

Konrad ISKRZYCKI*, Wojciech SUWAŁA**, Przemysław KASZYŃSKI***

Dekompozycja redukcji emisji dwutlenku siarki w polskich elektrowniach, 1995–2008¹

STRESZCZENIE. Celem niniejszego artykułu jest określenie jakie czynniki wpływają na zmianę emisji końcowej SO₂ w elektrowniach w latach 1995–2008. Aby to osiągnąć utworzono model dekompozycyjny, wyszczególniający wielkości kształtujące emisję. Model zakłada zależność między czynnikami: procesowym, paliwowym, sprawności oraz popytu. Dzięki przedstawionym metodom możliwe było określenie efektów pochodzących od wymienionych czynników. Uzyskane wyniki wskazują, iż największy wpływ na zmianę emisji końcowej SO₂ miały dwa pierwsze efekty: procesowy i paliwowy. Natomiast efekt sprawności oraz popytu nie wpłynął znacząco na wynik końcowy. Dwie z trzech zastosowanych metod dają porównywalne wyniki, zaś metoda dekompozycji niedoskonałej charakteryzuje się nieco zawyżonymi wartościami.

SŁOWA KLUCZOWE: dekompozycja, redukcja emisji, dwutlenek siarki

Wprowadzenie

Elektroenergetyka polska przeszła w ostatnich kilkunastu latach istotne zmiany, zwłaszcza w zakresie ochrony środowiska. Wprowadzone na początku lat dziewięćdziesiątych

* Mgr inż., ** Dr hab. inż. Prof. AGH — Wydz. Energetyki i Paliw AGH, Kraków.

*** Mgr inż. — Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

¹ Artykuł został oparty na pracy dyplomowej magisterskiej K. Iskrzyckiego, Wydz. Energetyki i Paliw AGH.

regulacje znacząco obniżyły dopuszczalne poziomy emisji. Elektrownie podjęły szereg działań na rzecz obniżenia emisji, nie tylko bezpośrednich, takich jak instalacje redukcji, ale pośrednich, bo wzrost sprawności wytwarzania również przyczynia się do zmniejszenia emisji.

Najbardziej znaczące były działania w zakresie redukcji emisji dwutlenku siarki. Były one efektem budowy instalacji odsiarczania, poprawy jakości paliw i wzrostu sprawności wytwarzania. Ich łączny efekt można ocenić na podstawie porównania poziomu emisji w poszczególnych latach. Interesująca jest jednak ocena skali redukcji przez wymienione procesy. W artykule podjęto to zadanie wykorzystując metodę dekompozycji.

1. Trendy w zużyciu paliw i emisji SO₂ w elektrowniach

Na przełomie kilkunastu ostatnich lat Polska doświadczyła wielu przemian polityczno-gospodarczych, co w znacznym stopniu kształtowało wielkość zużycia paliw i emisję SO₂. Zmiana systemu gospodarczego pociągnęła za sobą dążenia mające na celu dostosowanie gospodarki kraju do odpowiednich wymogów emisyjnych Unii Europejskiej. To z kolei miało wpływ na rozwój sektora przemysłowego, handlowo-usługowego i napływ inwestorów. Trwało to jednak kilka lat i wyraźny efekt wzrostu zużycia paliw nastąpił dopiero po wejściu Polski do Unii Europejskiej. Dostosowując technologię do wyższych standardów wprowadzano elektrofiltre, instalacje odsiarczania oraz urządzenia o wyższej sprawności, aby sprostać wymogom dotyczącym emisji SO₂ i wywiązać się z ustaleń zawartych w dyrektywach redukcji szkodliwych substancji do powietrza atmosferycznego [3]. Przyjęte zobowiązania to nie jedyny czynnik decydujący o obniżeniu emisji gazów cieplarnianych, duży wpływ ma tutaj również aspekt społecznej świadomości, dotyczącej degradacji środowiska przyrodniczego i dbałość o losy przyszłych pokoleń. Wszystkie te zagadnienia są ściśle ze sobą powiązane i stanowią ważny temat badań ekonomicznych oraz energetycznych. Aby uzyskać jaśniejszy obraz zmian zachodzących w tych dziedzinach, należy lepiej przyjrzeć się odpowiednim wskaźnikom informującym m.in. o energochłonności, czy efektywności energetycznej. Efektywność energetyczną można zdefiniować jako wielkość zużycia energii odniesionej do uzyskiwanej wielkości efektu użytkowego. Stanowi ona główne źródło efektów ekologicznych, ograniczenia kosztów, poprawy konkurencyjności oraz bezpieczeństwa energetycznego kraju. Poprawa efektywności energetycznej zmniejsza materiałochłonność gospodarki, co znacznie obniża energochłonność [4].

W tabeli 1 przedstawione zostały wybrane wskaźniki ukazujące trendy w zużyciu paliw i emisji SO₂ w elektrowniach.

Po przemianie ustrojowej zużycie energii pierwotnej utrzymywało się na dość wysokim poziomie, spadek nastąpił dopiero po roku 1996; wpływ na to miała realizacja projektów modernizacyjnych, restrukturyzacja gospodarki oraz okresowo zmniejszona aktywność gospodarcza. Spory efekt w postaci poprawy efektywności energetycznej był zasługą wdrażania odpowiednich programów oraz urynkowania cen energii. Zwiększenie efektywności energetycznej jest filarem prowadzenia zrównoważonej polityki energetycznej, która

TABELA 1. Wskaźniki zużycia paliw i emisji SO₂TABLE 1. Indicators of fuel consumption and emission of SO₂

Wskaźnik	1995	2000	2005	2008
Populacja [tys.]	38,284	38,254	38,157	38,136
Emisja SO ₂ [t]	1 221 992	817 012	672 779	444 752
Zużycie energii pierwotnej [PJ]	4129,7	3770,4	3906,5	4077,9
PKB [mld zł]	337,222	744,378	983,302	1272,838
Energochłonność [MJ/zł]	12,25	5,06	3,97	3,18
Emisja SO ₂ na osobę [t/os.]	0,032	0,021	0,018	0,012
Zużycie en. pierwotnej na os. [GJ/os.]	107,87	98,562	102,38	106,20

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [5, 6, 7].

w ostatnich kilkunastu latach może pochwalić się spadkiem energochłonności produktu krajowego brutto o blisko 1/3. Zużycie energii na mieszkańca wzrosło, co należy uznać za zjawisko korzystne, świadczące o rozwoju kraju.

Porównując jednak wyniki osiągnięte przez Polskę do krajów najwyżej rozwiniętych, w dalszym ciągu zauważyć można spore braki. Efektywność energetyczna jest około trzykrotnie niższa od liderów w tym rankingu i około dwukrotnie niższa od średniej w krajach Unii Europejskiej. Patrząc z kolei na zużycie energii pierwotnej jest ono blisko 40% niższe niż w krajach Europy zachodniej. W pewnym sensie świadczy to jednak o olbrzymim potencjale Polski w zakresie oszczędzania energii i charakteryzuje gospodarkę intensywnie rozwijającą się.

Powyższe dane ilustrują spadki emisji SO₂ oraz energochłonności na przełomie kilkunastu ostatnich lat. W przypadku zużycia energii pierwotnej wartości kształtują się nieco inaczej, ma to związek z przemianą ustrojową Polski i zmianami w sektorze energetycznym, m.in. prywatyzacją sektora paliwowo-energetycznego oraz wejściem w życie ustawy Prawo Energetyczne z 4 czerwca 1997 roku. Obecnie przewidywany jest stały wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną. Z tego względu, bardzo ważnym tematem staje się zagwarantowanie odpowiedniego potencjału wytwórczego, bazującego na krajowych zasobach energii pierwotnej.

2. Metody dekompozycji

2.1 Idea metody dekompozycji

Technika dekompozycji po raz pierwszy użyta została w latach siedemdziesiątych, aby lepiej poznać wpływ zmian podaży produktu całkowitego na popyt energii przemysłowej.

Niedługo po światowym kryzysie naftowym (1974), zaczęto poszukiwać nowych sposobów pozwalających określić ilościowo wpływ zmian strukturalnych w produkcji energii przemysłowej na jej całkowity popyt, w celu lepszego zrozumienia mechanizmów rządzących tym sektorem przemysłu. Od połowy lat dziewięćdziesiątych przeprowadzono szereg nowych badań oraz opracowano lepsze metody obliczeniowe, nastąpił znaczny wzrost w dziedzinie analiz dotyczących energii oraz środowiska. Zdano sobie sprawę, że zmiany w produkcji przemysłowej mogą mieć duży wpływ na intensywność energii, obliczaną jako stosunek całkowitej podaży energii przemysłowej do całkowitej produkcji przemysłowej. Rozwiniętych zostało kilka różnych podejść stosowanych dla określenia wpływu różnych czynników na zmiany dekomponowanej wielkości w czasie. Sektorowa intensywność energii, którą uważano za lepszy pomiar efektywności energetycznej niż ogólna intensywność energii, jest ilością konsumowanej energii wymaganej do zapewnienia odpowiedniego stopnia produkcji na poziomie sektorowym. Metodologia dekompozycji stała się użytecznym i popularnym narzędziem nie tylko w podaży przemysłu energetycznego, ale również w ogólnych analizach energii oraz środowiska. Dzięki opracowanym metodom możliwe stało się dekomponowanie takich wielkości jak emisja SO_2 do atmosfery, co jest celem niniejszego artykułu [1].

Aby w najprostszy sposób przedstawić metodologię dekompozycji, posłużono się modelem zaproponowanym przez J.W. Sun w 1998 roku [2].

Podstawa to zdekomponować czynnik resztkowy stosując się do zasady „wspólnie stworzone i równo rozdzielone”.

Założmy, że $V = x \cdot y$, tzn. zmienna V jest zdefiniowana przez parametr x oraz y . W okresie czasu $[0, t]$ zmiana ΔV może być obliczona jako

$$\Delta V = V_t - V_0 = x_t y_t - x_0 y_0 = (x_t - x_0) y_0 + (y_t - y_0) x_0 + (x_t - x_0)(y_t - y_0) \quad (1)$$

lub

$$= y_0 \Delta x + x_0 \Delta y + \Delta x \Delta y \quad (2)$$

gdzie $y_0 \Delta x$ i $x_0 \Delta y$ wynikają ze zmiany czynnika x oraz y i odpowiednio z całkowitej zmiany V . Trzeci człon $\Delta x \Delta y$ jest resztą w ogólnym modelu dekompozycji. Rysunek 1 ilustruje proces zachodzących zmian. Model dekompozycji dla systemu dwu zmiennych jest następujący:

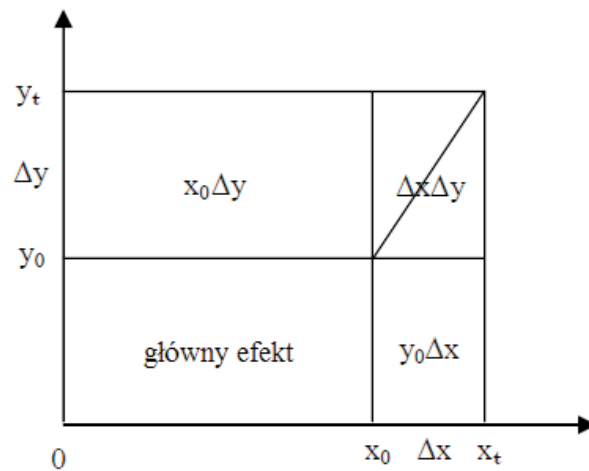
$$\Delta V = V_t - V_0 \quad (3)$$

udział zmiennych jest następujący

$$X_{efekt} = y_0 \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x \Delta y \quad (4)$$

$$Y_{efekt} = x_0 \Delta y + \frac{1}{2} \Delta x \Delta y \quad (5)$$

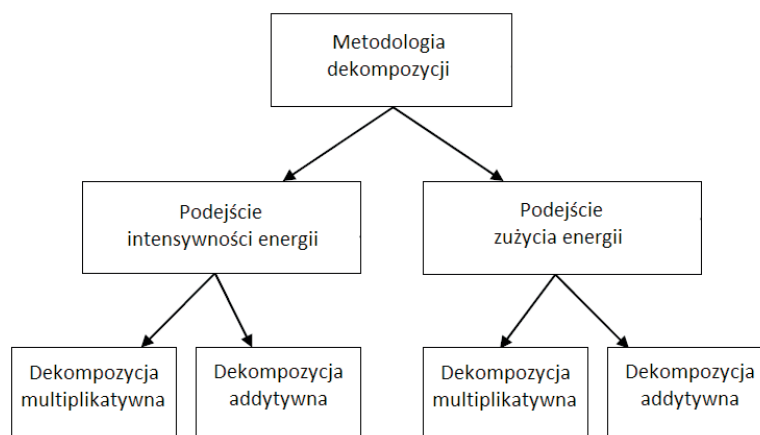
$$\Delta V = X_{efekt} + Y_{efekt} \quad (6)$$



Rys. 1. Główny efekt dekompozycji oraz wkład parametrów w modelu dwuczynnikowym
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [2]

Fig. 1. The main effects of decomposition and contribution of factors in two-factors system

Poniżej przedstawiono ogólny podział stosowanych podejść i metod dekompozycji (rys. 2).



Rys. 2. Podział metod dekompozycji
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [8]

Fig. 2. A general breakdown of the decomposition methods

2.2. Porównanie podejścia intensywności energii do zużycia energii

W podejściu analizy intensywności, wskaźniki zużycia energii można dekomponować dwoma sposobami: multiplikatywnie lub addytywnie. Aby zilustrować podejście tych dwóch dekompozycji założono, iż punktem odniesienia w gospodarce jest przemysł wytwórczy, podzielony na sektory, zarówno produkujące energię jak również występujące w roli konsumenta. Indeksy 0 i t odnoszą się odpowiednio do wartości zmiennych w porównywanych okresach: bazowym (0) i badanym (t), konsumpcja energii mierzona jest w jednostkach energii, a produkcja przemysłowa w jednostkach monetarnych. Wszystkie podsumowania dotyczą n sektorów przemysłu.

W dekompozycji multiplikatywnej mamy:

$$D_{tot} = \frac{I_t}{I_0} = D_{str} D_{int} D_{rsd} \quad (7)$$

gdzie względne zmiany zbiorczej intensywności energii są wyrażone w zależności od wskaźników powiązanych ze sobą multiplikatywnie. Z szacunków D_{str} (czynnik strukturalny) i D_{int} (czynnik intensywności) określone mogą być wpływy zmian strukturalnych i intensywności energii w różnych sektorach do relatywnej zmiany w całkowitej intensywności energii D_{tot} . Zmiana strukturalna lub zmiana intensywności energii w danym sektorze nie ma wpływu na wynik, jeśli korespondujący indeks (D_{str} lub D_{int}) ma wartość jeden. Dla metod, które dają doskonałą dekompozycję $D_{rsd} = 1$ (czynnik resztkowy). Na wartość czynnika resztkowego wpływają D_{str} i D_{int} ponieważ są szacowane oddzielnie, a uzyskany wynik nie jest równy D_{tot} [9].

Dekompozycja addytywna przyjmuje postać:

$$\Delta I_{tot} = I_t - I_0 = \Delta I_{str} + \Delta I_{int} + \Delta I_{rsd} \quad (8)$$

gdzie zmiana arytmetyczna w zbiorczej intensywności energii jest wyrażona na zasadzie dekomponowanych zmian, które są powiązane addytywnie. Tutaj zmienna nie ma wpływu na całość, jeśli korespondująca zmiana dekompozycji ma wartość zero. Dla metod, które dają idealną dekompozycję czynnik resztkowy $\Delta I_{rsd} = 0$. Należy zauważyć, że w formie addytywnej wyniki są otrzymywane w jednostkach, w których mierzona jest zbiorcza intensywność energii. Są one łatwe w interpretacji, ale może to być niewygodne w niektórych aplikacjach, takich jak badania porównawcze, gdzie produkcja przemysłowa jest mierzona w różnych jednostkach monetarnych (np. między krajami). Aby obejść ten problem, wyniki mogą być wyrażone w ułamkowych lub procentowych zmianach zbiorczej intensywności energii w roku 0 poprzez podzielenie całości przez I_0 , tzn. przeprowadzamy dekompozycję $\frac{\Delta I_{tot}}{I_0}$ w $\frac{\Delta I_{str}}{I_0}$ i $\frac{\Delta I_{int}}{I_0}$ [9].

W podejściu zużycia energii częściej od formy multiplikatywnej stosowana jest forma addytywna. Taka też forma użyta została do obliczenia dekompozycji emisji SO_2 w niniej-

szym artykule. Dekompozycja obliczana jest jako zmiana zużycia energii między rokiem 0 a rokiem t i definiuje się ją następująco:

$$\Delta E_{tot} = E_t - E_0 \quad (9)$$

Całkowita zmiana podzielona jest na czynniki

$$\Delta E_{tot} = \Delta E_{pdn} + \Delta E_{str} + \Delta E_{int} + \Delta E_{rsd} \quad (10)$$

gdzie: ΔE_{pdn} – efekt produkcyjny,
 ΔE_{str} – efekt strukturalny,
 ΔE_{int} – efekt intensywności oraz
 ΔE_{rsd} – czynnik resztkowy.

Jak można zauważyć w porównaniu do wcześniejszego podejścia pojawia się tu dodatkowy czynnik ΔE_{pdn} ; zależy on od zmian całkowitej produkcji przemysłowej. Podobnie jak w addytywnym podejściu intensywności energii dekompozycja jest doskonała, kiedy czynnik resztkowy ΔE_{rsd} równy jest 0 [10].

2.3. Wybrane metody dekompozycji

Mimo ponad 25 lat badań nie ma jednoznaczności, która z metod dekompozycyjnych jest najlepsza. Głównie dyskusja toczy się wokół dwu metod – indeksu Divisia oraz indeksu Laspeyresa, które są najczęściej stosowane. Każda z metod posiada cechy, które preferują ich użycie w zależności od rodzaju badanych zagadnień. Metody z grupy Laspeyresa bazują na zmianach procentowych i są łatwiejsze do zrozumienia, konkurencyjne metody Divisia zbudowane są w koncepcji zmian logarytmicznych i charakteryzują się podejściem o lepszym uzasadnieniu merytorycznym [11].

Do obliczenia dekompozycji zużycia paliw oraz emisji SO_2 posłużą trzy wybrane metody, dla których równania zapisane zostaną w formie addytywnej. Jako pierwsza zaprezentowana zostanie *Udoskonalona metoda Laspeyresa* (RLM), która charakteryzuje się brakiem czynnika resztkowego (dekompozycja doskonała). Otrzymane metodą RLM wyniki będą mogły zostać odniesione do *Arytmetycznej średniej ważonej Divisia* (ADM), która zakłada obecność czynnika resztkowego. Ostatnią stosowaną metodą będzie *Logarytmiczna średnia ważona indeksu Divisia* (LMDI), która podobnie jak *Udoskonalona metoda Laspeyresa* pozwala na otrzymanie dekompozycji doskonałej, ponadto obecnie jest jedną z najczęściej stosowanych metod, dającą dość dokładne wyniki.

Udoskonalona metoda Laspeyresa – RLM

Do opisanie metody Laspeyresa posłużono się wcześniej przedstawionym przykładem. Zakładając, że V jest określone przez n czynników, zgodnie z równaniem $V_n = x_1 x_2 \dots x_n$,

w przedziale czasu $[0, t]$, przy czym symbol t oznacza rok późniejszy, a 0 rok wcześniejszy. V zmienia się od V_n^0 do V_n^t jak poniżej:

$$\begin{aligned}\Delta V &= V_n^t - V_n^0 = x_1^t x_2^t \dots x_n^t - x_1^0 x_2^0 \dots x_n^0 = \\ &= (x_1^0 + \Delta x_1)(x_2^0 + \Delta x_2) \dots (x_n^0 + \Delta x_n) - x_1^0 x_2^0 \dots x_n^0\end{aligned}\quad (11)$$

Zgodnie z równaniem (6) ΔV oznaczamy jako sumę efektów pochodzących od wszystkich rozważanych czynników, w tym przypadku liczba czynników wynosi n , równanie można więc zapisać:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n X_{i-efekt} \quad (12)$$

Według zasady stosowanej przez J.W. Sun'a „wspólnie utworzone i równo rozdzielone” $X_{i-efekt}$ dla metody RLM przyjmie postać:

$$\begin{aligned}X_{i-efekt} &= \frac{V_n^0}{x_i^0} \Delta x_i + \sum_{j \neq i}^n \frac{V_n^0}{2x_i^0 x_j^0} \Delta x_i \Delta x_j + \dots + \\ &+ \sum_{j \neq \gamma \neq i}^n \frac{V_n^0}{3x_i^0 x_j^0 x_\gamma^0} \Delta x_i \Delta x_j \Delta x_\gamma + \frac{1}{n} \Delta x_1 \Delta x_2 \dots \Delta x_n\end{aligned}\quad (13)$$

Model dekompozycji zgodnie z udoskonaloną metodą Laspeyresa powstaje poprzez podstawienie równania (13) do równania (12):

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_n^0}{x_i^0} \Delta x_i + \sum_{j \neq i}^n \frac{V_n^0}{2x_i^0 x_j^0} \Delta x_i \Delta x_j + \dots + \sum_{j \neq \gamma \neq i}^n \frac{V_n^0}{3x_i^0 x_j^0 x_\gamma^0} \Delta x_i \Delta x_j \Delta x_\gamma + \frac{1}{n} \Delta x_1 \Delta x_2 \dots \Delta x_n \right) \quad (14)$$

Metoda arytmetycznej średniej ważonej Divisia – ADM

Drugą wybraną metodę opracowaną przez grupę badaczy (Boyd, Hanson, Sterner), stworzono opierając się na indeksie Divisia. Dzięki niej można porównać wyniki dekompozycji doskonałej z niedoskonałą, gdyż pojawi się niewielki czynnik resztkowy, mający wpływ na wynik końcowy. Z tego względu stosowanie tej metody jest odradzane przy analizowaniu emisji dwutlenku węgla czy siarki, zostanie jednak użyta w celach porównawczych. Kolejną wadą ADM to brak możliwości wprowadzenia danych wejściowych o wartości zero, co ogranicza jej zastosowanie [12].

W tym przypadku $X_{i-efekt}$ przyjmuje o wiele prostszą formę niż poprzednio:

$$X_{i-efekt} = \frac{V_n^t + V_n^0}{2} \ln \frac{x_i^t}{x_i^0} \quad (15)$$

Postępując analogicznie jak przy opisywaniu poprzedniej metody, podstawiamy równanie (15) do równania (12), otrzymując tym samym wzór na całkowitą zmianę V metodą arytmetycznej średniej ważonej Divisia:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_n^t + V_n^0}{2} \ln \frac{x_i^t}{x_i^0} \right) \quad (16)$$

Metoda logarytmicznej średniej ważonej indeksu Divisia – LMDI

Ostatnia wybrana metoda również bazuje na indeksie Divisia, różnicę stanowi zamiana arytmetycznej średniej ważonej na logarytmiczną średnią ważoną [13]. W tym przypadku $X_{i-efekt}$ równy jest:

$$X_{i-efekt} = \frac{V_n^t - V_n^0}{\ln \left(\frac{V_n^t}{V_n^0} \right)} \ln \left(\frac{x_i^t}{x_i^0} \right) \quad (17)$$

Podstawiamy powyższy wzór do równania (12) otrzymując końcowe równanie według metody logarytmicznej średniej ważonej indeksu Divisia:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_n^t - V_n^0}{\ln \left(\frac{V_n^t}{V_n^0} \right)} \ln \left(\frac{x_i^t}{x_i^0} \right) \right) \quad (18)$$

Główną przewagą metody LMDI nad metodą ADM jest uzyskanie doskonałej dekompozycji oraz brak problemu zerowych wartości danych, poprzez dopisanie niewielkich dodatnich stałych, mieszczących się w granicach przedziału 10^{-10} do 10^{-20} [14]. Da się zauważyć, iż formuła występująca w metodzie LMDI jest znacznie mniej skomplikowana od stosowanej w metodzie RLM, co stanowi znaczne ułatwienie w obliczeniach (równanie ma taką samą postać niezależnie od ilości czynników w nim zawartych) [11].

3. Dekompozycja zużycia paliw i emisji SO_2 w elektrowniach

Poniżej przedstawiono model dekompozycyjny, który posłuży do obliczenia zużycia paliw oraz emisji SO_2 w elektrowniach przemysłowych na węgiel brunatny oraz na węgiel

kamienny. Dekompozycja obejmować będzie okresy pięcioletnie od 1995–2000 i 2000–2005 oraz lata 2006, 2007 i 2008.

3.1. Model dekompozycji

Ustalając wzór, na podstawie którego obliczona zostanie dekompozycja, należy wybrać główną dekomponowaną wielkość. Obecnie istotna jest emisja pyłów i gazów do atmosfery, stąd też wzór warunkował będzie emisję końcową zależną od zużycia paliw. Model dekompozycji bazuje na wielkościach zapisanych w poniższej tabeli:

TABELA 2. Zestawienie elementów składowych wzoru określającego model dekompozycji

TABLE 2. Presentation of components of the decomposition model

Wielkość	Symbol wielkości	Zależność czynnika	Symbol czynnika	Czynnik
Emisja końcowa	E_k	$\frac{E_k}{E_p}$	e_{pro}	procesowy
Emisja potencjalna	E_p	$\frac{E_p}{ZEP}$	e_{pal}	paliwowy
Zużycie energii pierwotnej	ZEP	$\frac{ZEP}{D}$	e_{spr}	sprawności
Popyt na energię elektryczną i ciepło	D	D	e_{pop}	popytu

Źródło: Opracowanie własne.

Zależność powstała w wyniku połączenia powyższych elementów kształtuje się następująco:

$$E_k = \frac{E_k}{E_p} \cdot \frac{E_p}{ZEP} \cdot \frac{ZEP}{D} \cdot D \quad (19)$$

Na emisję końcową E_k składają się więc cztery czynniki. Pierwszy z czynników – procesowy, to stosunek emisji końcowej do emisji potencjalnej, która obliczona zostanie za pomocą odpowiedniego wzoru. Mierzy on efekt, jaki daje stosowanie procesów redukcji emisji. Drugi czynnik określony jako paliwowy, określa stosunek emisji potencjalnej do zużycia energii pierwotnej, która w tym przypadku oznaczała będzie zużycie węgla kamiennego, brunatnego oraz paliw ciekłych. Ilość potencjalnej emisji odniesiona do jednostki zużywanej energii pierwotnej mierzy wpływ jaki ma zmiana paliw, na przykład na mniej emisyjne, czyli np. o mniejszej zawartości siarki. Kolejny z czynników oblicza wartość sprawności, obliczanej jako zależność między zużyciem energii pierwotnej a popytem na energię elektryczną oraz ciepło. Popyt ten jest zarazem ostatnim z czynników we wzorze, który zapisać można również w następujący sposób:

$$E_k = e_{pro} \cdot e_{pal} \cdot e_{spr} \cdot e_{pop} \quad (20)$$

Zmianę emisji końcowej oznaczaną symbolem ΔE_k , w przedziale czasowym $[0, t]$, zapiszemy jako:

$$\begin{aligned} \Delta E_k &= E_k^t - E_k^0 = e_{pro}^t e_{pal}^t e_{spr}^t e_{pop}^t - e_{pro}^0 e_{pal}^0 e_{spr}^0 e_{pop}^0 = \\ &= [e_{pro}^0 + (e_{pro}^t - e_{pro}^0)] [e_{pal}^0 + (e_{pal}^t - e_{pal}^0)] [e_{spr}^0 + (e_{spr}^t - e_{spr}^0)] [e_{pop}^0 + (e_{pop}^t - e_{pop}^0)] - \\ &\quad - e_{pro}^0 e_{pal}^0 e_{spr}^0 e_{pop}^0 = (e_{pro}^0 - \Delta e_{pro})(e_{pal}^0 - \Delta e_{pal})(e_{spr}^0 - \Delta e_{spr})(e_{pop}^0 - \Delta e_{pop}) - \\ &\quad - e_{pro}^0 e_{pal}^0 e_{spr}^0 e_{pop}^0 \end{aligned} \quad (21)$$

Posługując się formą addytywną, która będzie służyła do obliczenia dekompozycji w niniejszej pracy, otrzymujemy:

$$\Delta E_k = E_k^t - E_k^0 = E_{pro} + E_{pal} + E_{spr} + E_{pop} \quad (22)$$

gdzie: E_{pro} – efekt procesowy,
 E_{pal} – efekt paliwowy,
 E_{spr} – efekt sprawności,
 E_{pop} – efekt popytu.

3.2. Równania dekompozycji

Symbole używane w poprzednich częściach artykułu, w celu łatwiejszego zapisu zastąpiono następującymi oznaczeniami:

Czynniki:	Efekty:
$e_{pro} \rightarrow x_1$	$E_{pro} \rightarrow X_{1-efekt}$
$e_{pal} \rightarrow x_2$	$E_{pal} \rightarrow X_{2-efekt}$
$e_{spr} \rightarrow x_3$	$E_{spr} \rightarrow X_{3-efekt}$
$e_{pop} \rightarrow x_4$	$E_{pop} \rightarrow X_{4-efekt}$

✧ Równania RLM

Korzystając z równania (13) otrzymujemy następujące wzory:

$$\begin{aligned} X_{1-efekt} &= \Delta x_1 \left(x_2 x_3 x_4 + \frac{1}{2} \Delta x_2 x_3 x_4 + \frac{1}{2} x_2 \Delta x_3 x_4 + \frac{1}{2} x_2 x_3 \Delta x_4 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \Delta x_2 \Delta x_3 x_4 + \frac{1}{3} \Delta x_2 x_3 \Delta x_4 + \frac{1}{3} x_2 \Delta x_3 \Delta x_4 + \frac{1}{4} \Delta x_2 \Delta x_3 \Delta x_4 \right) \end{aligned} \quad (23)$$

$$X_{2-efekt} = \Delta x_2 \left(x_1 x_3 x_4 + \frac{1}{2} \Delta x_1 x_3 x_4 + \frac{1}{2} x_1 \Delta x_3 x_4 + \frac{1}{2} x_1 x_3 \Delta x_4 + \right. \\ \left. + \frac{1}{3} \Delta x_1 \Delta x_3 x_4 + \frac{1}{3} \Delta x_1 x_3 \Delta x_4 + \frac{1}{3} x_1 \Delta x_3 \Delta x_4 + \frac{1}{4} \Delta x_1 \Delta x_3 \Delta x_4 \right) \quad (24)$$

$$X_{3-efekt} = \Delta x_3 \left(x_1 x_2 x_4 + \frac{1}{2} \Delta x_1 x_2 x_4 + \frac{1}{2} x_1 \Delta x_2 x_4 + \frac{1}{2} x_1 x_2 \Delta x_4 + \right. \\ \left. + \frac{1}{3} \Delta x_1 \Delta x_2 x_4 + \frac{1}{3} \Delta x_1 x_2 \Delta x_4 + \frac{1}{3} x_1 \Delta x_2 \Delta x_4 + \frac{1}{4} \Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_4 \right) \quad (25)$$

$$X_{4-efekt} = \Delta x_4 \left(x_1 x_2 x_3 + \frac{1}{2} \Delta x_1 x_2 x_3 + \frac{1}{2} x_1 \Delta x_2 x_3 + \frac{1}{2} x_1 x_2 \Delta x_3 + \right. \\ \left. + \frac{1}{3} \Delta x_1 \Delta x_2 x_3 + \frac{1}{3} \Delta x_1 x_2 \Delta x_3 + \frac{1}{3} x_1 \Delta x_2 \Delta x_3 + \frac{1}{4} \Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3 \right) \quad (26)$$

✧ Równania ADM

Zgodnie z równaniem (15) można zapisać następujące wzory:

$$X_{1-efekt} = \frac{E_k^t + E_k^0}{2} \ln \frac{x_1^t}{x_1^0} \quad (27)$$

$$X_{2-efekt} = \frac{E_k^t + E_k^0}{2} \ln \frac{x_2^t}{x_2^0} \quad (28)$$

$$X_{3-efekt} = \frac{E_k^t + E_k^0}{2} \ln \frac{x_3^t}{x_3^0} \quad (29)$$

$$X_{4-efekt} = \frac{E_k^t + E_k^0}{2} \ln \frac{x_4^t}{x_4^0} \quad (30)$$

✧ Równania LMDI

Zgodnie z równaniem (17) zapisujemy kolejno:

$$X_{1-efekt} = \frac{E_k^t + E_k^0}{\ln \frac{E_k^t}{E_k^0}} \ln \frac{x_1^t}{x_1^0} \quad (31)$$

$$X_{2-efekt} = \frac{E_k^t + E_k^0}{\ln \frac{E_k^t}{E_k^0}} \ln \frac{x_2^t}{x_2^0} \quad (32)$$

$$X_{3-efekt} = \frac{E_k^t + E_k^0}{\ln \frac{E_k^t}{E_k^0}} \ln \frac{x_3^t}{x_3^0} \quad (33)$$

$$X_{4-efekt} = \frac{E_k^t + E_k^0}{\ln \frac{E_k^t}{E_k^0}} \ln \frac{x_4^t}{x_4^0} \quad (34)$$

3.3. Dane wejściowe

Do dalszych obliczeń posłużą niżej przedstawione dane, reprezentujące każdy z czynników składających się na główny wzór określający zależność emisji końcowej. Wybrane zostały dane zamykające się w pięcioletnich okresach czasowych oraz dane dotyczące kilku ostatnich lat, aż do roku 2008.

TABELA 3. Dane wykorzystane w analizach

TABLE 3. Data used in decomposition analysis

Rok	Emisja potencjalna E_p	Emisja końcowa E_k	Zużycie energii pierwotnej ZEP	Popyt na energię elektryczną i ciepło D
	[kt]	[kt]	[kt]	[TJ]
1995	1 371	1 221	105 183	660 975 871
2000	1 425	817	101 577	660 141 865
2005	1 276	669	103 868	692 711 784
2006	1 347	713	105 151	699 565 184
2007	1 337	666	102 444	689 737 716
2008	1 210	442	99 300	656 437 523

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [6]

Emisja potencjalna obliczona została z iloczynu zużycia paliwa i procentowej zawartości siarki w danym paliwie. Poczynając od połowy lat dziewięćdziesiątych widać, że nastąpił gwałtowny spadek emisji końcowej, przy jednoczesnym niewielkim wzroście emisji potencjalnej. Kolejne lata przyniosły mniejsze wahania wskaźników E_p i E_k , przy zachowaniu podobnej różnicy między wartościami.

4. Obliczenia i wyniki

W tej części artykułu przedstawiono obliczenia dekompozycji przy użyciu wcześniej przedstawionych metod, korzystając z zebranych danych statystycznych.

4.1. Obliczenie wartości czynników

Czynniki: procesowy, paliwowy, sprawności i popytu, omawiane w rozdziale 3 zostały obliczone według zależności podanych w tabeli 2. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 4.

TABELA 4. Wyniki obliczeń czynników charakteryzujących emisję SO_2

TABLE 4. Calculations of values of the decomposition factors

Rok	e_{pro}	e_{pal}	e_{spr}	e_{pop}
1995	0,8911	0,0130	0,1591	660 975,87
2000	0,5731	0,0140	0,1539	660 141,86
2005	0,5246	0,0123	0,1499	692 711,78
2006	0,5298	0,0128	0,1503	699 565,18
2007	0,4982	0,0130	0,1485	689 737,72
2008	0,3658	0,0122	0,1513	656 437,52

Źródło: Opracowanie własne

Udoskonalona metoda Laspeyresa wymaga podstawienia do wzorów różnic Δe obliczonych dla poszczególnych okresów. Sposób ich obliczenia polega na odjęciu wartości czynnika w roku późniejszym od wartości czynnika w roku wcześniejszym. Wyniki obliczeń umieszczone zostały w tabeli 5.

TABELA 5. Zmiany czynników mających wpływ na emisję SO₂

TABLE 5. The change of the decomposition factors in the analysed periods

Rok	Δe_{pro}	Δe_{pal}	Δe_{spr}	Δe_{pop}
1995–2000	–0,3180	0,0010	–0,0053	–834,01
2000–2005	–0,0484	–0,0017	–0,0039	32 569,92
2005–2006	0,0052	0,0005	0,0007	6 853,40
2006–2007	–0,0317	0,0002	–0,0018	–9 827,47
2007–2008	–0,1323	–0,0009	0,0027	–33 300,20

Źródło: Opracowanie własne.

4.2. Wyniki dekompozycji metodami RLM, ADM, LMDI

W pierwszej kolejności obliczona została rzeczywista wartość ΔE_k , w tym celu dla poszczególnych metod użyte zostały dane zawarte w tabeli 3 oraz równaniach:

- ✧ RLM → (23), (24), (25), (26)
- ✧ ADM → (27), (28), (29), (30)
- ✧ LMDI → (31), (32), (33), (34)

Wyniki końcowe dekompozycji metodami RLM, ADM oraz LMDI wyrażone są w kilotonach [kt] (tab. 6). Do oceny poprawności wyników posłuży rzeczywista wartość ΔE_k (obliczana przy użyciu rzeczywistych danych statystycznych).

Zestawiając ze sobą wszystkie wyniki dekompozycji dla poszczególnych okresów czasowych, możemy porównać wyniki uzyskane różnymi metodami. W każdej z metod efekty różnią się od siebie nieznacznie (z wyjątkiem efektu sprawności z lat 2005–2006, gdzie uzyskano jednakowy wynik), jednakże całkowita zmiana emisji końcowej dla metod dających dekompozycję doskonałą jest identyczna, czego nie można powiedzieć o metodzie ADM, która we wszystkich okresach daje wynik nieco zawyżony, na co wpływ miał czynnik resztkowy. Jest on jednak na tyle niewielki, że nie przekracza granicy błędu.

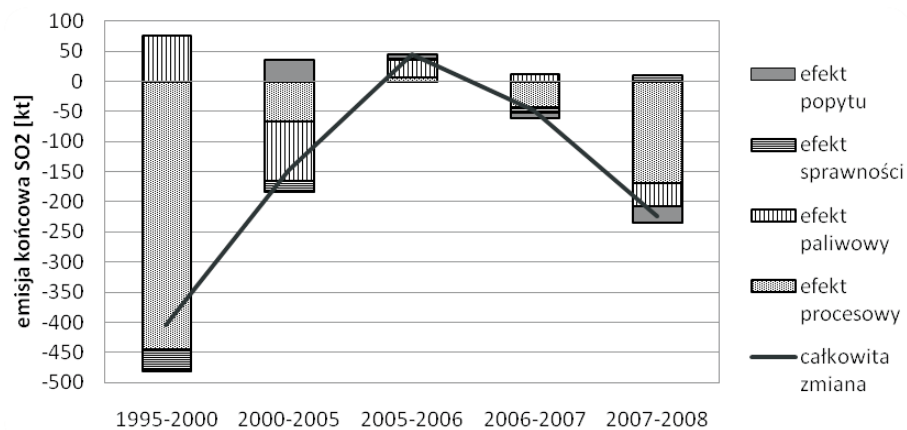
Analizując powyższy wykres można stwierdzić, iż główny wpływ na całkowitą zmianę emisji SO₂ w latach 1995–2000 miał efekt procesowy, niewielki dodatni wpływ uzyskał efekt paliwowy, natomiast efekt popytu oraz sprawności nie miały większego wpływu na emisję końcową. W kolejnym okresie pięcioletnim – głównie za sprawą ujemnych efektów procesowego oraz paliwowego – emisja końcowa SO₂ spadła, jedyna dodatnia wartość cechuje efekt popytu; nie wpłynął on jednak znacząco na całkowitą zmianę emisji, która osiągnęła wartość o ponad połowę mniejszą niż miało to miejsce w poprzednim okresie. W pierwszym analizowanym okresie jednorocznym otrzymano dodatnią całkowitą zmianę emisji, wpływ miały na to wszystkie cztery efekty na czele z efektem paliwowym, który stanowił ponad 65% całkowitego wpływu na zmianę emisji SO₂. Wzrost wyniósł około 44 [kt] co nie jest dużą wielkością, porównując ją do wcześniejszych spadków. W kolejnym

TABELA 6. Zbiorcze wyniki dekompozycji dla badanych okresów

TABLE 6. Aggregated results of the decomposition for the analysed periods

Okres	Metoda	Rzeczywista zmiana emisji	Całkowita zmiana	Efekt procesowy	Efekt paliwowy	Efekt sprawności	Efekt popytu
			ΔE_k	E_{pro}	E_{pal}	E_{spr}	E_{pop}
1995–2000	RLM	–405	–405	–445	76	–34	–1
	ADM		–410	–450	75	–34	–1
	LMDI		–405	–444	74	–34	–1
2000–2005	RLM	–147	–147	–66	–99	–19	36
	ADM		–148	–66	–99	–19	36
	LMDI		–147	–65	–98	–19	36
2005–2006	RLM	44	44	7	29	2	7
	ADM		44	7	29	2	7
	LMDI		44	7	29	2	7
2006–2007	RLM	–48	–48	–43	13	–8	–10
	ADM		–48	–43	13	–8	–10
	LMDI		–48	–43	13	–8	–10
2007–2008	RLM	–223	–223	–169	–38	10	–27
	ADM		–227	–171	–38	10	–27
	LMDI		–223	–169	–37	10	–27

Źródło: Opracowanie własne



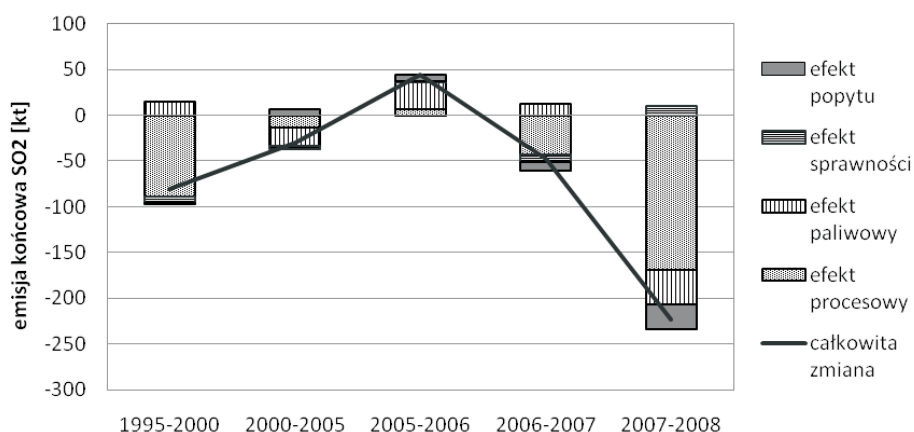
Rys. 3. Zbiorcze wyniki dekompozycji dla badanych okresów

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 3. The results of decomposition for the analysed periods

roku nastąpiło ponowne odwrócenie sytuacji, końcowa emisja SO₂ spadła o niecałe 48 [kt], czyli miał miejsce powrót do sytuacji sprzed okresu 2005–2006, po którym nastąpił wzrost emisji o ponad 44 [kt]. Główny wpływ na taki stan rzeczy miał efekt procesowy. Efekty popytu oraz sprawności zniwelowały dodatnią wartość efektu paliwowego. Ostatni rozpatrywany okres przyniósł bardzo pozytywny wynik spadku emisji końcowej SO₂, poza pierwszym okresem (pięcioletnim), w którym spadek wyniósł ponad 400 [kt], nastąpiło największe obniżenie emisji końcowej SO₂ w wysokości ponad 223 [kt] w ciągu roku. Podobnie jak w okresie poprzednim największy wpływ miał efekt procesowy. Jedynie efekt sprawności osiągnął dodatnią wartość, która jednak nie miała większego wpływu na wynik.

W celu lepszego porównania wyników dla wszystkich badanych okresów, podzielono dłuższe okresy pięcioletnie przez ilość lat ich trwania, co pozwoliło na uzyskanie znormalizowanych wyników jednorocznych (rys. 4).



Rys. 4. Ujednolicone średnioroczne wyniki dla badanych okresów

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 4. The standardized, average annual decomposition results for analysed periods

Po ujednoliceniu wyników widoczny jest ogromny w porównaniu do reszty okresów spadek emisji końcowej w latach 2007–2008. Głównie za sprawą efektu procesowego oraz przy zauważalnym udziale efektu paliwowego oraz popytu. W ogólnym rozrachunku najważniejszą rolę odgrywały dwa pierwsze efekty: procesowy – związany bezpośrednio z emisją SO₂ oraz paliwowy – łączący ze sobą emisję wraz ze zużyciem paliw używanych w elektrowniach. Najmniejszy wpływ na zmiany emisji we wszystkich badanych okresach miał efekt sprawności, który przyjmował raz dodatnie raz ujemne wartości, nie przyczyniając się znacząco do wyniku końcowego. Efekt popytu zaznaczył się wyraźnie dopiero w ostatnim okresie, dając ujemny wpływ na zmianę emisji. Zaznaczyć należy, iż jedynie między 2005 a 2006 nastąpił wzrost emisji szkodliwych substancji, co zostało zrekomensowane już w kolejnym okresie z niewielką nadwyżką.

Podsumowanie

Zastosowana metoda obliczeniowa umożliwia rozkład badanej wielkości emisji dwutlenku siarki poprzez wyodrębnienie poszczególnych czynników mających wpływ na jej zmiany oraz określenie ich wartości (dodatniej bądź ujemnej). Dzięki otrzymanym informacjom wynikającym z oceny wpływu analizowanych czynników, możliwe jest ich wykorzystanie do kształtowania odpowiedniej polityki energetycznej i ekologicznej kraju.

Niniejsza praca dekomponuje emisję końcową SO_2 w krajowych elektrowniach, w pięciu wybranych okresach z lat 1995–2008. Użyte do tego celu zostały czynniki mające największy wpływ na badaną wielkość: emisja potencjalna, zużycie energii pierwotnej oraz popyt na energię elektryczną i ciepło. Dane liczbowe opisujące wymienione czynniki dotyczą wyłącznie elektrowni i elektrociepłowni na węglu brunatnym i kamiennym, zużywających również paliwa ciekłe. Do obliczeń posłużono się metodami dekompozycji posiadającymi odmienne cechy, aby móc porównać poszczególne wyniki. W tym celu wybrano: *Udoskonaloną metodę Laspeyresa*, *Arytmetyczną średnią ważoną Divisia* oraz *Logarytmiczną średnią ważoną indeksu Divisia*. Pierwszą oraz trzecią metodę charakteryzuje brak czynnika resztkowego, dzięki czemu dekompozycja jest doskonała.

Wyniki dekompozycji wskazują, że największy wpływ na zmianę emisji końcowej SO_2 mają dwa pierwsze czynniki: procesowy oraz paliwowy. Zmiana czynnika paliwowego świadczyć może o poprawie jakości używanych paliw (mniejszym zasilaniu), natomiast zmiana czynnika procesowego spowodowana jest wprowadzaniem technologii redukcji emisji siarki. Niewielki wpływ miały dwa pozostałe czynniki: sprawności oraz popytu, który wyraźnie zaznaczył się dopiero w ostatnim rozpatrywanym okresie.

Przedstawione wyniki mogą posłużyć do podjęcia odpowiednich kroków, mających na celu lepsze kształtowanie polityki paliwowo-energetycznej Polski, wpływającej pozytywnie na poprawę stanu środowiska oraz dalszy rozwój gospodarczy kraju.

Literatura

- [1] ANG B.W., ZHANG F.Q., 2000 – A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. *Energy*. 25 (?), 1149–1176.
- [2] SUN J.W., 1998 – Changes in energy consumption and energy intensity: a complete decomposition model. *Energy Economics*. 20 (?), 85–100.
- [3] GAJDA A., MELKA K., 2008 – Możliwości i zagrożenia w dostosowaniu sektora energetycznego do przyjętych przez Polskę zobowiązań i wymogów ekologicznych Unii Europejskiej. *Polityka Energetyczna* t. 11, z. 1.
- [4] GULCZYŃSKI D., 2008 – Efektywność energetyczna świata i Polski – uwagi do problemu. *Polityka Energetyczna* t. 11, z. 1.
- [5] Ministerstwo Gospodarki, Polska podstawowe wskaźniki w latach 1995–2008. Warszawa, wrzesień 2009.
- [6] Emitor, Agencja Rynku Energii, 1995–2008.

- [7] BP 2009: BP Statistical Review of World Energy June 2009; www.bp.com
- [8] LIU F.L., CHUN-CHU, 2006 – A study on decomposition of industrial energy consumption. International research journal of finance and economics – Issue 6.
- [9] LIU F.L., ANG B.W., 2003 – Eight methods for decomposition the aggregate energy-intensity of industry. Department of industrial and systems engineering. Applied Energy 76, 15–23.
- [10] ANG B.W., 1995 – Multilevel decomposition of industrial energy consumption. Energy Economics.
- [11] ZHANG F.Q., ANG B.W., 2001 – Methodological issues in cross-country/region decomposition of energy and environment indicators. Energy Economics 23 (179–190).
- [12] ANG B.W., 2004 – Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? Energy Policy 32 (1131–1139).
- [13] ANG B.W., ZHANG F.Q., CHOI K.H., 1998 – Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition. Energy 23 (6), 489–95.
- [14] ANG B.W., 2005 – The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. Energy Policy 33 (867–871).

Konrad ISKRZYCKI, Wojciech SUWAŁA , Przemysław KASZYŃSKI

Decomposition of sulphur dioxide emissions reduction in Polish power plants, 1995–2008

Abstract

The purpose of the paper was to identify quantitatively factors influencing reduction of sulphur dioxide emission in Polish power stations between 1995 and 2008. A decomposition model was built and analyses dependences between the following factors: process – reduction due to desulphurization units; fuel – result of fuel switch or use of better quality fuel; efficiency – improvements of electricity production technologies; and demand – effect of electricity consumption variations. Various methods of effects evaluation were applied.

Results of the study prove that the biggest influence on final emission of SO₂ had process and fuel effects. Two out of three applied methods gave similar results, while method which does not perform perfect decomposition had residual.

KEY WORDS: decomposition, emissions reduction, sulphur dioxide