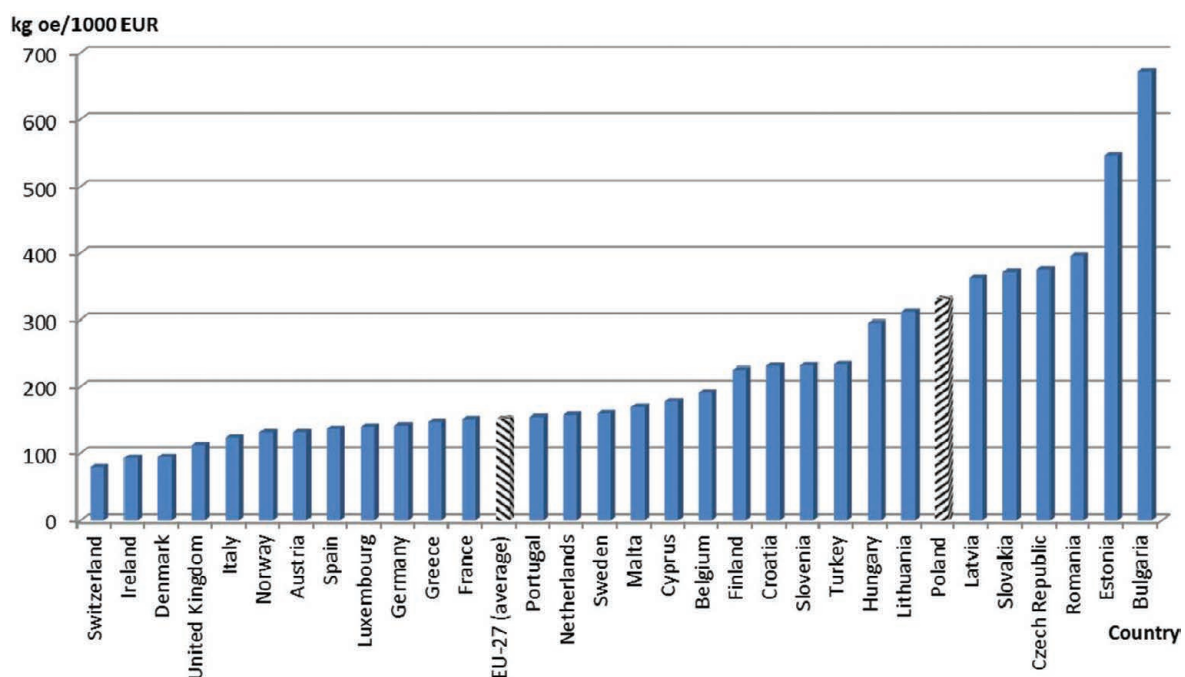


Fig. 1. Energy intensity of EU economies in 2010 expressed as a ratio of energy consumption to GDP, own work, data source: Eurostat

- d) exploiting potential energy savings in a cost-effective manner, thus reducing dependency on energy imports
- e) boost of innovativeness and competitiveness.

The adopted general goal of 9% energy savings for the ninth year of application of the Directive is to be reached by adopting improved technologies, and not by production curtailments. This stipulation is given in Article 3, item (c): “energy efficiency improvement”: an increase in energy end-use efficiency as a result of technological, behavioural and/or economic changes” [1]. Energy savings are defined as “an amount of saved energy determined by measuring and/or estimating consumption before and after implementation of one or more energy efficiency improvement measures...” [1]. The Directive commits member states to undertake practicable and expensive actions aimed at reaching stipulated goal.

European Union proposes also implementation of a new instrument supporting actions aimed at actual energy savings – so-called white certificates. White certificate scheme would involve providing financial support for holder of a document certifying that energy efficiency measures have been adopted. Ownership of such a certificate would lead to substantial financial benefits, with value equal to proven savings.

In response to the requirements of the Directive 2006/32/EC, in June 2007 Polish Ministry of Economy has developed a National Energy Efficiency Action Plan [2]. In line with Article 4 of the Directive, the Action Plan stipulates: “achieving indicative energy saving goal (...) of 9% in 2016” [2]. The Plan presents assumptions for its implementation, quantitative calculations of the national goal and – in section 3.3 – it contains a list of measures aimed at improving industrial energy efficiency. Description of specific energy efficiency measures contained in the section 3.3.2, subsection 3 clearly shows necessity to develop energy management systems and energy auditing schemes in the industry through:

- a) actions aimed at improving awareness and skills in the area of energy and equipment management
- b) development and promotion of free and easy-to-use energy management tools for industry, including tools for energy auditors and for benchmarking
- c) organising training courses, advisory services and experience exchange in the area of informing about potential of energy consumption reductions at industrial facilities.

Another legislative event was the publication of the “Energy Policy of Poland by 2030” on 10 November 2009 [3]. The document, presented for discussion on 10 September 2007, took into account requirements of valid EU regulations, and also formulated development directions for the Polish power industry. “Energy efficiency is given priority in the energy policy (...)” [3], and is one of its master targets. The efficiency issue is the subject of the whole of chapter 2 of this study, and already in the introduction the quantitative goal of “20% reduction in energy consumption by 2020 as compared to the *business as usual scenario*” is defined. The main energy policy objectives are defined as:

- a) “To achieve zero-energy economic growth, i.e. economic growth with no extra demand for primary energy
- b) Reducing the energy intensity of Polish economy to the EU-15 level” [3].

Measures enabling reaching these objectives should include increased efficiency of final energy utilisation and reduction of total cost by flattening the energy demand curve near the level of the maximum peak load. The Energy Policy mentions the introduction of systemic support mechanisms, determining energy intensity of power-consuming equipment, and supporting research and development of new energy-saving technologies.

## 2. Methods for analysing energy intensity of industry

### 2.1. Used methods General comments

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. Currently two main methods for specifying such indicators are used. According to the scope of research, direct and cumulative energy intensity indicators are used [4]. Evaluation of economic effects of pro-efficiency measures within a defined branch of industry involves indicators describing energy consumed directly by the analysed process. The influence of such measures on the whole economy requires converting direct energy into total energy consumption in the form of converted primary energy. This leads to determining cumulative energy consumption indicators. These indicators express total primary energy consumption by all elements of a process network needed to manufacture the investigated product. Primary energy is the energy obtained directly from natural resources. Primary energy resources may be renewable or non-renewable.

Renewable energy sources are characterised by repeatability of environmental processes. Renewable energy may originate from solar radiation, wind, biomass, geothermy or natural flow of water masses. Non-renewable resources like fossil minerals, natural gas or crude oil are only used once and their consumption considerably and adversely affects nature, causing environmental damage [5]. The total primary energy demand presented in Tab. 1 clearly shows a ratio between consumption of renewable and non-renewable energy, as well as a forecast of that ratio until 2030. The share of renewable energy in primary energy consumption is supposed to grow from 5% in 2006 to 12.4% in 2030. Forecasted primary energy demand by 2030 is 21% [6]. Presented values reveal a necessity to carry out multiple actions aimed at maximum savings of non-renewable energy resources. Tradable energy which is a result of energy conversion processes is known to its users as direct energy. This category includes electricity and heat purchased from a district heating system. In the case of converting primary energy into direct energy some inevitable losses occur. These are mainly related to heat losses due to this fact direct energy consumption is lower than that of primary energy.

	Unit	2006	2010	2015	2020	2025	2030
Lignite *)	Output	12.6	11.22	12.16	9.39	11.21	9.72
	mi Mg	59.4	52.8	57.2	44.2	52.7	45.7
Hard coal**)	Mtoe	43.8	37.9	35.3	34.6	34.0	36.7
	mi Mg	76.5	66.1	61.7	60.4	59.3	64.0
Crude oil and oil products	Mtoe	24.3	25.1	26.1	27.4	29.5	31.1
	mi Mg	24.3	25.1	26.1	27.4	29.5	31.1
Natural gas	Mtoe	12.3	12.0	13.0	14.5	16.1	17.2
	bcm	14.5	14.1	15.4	17.1	19.0	20.2
Renewable energy	Mtoe	5.0	6.3	8.4	12.2	13.8	14.7
Other fuels	Mtoe	0.7	0.7	0.9	1.1	1.4	1.6
Nuclear fuel	Mtoe	0.0	0	0	2.5	5.0	7.5
Electricity export	Mtoe	-0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PRIMARY ENERGY TOTAL	Mtoe	97.8	93.2	95.8	101.7	111.0	118.5

\*) – lignite LHV 8.9 MJ/kg

\*\*) – hard coal LHV 24 MJ/kg

\*\*\*) – natural gas LHV 35.5 MJ/m

Tab. 1. Demand for primary energy in specific carriers (Mtoe, natural units), source: [6]

Each method used for evaluating energy intensity, either direct or cumulative, uses a dual approach to presenting numerical data. Data describing energy expenditures, amount of consumed raw materials or amount of manufactured products may be expressed in a natural, physical form, i.e. in units of mass, volume etc. or in an economic way as a financial value – cost or price – expressed in currency units. The former approach analyses the technical process, the latter is based on economics [7].

Investigation of direct energy intensity involves evaluating specific products. Process analysis done in this way is most valuable directly for the manufacturer – an industrial facility. Results presented in production units clearly describe the condition of the production process as well as results of introduced improvements. They may also directly prove the advisability of process change or reveal a situation where immediate reaction is necessary. Evaluation of energy intensity in an entire branch of industry does not allow using units in their natural dimensions directly. A cumulative energy intensity analysis is used to evaluate economic results of production, as opposed to the technical aspects. Economic verification based on currency is considered to be universal and more practical in comparison to an analysis based on natural units. However, in the long-term forecasting variations in the value of money and general difficulties in price forecasting need to be taken into account.

In market economy conditions there is always some uncertainty about prices due to the nature of competitive markets. Of particular importance is the cost of procuring energy attributable to the cost of its environment-friendly and economically effective generation. Another important aspect in the context of competitive market development, is meeting the needs of the individual producer. Here the direct method again is superior to the cumulative one. Therefore the choice of used technique is dictated by the scope of analysis and its purpose. Due to the different

research methodology, at first specific energy consumption is evaluated in micro scale, and only then analysis shifts to macro scale – the whole economy.

## 2.2. Direct energy intensity

Analysis of specific energy intensity involves carrying out measurements and investigation of a structure of used energy carriers spent directly during production of a product or provision of a service. In other words, it is “the energy of energy carriers supplied directly to the technical process (...) minus the recovered energy” [7]. In a physical sense direct consumption should be understood as the final consumption of energy in the form in which it is supplied, with no further conversion into other carriers. This tool is used to specify energy intensity of a process and to evaluate the potential of efficiency improvements.

Direct energy intensity is usually expressed as a specific energy consumption indicator or direct energy intensity indicator. Comparative evaluation based on such values may be applied in a local scale [4]. Therefore using such parameters requires identifying a separate production train, specifying production volume and measuring energy used for that production. Thus it becomes necessary not only to investigate the main aspects of the equipment used, like technology type and operating patterns, but also additional information which may influence analysed values. Production methods, structure of process facilities, methods of supplying, using and converting energy may all significantly influence results. Another significant issue is the way in which waste energy is utilised and the time frame of the analysis.

Calculated energy intensity provides information which may be used to compare energy consumption in individual pieces of equipment and in entire analysed process trains. Analysis of direct energy intensity may describe an industrial facility on the level of:

- production unit – treated as a single piece of equipment or equipment sets which form an entire process unit
- process unit composed of one main piece of equipment and many auxiliaries
- manufacturing division – with one or more process units specialised in manufacturing similar products
- industrial facility – a whole plant understood as a sum of all manufacturing divisions along with auxiliary facilities and structures (social, administrative) [4].

The existence of such mutually dependent levels requires dividing indicator values according to the analysis focus. It seems necessary to divide specific indicators into process-wise, manufacturing-wise and plant-wise categories. A process-wise indicator refers to the analysis of energy consumption within a technical process carried out within a certain piece of equipment or set of equipment. A manufacturing-wise indicator includes also energy consumed in auxiliary devices which directly serve the technical process. The plant-wise indicator is calculated for an entire plant, taking into account energy consumed by all equipment, even if it is not directly related to the manufacturing process, like e.g. administrative room lighting [8]. Defining a reference level for the sake of comparison may enable using an

aspect of confrontation. This results from the existence of even minor differences which affect the course of analysed process. Using energy consumption indicators by comparing their values to those achieved by similar plants requires careful specification of values. It needs to be ascertained what an indicator really describes and to what level of conversion processes it refers. Investigating conditions and circumstances which might affect the value of the calculated indicator is therefore an essential criterion which enables using direct energy intensity technique. This in turn enables effective management by consciously influencing specific values, which leads to reduction of energy consumption within a given process.

Application of specific energy consumption indicators requires in particular:

- separating a production train
- determining production output
- and measuring energy consumed by the production train.

Energy consumption per product unit determined in this way is defined for specific technical and production conditions and refers to a certain reporting period. Final energy consumption in a technical process shall be understood as consumption of individual energy carriers which are not converted into other carriers, and consumption of energy supplied to the technical process with so-called media, e.g. compressed air, oxygen, nitrogen, industrial water [9]. Measurements of electricity used for production should be done in a way appropriate to the consumption conditions. Obtained readings of various measurement instruments enable creating balances of energy and analyses of energy flows and consumption within entire company. Measurements performed for specific groups of energy consuming equipment or process trains are used for determining specific energy consumption standards.

In order to determine specific direct fuel and energy consumption indicators, it is necessary to define key parameters which characterise the manufacturing process:

- characteristic of manufactured product – understood as its qualitative features, manufacturing method, measurement location and method, and measurement unit
- process train – including list of manufacturing equipment and operations directly involved in the process
- types, amounts and measurement units of energy carriers supplied to the manufacturing process
- methodology for calculating indicators
- methodology of calculating total energy consumption indicator.

The methodology of calculating specific electricity consumption is usually limited to

$$W^E = \frac{E_{sup} - E_{rec}}{P} \quad (1)$$

where:

$W^E$  – specific direct electricity consumption indicator [kWh/unit],  $E_{sup}$  – volume of electricity supplied to the technical process [kWh],  $E_{rec}$  – volume of electricity recovered within the process and consumed outside [kWh],  $P$  – quantity of product manufactured within the technical process [reference units].

Reference units commonly used to express the quantity of manufactured product are production units describing volume and mass. Units defined in the International System of Units limit the dimensions to internationally acknowledged cubic metres ( $m^3$ ), tonnes (metric tonne;  $1\ t = 10^3\ kg$ ), and in the case of describing energy carriers – joules ( $1\ J = 1\ N \cdot m$ ). Besides international units, also other units are used in analyses due to the tradition and history of a specific country. In the case of volume the most popular are cubic metres ( $m^3$ ), cubic decametres ( $dam^3 = 10^3\ m^3$ ), litres ( $l = 10^{-3}\ m^3$ ) and barrels ( $bbl = 0.159\ m^3$ ). Selected mass units are kilogram (kg), metric tonne ( $t = 10^3\ kg$ ), long tonne ( $lt = 1016\ kg$ ) and short ton ( $st = 907.2\ kg$ ). Common units of energy and power are joule ( $J = 1\ N \cdot m$ ), calorie ( $cal = 4.1868J$ ), tonne of equivalent fuel, equal to a tonne of hard coal with a lower heating value of seven thousand kilocalories per kilogram ( $tef = 29.3076 \cdot 10^9\ J$ ), tonne of oil equivalent, which expresses the equivalent of a metric tonne of crude oil with a lower heating value of ten thousand kilocalories per kilogram ( $toe = 41.868 \cdot 10^9\ J$ ), kilowatt-hour ( $kWh = 3.6 \cdot 10^6\ J$ ) and the British thermal unit ( $Btu = 1\ 055\ J$ ). Power values and energy flows are described with watts ( $W = 1J \cdot s^{-1}$ ,  $s$  – second) and megawatts ( $MW = 10^6\ W$ ) [9].

## 2.3. Cumulative energy intensity

### 2.3.1. Definition

The amount of energy necessary to manufacture a final product is not limited to energy consumed directly during production. The entire production process is a structure with various internal links which create a complex process network. Energy consumption is therefore related to the existence of many processes preceding the final result. The very concept of total energy calculation requires finding energy volumes consumed at all stages leading to the final result.

Cumulative energy intensity includes all energy needed to manufacture the product, starting with the energy consumed to produce energy carriers needed in the process of production, transport and energy conversion, to the energy consumed directly in the production process. Thus it represents all primary energy which is actually consumed within all processes.

As a result, calculation of cumulative energy intensity involves following energy flows:

- a) fuels and energy, i.e. acquisition of primary energy carriers, their conversion into secondary carriers and transmission to the manufacturing process
- b) raw materials, understood as a process of obtaining natural resources
- c) equipment and facilities, including manufacturing of machinery, devices and buildings which are parts of the manufacturing process train [9].

Fig. 2 describes only three basic levels of production processes. The first of them is acquisition of primary energy carriers and raw materials, the second is conversion of primary carriers into secondary ones and raw materials into commodities, and the final one is product manufacturing [11].



In free market economy conditions the two most popular methods for determining cumulative energy intensity have been used so far: process analysis and inter-branch flow method. Process analysis involves investigation of a series of consecutive process steps by accumulating energy consumed at each separated production phase. The analysis starts with direct energy consumption and then goes back, adding up all the energy expended on resource processing up to the resource acquisition. Thus it may be stated that this analysis method is directly related to the technology of the investigated production process. In the inter-branch flow method cumulative energy intensity consists of specific balances for each branch of industry. Assuming a certain division of national economy into branches means that economic exchange between mutually dependent sectors needs to be taken into account. This method leads to creating a system of simultaneous linear equations which represent balances of energy flows [9].

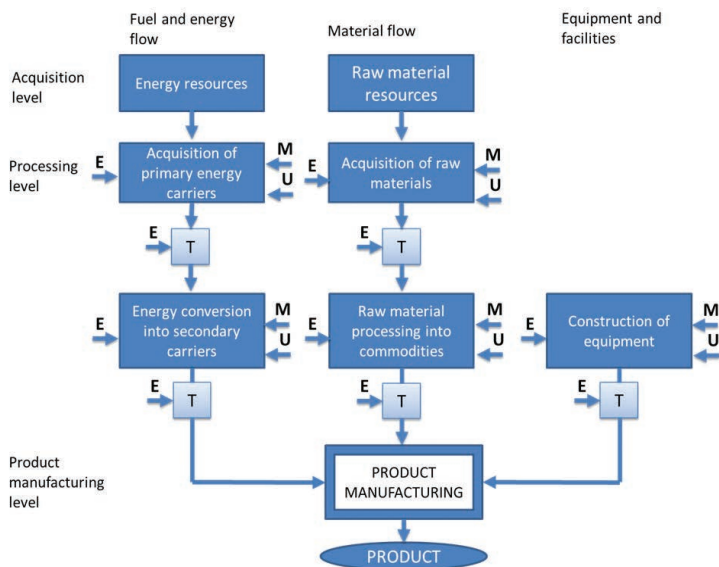


Fig. 2. Schematic diagram for cumulative energy intensity calculations: E – energy supplied directly, M, U – energy contained in different pieces of machinery and other equipment, T – transport, source: [4, 7]

### 2.3.2. Process analysis

The process analysis method is derived from the fundamentals of process energy intensity evaluation based on specific direct energy consumption indicators. It leads to calculating cumulative energy intensity indicators through three steps. The first step is reverse creation of a process network. It is represented with a schematic diagram, reflecting consecutive phases of the manufacturing process. The path is analysed from the first level – the finished product, to the last one – primary energy acquisition. The next step is filling the network with numerical data. The numerical balance is obtained by determining the output of the investigated product and consumption of individual components and energy necessary to complete the manufacturing process. The third step is converting all parameters to specific

values per product unit, which is necessary to add values from all levels of the network [7].

### 2.3.3. Inter-branch flow analysis

Application of the inter-branch flow analysis method enables finding economic interdependencies between defined branches, e.g. within the national economy. Implication of this method leads to using statistically created tables of inter-branch flows for the entire economy. Consumption of products of some branches by others expressed in currency enables formulating results in the form of obtained indicators, also expressed in currency units. Thanks to this procedure universal and easily understandable results are obtained for each branch of industry.

In this method calculations involve skilful utilisation of inter-branch flow tables. The tables, which contain identical numbers of rows and columns representing specific branches of economy, contain the value of production of the  $i$ -th branch transferred to the  $j$ -th branch presented at the intersection of  $i$ -th row and  $j$ -th column. An element at the intersection of the  $i$ -th row and  $i$ -th column (of the same number) contains the value of products of the  $i$ -th branch consumed within that very branch for processing purposes. To sum up, the sum of elements of the  $i$ -th row is equal to the values of products of the  $i$ -th branch consumed for the own needs of this branch and transferred to all other branches. Apart from branch designations, an inter-branch flow table contains values of global production for  $i$ -th branch  $W_i$  and final production  $W_{ik}$  placed in relevant rows. Final production is understood as the output of analysed sector after deducing demand from all other branches and own consumption of the sector in question. The global value of  $i$ -th production branch is done by summing up [7].

$$W_i = \sum_{j=1}^n v_j + W_k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

where:

$W_i$  – global value of production of  $i$ -th branch [currency units],  
 $v_{ij}$  – value of production of  $i$ -th branch transferred to the  $j$ -th branch [currency units],  
 $W_{ik}$  – value of final production of  $i$ -th branch [currency units],  
 $n$  – number of branches.

The cumulative value of energy in production within  $i$ -th branch is calculated by adding up cumulative values of energy for specific sectors:

$$W_i X_i = \sum_{j=1}^n v_j \cdot X_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

where:

$W_i X_i$  – cumulative value of energy in production of the  $i$ -th branch [currency units],  
 $X_j$  – unknown value of  $j$ -th branch's production [financial value of energy/financial value of  $j$ -th branch's products].

## 3. Conclusions

Identification of energy balances enables evaluating condition of energy economy. The necessity to use efficient management methods forces analysts to adopt appropriate analysis

techniques. The choice of technique mainly depends on the scope of analysis. Currently used energy efficiency analysis methods have multiple advantages and disadvantages which restrict their field of application. Utilisation of the methods involving calculation of direct energy intensity indicators in many cases have led to enacting standards mandatory for all manufacturers. By this step quantitative energy consumption was curbed. The industry aimed at maintaining its priorities, and did not differentiate between equipment with different wear and quality. Modern plants with high-efficiency equipment were rewarded. Thus it is necessary to enable industrial plants to correctly utilise direct energy intensity indicators by correct definition of the original condition and identification of effects obtained through energy-saving measures. In order to achieve this, industrial plants need to be equipped with appropriate measurement systems. In the author's opinion a decisive drawback, which currently blocks adopting cumulative energy intensity measurements, is technical progress. Automation systems and electronics widely used in the industry results in modification of processes on every analysed level, and thus does not allow utilising knowledge of cumulative energy intensity based on historical data. The author sees a possibility to resolve this issue by developing a concept for using energy intensity indicators for improving the efficiency of utilising energy carriers by the present verification of their values. Analysis made in this manner would become a tool enabling regular evaluation of the monitored industrial process. Evaluation of typical energy carrier variability based on historical data allows modelling consumption of those carriers within a certain future timeframe.

## REFERENCES

1. European Parliament and the Council of the European Union, Directive 2006/32/EC of the European Parliament and of the Council on energy end-use efficiency and energy services and repealing Council Directive 93/76/EEC.
2. Ministry of Economy of the Republic of Poland, National Action Plan for Energy Efficiency, Warsaw, June 2007.
3. Ministry of Economy, Energy Policy of Poland until 2030, draft, Warsaw, September 2007.
4. Charun H., Podstawy gospodarki energetycznej [*Fundamentals of Energy Management*], Koszalin University of Technology, Koszalin 2004.
5. Szargut J. et al Racjonalizacja użytkowania energii w zakładach przemysłowych. Poradnik audytora energetycznego [*Rationalisation of Energy Consumption at Industrial Facilities. Energy Auditor's Handbook*], Energy Conservation Foundation, Warsaw 1994.
6. Ministry of Economy, Projection of demand for fuels and energy until 2030, Warsaw, 10 November 2009.
7. Bibrowski Z., Energochłonność skumulowana [*Cumulative Energy Intensity*], Warsaw 1983.
8. Charun H., Podstawy gospodarki energetycznej [*Fundamentals of Energy Management*], Warsaw 1980.
9. Central Statistical Office, Methodical reporting principles concerning fuel and energy economy with definitions. Statistical Publishing Establishment, Warsaw 2006.

### Izabela Sadowska

Gdańsk University of Technology

e-mail: isadow@ely.pg.gda.pl

Graduate of the Faculty of Electrical and Control Engineering of Gdańsk University of Technology (2007). Currently a PhD student and academic teacher at the Chair of Electrical Power Engineering, GUT. Her research concerns energy efficiency, especially energy intensity of economic processes. Her additional areas of interest include finances and banking.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 123–128. When referring to the article please refer to the original text.

PL

## Metody analizy energochłonności w przemyśle

### Autor

Izabela Sadowska

### Słowa kluczowe

gospodarka energetyczna, energochłonność, przemysł

### Streszczenie

W artykule autorka zawarła przegląd metod do oceny energochłonności przemysłu. Przedstawiono najważniejsze regulacje prawne decydujące o konieczności prowadzenia efektywnej gospodarki energetycznej. Zdefiniowano podstawowe założenia do obliczeń energochłonności bezpośredniej i skumulowanej. Opisano wady i zalety wykorzystania każdej z metod.

### 1. Informacje ogólne

Jednym z podstawowych czynników umożliwiających budowanie wspólnej europejskiej polityki energetycznej staje się zagadnienie efektywnego gospodarowania energią. W okresie rosnącego zapotrzebowania na energię, a przez to rosnących kosztów wytwarzania i zużycia, podejście do racjonalizacji jej użytkowania staje się priorytetem poprawnego rozwoju gospodarczego. Warunkiem decydującym o prowadzeniu racjonalnej gospodarki energetycznej jest podejście całościowe, obejmujące obszar gospodarki jako całość, oraz jednostkowe, traktujące każdego uczestnika osobno. Rozważania obejmujące poprawę efektywności energetycznej należy zatem przeprowadzić równoległe do działań politycznych, technicznych i ekonomicznych, w celu weryfikacji poprawności funkcjonowania tych mechanizmów.

Unia Europejska traktuje zagadnienie energooszczędności jako jeden z trzech strategicznych celów w zakresie polityki energetycznej. Energochłonność polskiej gospodarki jest obecnie szacowana na dwa razy wyższym poziomie niż średnia w Unii Europejskiej (rys. 1). Gospodarka polska koniecznie wymaga poprawy tego stanu. Zgodnie z ustaleniami Komisji Europejskiej i Rady, zawartymi w Dyrektywie 2006/32/WE, w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych [1], jednoznacznie wskazano, że: „istnieje potrzeba poprawy efektywności wykorzystania energii przez użytkowników końcowych (...)” [1]. Realizacja założeń zawartych w przywołanym dokumencie ma doprowadzić do:

- poprawy zabezpieczenia niezawodności dostaw energii
- zmniejszenia zużycia energii pierwotnej
- zapobiegania niebezpiecznym zmianom klimatycznym
- wykorzystania potencjalnych oszczędności energii w sposób ekonomicznie efektywny, co miałyby doprowadzić do uniezależnienia od importu energii i konkurencyjności.

Ustalony cel ogólny, jakim jest oszczędność energii na poziomie 9% w dziewiątym roku stosowania dyrektywy, ma być osiągnięty poprzez zastosowanie lepszych technologii, a nie np. ograniczenia produkcji. Sformułowanie to zawarto w art. 3 p. c): „poprawa efektywności energetycznej: zwiększenie efektywności końcowego

wykorzystania energii dzięki zmianom technologicznym, gospodarczym lub zmianom zachowań” [1]. Oszczędność energii jest definiowana jako „ilość zaoszczędzonej energii ustalona poprzez pomiar oraz szacowanie zużycia przed i po wdrożeniu jednego lub kilku środków poprawy efektywności energetycznej (...)” [1]. Dyrektywa narzuca na państwa członkowskie konieczność podjęcia wykonalnych i kosztownych działań prowadzących do realizacji stawianego minimum.

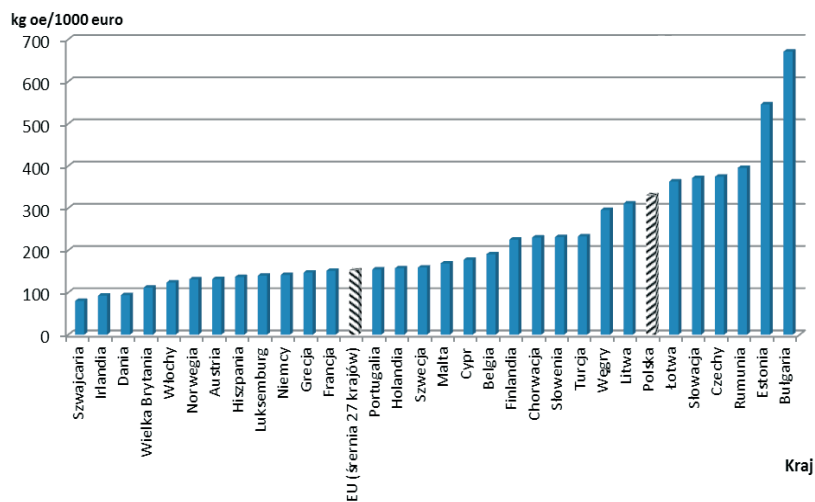
Unia Europejska wskazuje również na możliwość zastosowania nowego instrumentu wsparcia działań zmierzających do faktycznych oszczędności energetycznych, a mianowicie systemu tzw. białych certyfikatów. Mechanizm funkcjonowania białych certyfikatów miałby opierać się na uzyskiwaniu wsparcia finansowego poprzez wydawany certyfikat, świadczący o zastosowaniu środków poprawy efektywności energetycznej. Posiadanie takiego certyfikatu wiązałoby się z uzyskiwaniem wymiernych korzyści finansowych o równowartości wykazanych oszczędności.

W odpowiedzi na wymagania stawiane w Dyrektywie 2006/32/WE Ministerstwo Gospodarki opracowało w czerwcu 2007 roku Krajowy Plan Działań dotyczący efektywności energetycznej [2]. Zgodnie

z art. 4 ww. dyrektywy w dokumencie tym założono: „osiągnięcie celu indykatywnego oszczędności energii (...) 9% w roku 2016” [2]. Przedstawiono założenia do realizacji, obliczenia ilościowe krajowego celu, jak również zestawiono w punkcie 3.3 środki służące poprawie efektywności energetycznej w przemyśle. Opis poszczególnych środków poprawy efektywności energetycznej, zawarty w p. 3.3.2 pp. 3, wskazuje jednoznacznie na konieczność rozwijania systemu zarządzania energią i systemów audytów energetycznych w przemyśle poprzez m.in.:

- działania zwiększające świadomość i umiejętność zarządzania energią i urządzeniami
- rozwój i promocję bezpłatnych i łatwych narzędzi zarządzania energią przystosowanych dla przemysłu, w tym narzędzi dla audytorów energetycznych i benchmarkingu
- prowadzenie szkoleń, usług doradczych wymiany doświadczeń w zakresie informowania o możliwościach redukcji zużycia energii w zakładach przemysłowych.

Kolejnym wydarzeniem legislacyjnym było opublikowanie 10 listopada 2009 roku dokumentu „Polityka energetyczna Polski do 2030 roku” [3]. Dokument, poddany



Rys. 1. Energochłonność gospodarek krajów UE w 2010 roku, wyrażona jako stosunek zużycia energii do PKB, opracowanie własne, źródło: Eurostat

pod dyskusję 10 września 2007 roku, uwzględnia zarówno wymogi obowiązujących unijnych regulacji, jak również formułuje kierunki rozwoju polskiej elektroenergetyki. „Kwestia efektywności energetycznej jest traktowana w polityce energetycznej w sposób priorytetowy (...)” [3] i jest jednym z nadrzędnych celów jej realizacji. Zagadnieniu temu poświęcono cały drugi rozdział opracowania, wyznaczając już na wstępie cel ilościowy oszczędności „do roku 2020 (...) zmniejszenia zużycia energii o 20% w stosunku do scenariusza *business as usual*” [3]. Za cel główny polityki energetycznej uznano:

- a) „Dążenie do utrzymania zeroenergetycznego wzrostu gospodarczego, tj. rozwoju gospodarki następującego bez wzrostu zapotrzebowania na energię pierwotną
- b) Konsekwentne zmniejszenie energochłonności polskiej gospodarki do poziomu UE-15” [3].

Realizacja tych postanowień ma być osiągnięta, m.in. przez wzrost efektywności końcowego wykorzystania energii oraz zmniejszenie całkowitych kosztów za pomocą wyrównania zapotrzebowania do poziomu maksymalnych mocy w szczycie. W „Polityce energetycznej (...)” przywołuje się, m.in. wprowadzenie systemowego mechanizmu wsparcia, oznaczenie energochłonności urządzeń zużywających energię, wsparcie prac naukowo-badawczych w zakresie nowych technologii zmniejszających zużycie energii.

## 2. Metody analizy energochłonności w przemyśle

### 2.1. Stosowane metody. Uwagi ogólne

Zapewnienie zrównoważonego rozwoju gospodarczego kraju podyktowane jest prowadzeniem efektywnej gospodarki energetycznej. W obliczu rosnącego zapotrzebowania na energię ocena racjonalizacji jej użytkowania staje się niezbędną do spełnienia podstawowych celów. Oceny stanu gospodarki energetycznej powinno dokonywać się w ramach konkretnej branży przemysłu za pomocą określonego miernika. Wyznaczenie miernika zużycia energii umożliwia przeprowadzenie porównania energochłonności na danym poziomie zużycia. Stosowane są obecnie dwie podstawowe metody określania tych wskaźników. Ze względu na zakres badań wyróżnia się wskaźniki energochłonności bezpośredniej oraz wskaźniki energochłonności skumulowanej [4]. Ocena efektów ekonomicznych działań racjonalizujących w ramach zdefiniowanej gałęzi przemysłu odbywa się z wykorzystaniem wskaźników zużycia energii bezpośrednio zużywanego w analizowanym procesie. Wpływ powyższych działań na całość gospodarki dyktuje konieczność przeliczenia zużycia energii bezpośredniej na zużycie energii sumarycznej w postaci przetworzonej energii pierwotnej. Realizacja tego zagadnienia sprowadza się do wyznaczenia wskaźników skumulowanego zużycia energii. Wyrażają one zużycie energii pierwotnej ogółem we wszystkich ogniach sieci technologicznej służącej do wytworzenia rozpatrywanego wyrobu. Energia pierwotna to energia pozyskiwana bezpośrednio z zasobów naturalnych. Zasoby energii pierwotnej mają postać odnawialną lub nieodnawialną. Odnawialne źródła energii charakteryzują się naturalną

	Jedn.	2006	2010	2015	2020	2025	2030
Węgiel brunatny*)	Mtoe	12,6	11,22	12,16	9,39	11,21	9,72
	mIn ton	59,4	52,8	57,2	44,2	52,7	45,7
Węgiel kamienny**)	Mtoe	43,8	37,9	35,3	34,6	34,0	36,7
	mIn ton	76,5	66,1	61,7	60,4	59,3	64,0
Ropa i produkty naftowe	Mtoe	24,3	25,1	26,1	27,4	29,5	31,1
	mIn ton	24,3	25,1	26,1	27,4	29,5	31,1
Gaz ziemny***)	Mtoe mld m <sup>3</sup>	12,3 14,5	12,0 14,1	13,0 15,4	14,5 17,1	16,1 19,0	17,2 20,2
Energia odnawialna	Mtoe	5,0	6,3	8,4	12,2	13,8	14,7
Pozostałe paliwa	Mtoe	0,7	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6
Paliwo jądrowe	Mtoe	0,0	0	0	2,5	5,0	7,5
Eksport energii elektrycznej	Mtoe	-0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>RAZEM ENERGIA PIERWOTNA</b>	<b>Mtoe</b>	<b>97,8</b>	<b>93,2</b>	<b>95,8</b>	<b>101,7</b>	<b>111,0</b>	<b>118,5</b>

\*) wartość opałowa węgla brunatnego 8,9 MJ/kg

\*\*) wartość opałowa węgla kamiennego 24 MJ/kg

\*\*\*) wartość opałowa gazu ziemnego 35,5 MJ/m<sup>3</sup>

Tab. 1. Zapotrzebowanie na energię pierwotną w podziale na nośniki [Mtoe, jednostki naturalne], źródło: [6]

powtarzalnością procesów przyrodniczych. Energia odnawialna pochodzi m.in. z promieniowania słonecznego, wiatru, biomasy, geotermii czy przepływu naturalnego wód. Surowce nieodnawialne, takie jak paliwa kopalne, gazowe czy ropa naftowa, są przetwarzane tylko raz, a ich wykorzystanie w istotny sposób pogarsza stan przyrody, wywołując szkody ekologiczne [5]. Sumaryczne zapotrzebowanie na energię pierwotną, zestawione w tab. 1, jednoznacznie wskazuje na proporcje zużycia energii odnawialnej do nieodnawialnej oraz na prognozy zmian tych wielkości do 2030 roku. Udział energii odnawialnej w energii pierwotnej ma wzrosnąć z 5% w 2006 roku do 12,4% w 2030 roku. Prognozowany wzrost zapotrzebowania na energię pierwotną w 2030 roku, w odniesieniu do 2006 roku, jest na poziomie 21% [6]. Wyznaczone wielkości decydują w znacznym stopniu o konieczności przeprowadzania wielu działań, zmierzających do jak największych oszczędności nieodnawialnych zasobów energii.

Energia będąca wynikiem przemian energetycznych, stanowiąca przedmiot zakupu, posiadająca charakter użytkowy – przez odbiorców jest nazywana energią bezpośrednią. W jej obszar wchodzi m.in. energia elektryczna oraz ciepło kupowane z sieci ciepłowniczej. W wyniku przemian energii pierwotnej na energię bezpośrednią powstają nieuniknione straty, spowodowane głównie utratą ciepła, co decyduje o mniejszym zużyciu energii bezpośredniej od energii pierwotnej.

W każdej ze stosowanych metod oceny energochłonności, czy bezpośredniej, czy skumulowanej, używa się dwójakiego podejścia do przedstawienia danych liczbowych. Dane dotyczące nakładów energetycznych, ilości zużytych surowców lub ilości wykonanych produktów można wyrazić w postaci naturalnej, fizycznej, tj. w jednostkach energii, masy, objętości itp. albo w postaci wartościowej, ekonomicznej, ujętej w kategoriach kosztów lub ceny za pomocą jednostek pieniężnych. Pierwsze podejście jest

analizą procesu w kontekście technologicznym, natomiast drugie oznacza podejście ekonomiczne [7].

Rozpatrywanie energochłonności bezpośredniej odpowiada badaniu poszczególnych wyrobów. Wykonywana w ten sposób analiza technologiczna jest najbardziej interesująca bezpośrednio dla wytwórcy – zakładu przemysłowego. Przedstawiane wyniki w jednostkach produkcji jednoznacznie prezentują stan procesu produkcyjnego oraz wyniki zabiegów innowacyjnych. Mogą również bezpośrednio wskazywać na celowości zmiany technologii lub sytuację wymagającą natychmiastowej interwencji. Ocena energochłonności całej gałęzi przemysłu uniemożliwia posługiwanie się bezpośrednio jednostkami w wymiarze naturalnym. Wykorzystując analizę energochłonności skumulowanej, ocenia się skutki ekonomiczne wytwarzania, a nie techniczne warunki wytwarzania. Weryfikacja ekonomiczna w jednostkach pieniężnych jest uznawana za uniwersalną oraz bardziej praktyczną w porównaniu z jednostkami naturalnymi. W badaniach perspektywicznych należy jednak uwzględnić wartość pieniądza w czasie oraz trudności w przewidywaniu cen w ogóle.

W warunkach gospodarki rynkowej istnieje pewna niepewność cen, ze względu na konieczność budowania rynków konkurencyjnych. Szczególnie wielkie znaczenie ma koszt zakupu energii, podyktowany kosztami jej ekologicznego i efektywnie ekonomicznego wytworzenia. Odnosząc się do rozwoju konkurencyjnego rynku, ważnym aspektem pozostaje sprzeczność potrzebom indywidualnego wytwórcy, co dodatkowo wykazuje wyższość analizy bezpośredniej nad skumulowaną. Wybór dotyczący wykorzystywanego wymiaru jest zatem podyktowany zakresem analizy oraz sposobem jej użycia. Ze względu na różną metodykę badań w pierwszej kolejności wykonuje się oceny jednostkowego zużycia energii w skali mikro, następnie przechodząc do skali makro, czyli całej gospodarki.



## 2.2. Energochłonność bezpośrednia

Zastosowanie energochłonności jednostkowej wiąże się z przeprowadzeniem pomiarów i badań struktury zużywanych nośników energii, wydatkowanych bezpośrednio w procesie wytwarzania wyrobu lub realizacji usługi. Innymi słowy jest to „energia nośników energii doprowadzonych bezpośrednio do procesu technologicznego (...) pomniejszona o energię odzyskaną” [7]. W sensie fizycznym zużycie bezpośrednie należy rozumieć jako zużycie końcowe energii w takiej postaci, w jakiej została ona doprowadzona bez dalszej przemiany na inne nośniki energii. Narzędzie to służy do określania poziomu energochłonności procesu technologicznego oraz do oceny możliwości przeprowadzenia zabiegów racjonalizacyjnych.

Energochłonność jednostkowa wyrażona jest zazwyczaj w postaci wskaźnika jednostkowego bezpośredniego zużycia energii lub wskaźnika energochłonności bezpośredniej. Wykonywana na ich podstawie ocena porównawcza ma zastosowanie lokalne [4]. Użycie tych mierników wymaga zatem wyodrębnienia ciągu produkcyjnego, określenia wielkości produkcji wyrobu oraz pomiaru zużytej w tym ciągu energii. Należy zatem rozpatrzyć nie tylko główne aspekty badanych urządzeń typu zastosowana technologia, rodzaj i sposób pracy, ale również dodatkowe informacje decydujące o wyznaczanych wielkościach. To właśnie metody produkcji, budowa obiektu technologicznego, jak również sposoby zasilania, wykorzystania i przetwarzania energii mogą w znaczny sposób wpływać na analizowane wyniki. Nie bez znaczenia jest również sposób wykorzystania energii odpadowej i czas objęty rozważaniem.

Obliczany miernik daje informację zarówno do porównania efektów zużycia energii przez samodzielne urządzenia, jak i badane ciągi technologiczne. Analiza energochłonności bezpośredniej może odnosić się do zakładu przemysłowego w ujęciu:

- agregatu produkcyjnego – traktowanego jako pojedyncze urządzenie lub zespół urządzeń stanowiących całość pod względem technologicznym
- zespołu technologicznego – stanowiącego jeden agregat główny i wiele agregatów pomocniczych
- wydziału produkcyjnego – obejmującego jeden lub więcej zespołów technologicznych specjalizujących się w wytwarzaniu produktów podobnych
- zakładu przemysłowego – czyli całości pojmowanej jako suma wszystkich wydziałów produkcyjnych wraz z urządzeniami i obiektami pomocniczymi typu socjalne czy administracja [4].

Istnienie zależnych od siebie poziomów prowadzi do konieczności podziału wskaźników w zależności od miejsca ich rozważania. Niezbędny wydaje się podział wskaźników jednostkowych na technologiczne, produkcyjne i zakładowe. Wskaźnik technologiczny odnosi się do analizy zużycia energii w samym procesie technologicznym, realizowanym w określonym agregacie lub zespole urządzeń. Wskaźnik produkcyjny określa obok technologicznego również energię zużyta w urządzeniach pomocniczych, służących bezpośrednio procesowi technologicznemu. Indeks zakładowy wyznaczany jest dla całej jednostki,

uwzględniając energię zużywaną przez wszystkie urządzenia, nawet te niezwiązane bezpośrednio z produkcją, takie jak np. oświetlenie pomieszczeń administracyjnych [8]. Zdefiniowanie poziomu odniesienia, wykonane w celu porównawczym, może w konsekwencji uniemożliwić zastosowanie aspektu konfrontacji. Fakt ten wynika z istnienia nawet niewielkich różnic wpływających na przebieg analizowanego procesu. Korzystanie ze wskaźników zużycia energii poprzez zestawienie ich wartości do osiągniętych w podobnych zakładach wymaga ścisłego doprecyzowania. Należy zdefiniować, co dany wskaźnik oznacza oraz do jakiego poziomu przemian się odnosi. Rozpatrywanie warunków i okoliczności oddziałujących na wielkość wyznaczonego wskaźnika jest zatem podstawowym kryterium umożliwiającym zastosowanie energochłonności bezpośredniej. Dzięki temu możliwe jest efektywne zarządzanie poprzez świadome kształtowanie wyznaczanych wartości, co w następstwie prowadzi do zmniejszenia zużycia energii w danym procesie.

Stosowanie wskaźników jednostkowego bezpośredniego zużycia energii wymaga w szczególności:

- wyodrębnienia ciągu produkcyjnego
- określenia wielkości produkcji wyrobu
- pomiaru zużytej w tym ciągu energii.

Określona w ten sposób wielkość zużycia energii na jednostkę odniesienia jest zdefiniowana dla ściśle sprecyzowanych warunków techniczno-produkcyjnych oraz odnosi się do ustalonego okresu sprawozdawczego. Końcowe zużycie energii w procesie technologicznym rozumiane jest jako zużycie poszczególnych nośników energii niepodlegających dalszemu przetwarzaniu oraz zużycie energii doprowadzonej do procesu technologicznego za pośrednictwem tzw. mediów, czyli m.in. sprężonego powietrza, tlenu, azotu, wody przemysłowej [9]. Pomiar zużycia energii elektrycznej do produkcji powinien odpowiadać warunkom jej użytkowania. Na podstawie otrzymanych wskazań różnorodnych urządzeń pomiarowych możliwe jest przygotowywanie bilansów energii, przepływu i zużycia tej energii w obrębie całego przedsiębiorstwa. Pomiary wykonane dla poszczególnych grup urządzeń energetycznych lub ciągów technologicznych dotyczą wyznaczanych norm jednostkowego zużycia.

W celu określenia wskaźników jednostkowego bezpośredniego zużycia paliw i energii należy zdefiniować podstawowe parametry charakteryzujące proces produkcyjny:

- charakterystykę wytwarzanego produktu – rozumianą jako cechy jakościowe, metodę produkcji, sposób i miejsce pomiaru oraz jednostkę miary
  - ciąg technologiczny – obejmujący wyszczególnienie zespołu urządzeń i operacji produkcyjnych uczestniczących bezpośrednio w wytwarzaniu produkcji
  - rodzaje, ilość i jednostki miary nośników energii dostarczanych w trakcie produkcji
  - sposób obliczania wskaźników
  - sposób obliczania wskaźnika sumarycznego wyrażającego łączne zużycie energii.
- Sposób obliczania wskaźnika jednostkowego zużycia energii elektrycznej ogranicza się zazwyczaj do zestawienia średniego zużycia energii na jednostkę odniesienia.

$$W^E = \frac{E_{dost} - E_{odz}}{P} \quad (1)$$

gdzie:  $W^E$  – wskaźnik jednostkowego bezpośredniego zużycia energii elektrycznej [kWh/jednostkę odniesienia],  $E_{dost}$  – ilość energii elektrycznej dostarczona do procesu technologicznego [kWh],  $E_{odz}$  – ilość energii elektrycznej odzyskana w procesie i wykorzystana poza nim [kWh],  $P$  – ilość produktu wytworzonego w procesie technologicznym [jednostki odniesienia].

Powszechnie stosowanymi jednostkami odniesienia do wyrażenia ilości wytworzonego produktu są jednostki produkcyjne oraz jednostki, które określają objętość i masę. Zdefiniowane miary w Międzynarodowym Układzie Jednostek Miar ograniczają wymiary do uznawanych w obrocie międzynarodowym metrów sześciennych ( $m^3$ ), ton (tona metryczna;  $1 t = 10^3 kg$ ), a w przypadku wyrażenia energii nośnika dżul ( $1 J = 1 N \cdot m$ ). Oprócz jednostek międzynarodowych w analizach przyjmuje się inne jednostki uwarunkowane tradycją i historią danego kraju. Dla jednostek objętości zazwyczaj spotykane są metry sześcienne ( $m^3$ ), dekametry sześcienne ( $dam^3 = 10^3 m^3$ ), litry ( $l = 10^{-3} m^3$ ) oraz baryłki ( $bbf = 0,159 m^3$ ). Wybrane jednostki masy to: kilogram (kg), tona ( $t = 10^3 kg$ ), long tona (tona ang.:  $lt = 1016 kg$ ) oraz short tona (tona USA:  $st = 907,2 kg$ ). Stosowane powszechnie jednostki pracy i energii to dżul ( $J = 1 N \cdot m$ ), kaloria ( $cal = 4,1868 J$ ), tona paliwa umownego, czyli równoważnik jednej tony węgla kamiennego o wartości opałowej równej siedmiu tysiącom kilokalorii na jeden kilogram ( $tpu = 29,3076 \cdot 10^9 J$ ), tona oleju ekwiwalentnego wyrażająca jedną metryczną tonę ropy naftowej o wartości opałowej równej dziesięciu tysiącom kilokalorii na kilogram ( $toe = 41,868 \cdot 10^9 J$ ), kilowatogodzina ( $kWh = 3,6 \cdot 10^6 J$ ) oraz brytyjska jednostka ciepła ( $Btu = 1 055 J$ ). W celu zdefiniowania mocy i strumieni energii używa się watów ( $W = 1 J \cdot s^{-1}$ ,  $s$  – sekunda) oraz megawatów ( $MW = 10^6 W$ ) [9].

## 2.3. Energochłonność skumulowana

### 2.3.1. Definicja

Ilość energii niezbędnej do wykonania ostatecznego produktu jest uzależniona nie tylko od tej zużytej bezpośrednio podczas produkcji. Cały proces produkcyjny jest wzajemnie powiązaną strukturą, która przez to tworzy skomplikowaną sieć technologiczną. Zużycie energii jest zatem związane z istnieniem wielu procesów poprzedzających efekt końcowy. Istota wyznaczenia całkowitej energii oznacza konieczność określenia ilości energii na wszystkich szczeblach prowadzących do ostatecznego rezultatu.

Energochłonność skumulowana obejmuje całą energię, jaka jest potrzebna do wytworzenia produktu, począwszy od energii pozyskania nośników zużywanych w procesie produkcji, transportie i przetworzeniu tych nośników, skończywszy na energii użytej bezpośrednio w procesie produkcyjnym. Przedstawia zatem całkowitą ilość energii pierwotnej, która została rzeczywiście zużyta we wszystkich procesach. W efekcie do obliczenia energochłonności skumulowanej są uwzględniane następujące strumienie energii:

- a) paliw i energii, czyli procesów pozyskania pierwotnych nośników energii, przetworzenia ich na nośniki wtórne i przesłania ich do procesu wytwarzania
- b) surowców i materiałów, rozumiany jako proces pozyskania surowców naturalnych
- c) urządzeń i obiektów, do którego zaliczane są procesy budowy maszyn, urządzeń oraz budynków, składających się na obiekty ciągu technologicznego procesu wytwarzania [9].

Rys. 2 uwzględni tylko trzy podstawowe poziomy procesów produkcyjnych. Pierwszy to pozyskanie pierwotnych nośników energii i surowców, kolejny to przetworzenie nośników pierwotnych na wtórne oraz surowców na materiały oraz ostatni – wytwarzanie produktu [11].

W warunkach gospodarki wolnorynkowej stosowano dotychczas dwie najpopularniejsze metody określania energochłonności skumulowanej, mianowicie – metodę analizy procesu oraz przepływów międzygałęziowych. Analiza procesu rozpatruje ciąg kolejnych operacji technologicznych poprzez kumulowanie energii zużywanej na każdym z wyodrębnionych etapów produkcji. Zagadnienie to rozpoczyna się od nakładów bezpośrednich, cofając się do sumowania energii zużywanej na przetwarzanie surowców, a kończąc na samym ich pozyskaniu. Należy zatem przyjąć, że jest to sposób analizy bezpośrednio związany z samą technologią rozpatrywanego procesu produkcyjnego. Metoda przepływów międzygałęziowych ujmuje energochłonność skumulowaną jako bilanse działalności każdej gałęzi przemysłu. Przyjęcie pewnego podziału gospodarki krajowej na gałęzie oznacza rozważanie wymiany gospodarczej między zależnymi od siebie sektorami. Ten określony sposób prowadzi do utworzenia układu równań liniowych przedstawiających bilanse rozprawy nakładów energetycznych [9].

### 2.3.2. Analiza procesu

Metoda analizy procesu wywodzi się z podstaw oceny energochłonności procesu, opartych na wskaźnikach jednostkowego zużycia energii bezpośredniej. Prowadzi ona do obliczenia wskaźników energochłonności skumulowanej przy użyciu trzech etapów. Pierwszy z nich to tworzenie wstecz siatki technologicznej. Jest ona reprezentowana za pomocą schematu ideowego, odwzorowującego kolejne fazy powstawania produktu. Rozpatruje się drogę od poziomu pierwszego, czyli produktu gotowego, do poziomu ostatniego, czyli pozyskania energii pierwotnej. Kolejna czynność to wypełnianie siatki technologicznej danymi liczbowymi. Zestawienie liczbowe uzyskuje się, określając ilość produkcji rozpatrywanego wyrobu oraz zużycia kolejnych składników i niezbędnej do ich produkcji energii. Trzeci krok to przeliczenie wszystkich wartości na jednostkę badanego wyrobu, co jest niezbędne do sumowania po wszystkich poziomach wyznaczonej siatki [7].

### 2.3.3. Analiza przepływów międzygałęziowych

Stosowanie podejścia od strony przepływów międzygałęziowych oznacza możliwość powiązania ekonomicznego pomiędzy zdefiniowanymi branżami, np. całej gospodarki państwa. Implikacja tej metody prowadzi do wykorzystania sporządzanych statystycznie dla gospodarki tablic przepływów międzygałęziowych. Wyrażone pieniądze zużycie produkcji jednych branż przez inne zmierza do formułowania wyników w postaci uzyskanych wskaźników, również w jednostkach pieniężnych. Dzięki tej procedurze otrzymuje się uniwersalne oraz czytelne dla każdej gałęzi przemysłu wyniki. Obliczenia z wykorzystaniem tej metody polegają na umiejętnym posługiwaniu się tablicami przepływów międzygałęziowych. Tablice, zawierające jednakową ilość wierszy i kolumn, którym odpowiadają

kolejne branże gospodarki, mają na przecięciu *i*-tego wiersza i *j*-tej kolumny wartości produkcji *i*-tej gałęzi, przekazywanej dalej do gałęzi *j*-tej. Element wiersza *i*-tego na przecięciu z równoimienną *i*-tą kolumną zawiera wartość wyrobów *i*-tej branży zużytej wewnątrz niej samej do celów przetwórczych. Reasumując, suma elementów *i*-tego wiersza odpowiada wartości wyrobów *i*-tej branży, zużywanych na potrzeby własne branży oraz przekazywanych wszystkim innym branżom. Tablica przepływów gałęziowych zawiera, oprócz oznaczeń branż, umieszczone w odpowiednich wierszach wartości produkcji globalnej branży *i*-tej, oznaczonej jako  $W_i$ , oraz produkcji końcowej  $W_{ik}$ . Produkcja końcowa oznacza wyroby analizowanego sektora pozostające po pokryciu zapotrzebowania innych branż oraz potrzeb własnych. Wyznaczenie wartości globalnej *i*-tej produkcji sprowadza się do sumowania [7]:

$$W_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} + W_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

gdzie:  $W_i$  – wartość globalna produkcji *i*-tej branży [jednostki pieniężne],  $v_{ij}$  – wartość produkcji branży *i*-tej przekazana branży *j*-tej [jednostki pieniężne],  $W_{ik}$  – wartość produkcji końcowej branży *i*-tej [jednostki pieniężne], *n* – ilość branż.

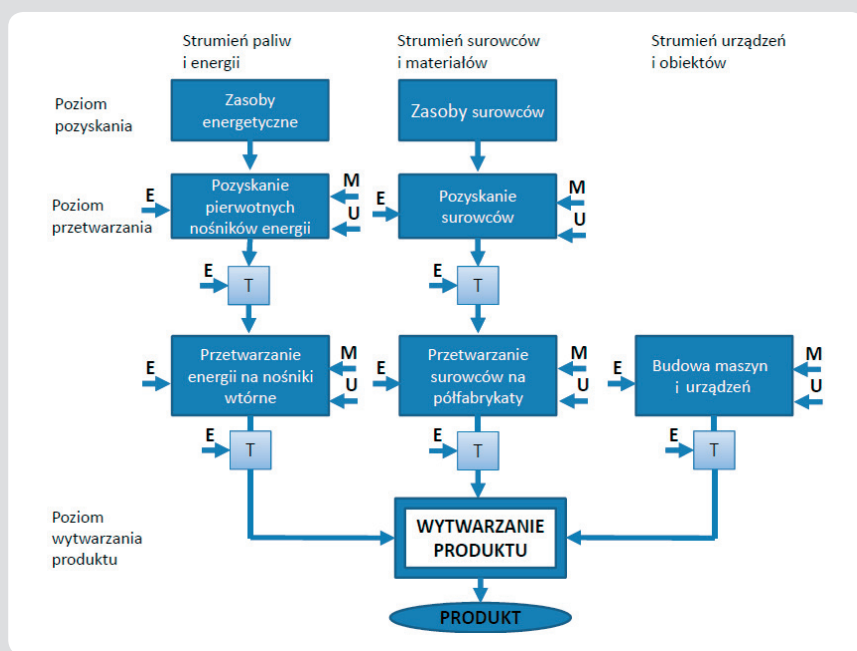
Skumulowana wartość energii w produkcji *i*-tej branży oblicza się, sumując wartości skumulowanych energii obciążających dane sektory:

$$W_i X_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot X_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

gdzie:  $W_i X_i$  – skumulowana wartość energii w produkcji *i*-tej branży [jednostki pieniężne],  $X_j$  – nieznaną wartość produkcji branży *j*-tej [wartość pieniężna energii/wartość pieniężna wyrobów *j*-tej branży].

### 3. Podsumowanie

Zestawienie bilansów energetycznych pozwala na ocenę stanu gospodarki energetycznej. Konieczność prowadzenia jej efektywnego zarządzania wymusza na analitykach przyjęcie odpowiedniej metody analizy. Wybór jest uzależniony głównie od zasięgu, jakim będzie objęta ocena. Stosowane obecnie analizy energochłonności mają wiele wad i zalet, co ogranicza ich możliwości zastosowania. Posługiwanie się metodą wyznaczania wskaźników energochłonności bezpośredniej prowadziło w wielu przypadkach do wyznaczenia obowiązujących wszystkich producentów norm. Poprzez ten zabieg doprowadzono do ograniczenia kontroli ilościowego zużycia energii. Przemysł dążył do zachowania stawianych priorytetów, nie różnicując stopnia zużycia i jakości wyposażenia w urządzenia energetyczne. Premiowano zakłady nowoczesne, posiadające wysokosprawne urządzenia. Należy zatem umożliwić zakładom poprawne wykorzystanie energochłonności bezpośredniej, przez odpowiednie zdefiniowanie stanu pierwotnego oraz efektów osiągniętych za pomocą działań oszczędnościowych. Żeby to zastosować, należy między innymi wyposażać zakłady w rozbudowane systemy pomiarowe.



Rys. 2. Schemat ideowy do obliczeń energochłonności skumulowanej: E – energia dostarczona bezpośrednio, M, U – energia zawarta w użytych maszynach i urządzeniach, T – transport, źródło: [4, 7]

Decydującą wadą, uniemożliwiającą obecnie implementację energochłonności skumulowanej, jest zdaniem autorki progres w obszarze postępu technicznego. Szeroko stosowana w przemyśle automatyka i elektronika doprowadziła do zmian procesów na każdym analizowanym poziomie i przez to uniemożliwia wykorzystanie wyznaczonych historycznie wartości wskaźników energochłonności akumulowanej. Autorka dostrzega rozwiązanie tej sytuacji w opracowaniu koncepcji wykorzystania wskaźników energochłonności do poprawy efektywności zużycia nośników energii poprzez bieżącą weryfikację ich wartości. Wykonywana w ten sposób analiza wskaźnikowa będzie narzędziem umożliwiającym systematyczną ocenę badanego procesu produkcyjnego. Ocena typowych zmienności nośników energii na podstawie danych historycznych umożliwia przeprowadzenie

badania modelowych zużycia tych nośników w określonych przedziałach czasu w przyszłości.

#### Bibliografia

1. Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej, Dyrektywa 2006/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z 5 kwietnia 2006 roku w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych oraz uchylająca Dyrektywę Rady 93/76/EWG.
2. Ministerstwo Gospodarki, Krajowy Plan Działań dotyczący efektywności energetycznej, Warszawa, czerwiec 2007.
3. Ministerstwo Gospodarki, Polityka energetyczna Polski do 2003 roku, projekt, Warszawa wrzesień 2007.
4. Charun H., Podstawy gospodarki energetycznej, Politechnika Koszalińska, Koszalin 2004.
5. Szargut J. i in., Racjonalizacja użytkowania energii w zakładach przemysłowych, Poradnik audytora energetycznego, Fundacja Poszanowania Energii, Warszawa 1994.
6. Ministerstwo Gospodarki, Prognoza zapotrzebowania na paliwa i energię do 2030 roku, Warszawa, 10 listopada 2009.
7. Bibrowski Z., Energochłonność skumulowana, Warszawa 1983.
8. Mejro C., Podstawy gospodarki energetycznej, Warszawa 1980.
9. Główny Urząd Statystyczny, Zasady metodyczne sprawozdawczości z zakresu gospodarki paliwami i energią oraz definicje stosowanych pojęć, Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa 2006.

#### Izabela Sadowska

mgr inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: isadow@ely.pg.gda.pl

Absolwentka Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (2007). Obecnie doktorantka oraz wykładowczyni w Katedrze Elektroenergetyki PG. Prowadzi prace badawcze w obszarze efektywności energetycznej, a szczególnie energochłonności procesów gospodarczych. Dodatkowymi zainteresowaniami są finanse i bankowość.