

## Optymalizacja krzywej obciążenia dobowego energią elektryczną w zakładzie przemysłu spożywczego jako przykład zastosowania mechanizmów DSR – studium przypadku

**Streszczenie.** Wyznaczono krzywą obciążenia dobowego energią elektryczną w zakładzie przemysłu spożywczego na przykładzie wytwórni wędlin. Zużycie energii elektrycznej czynnej badano w okresie 12 miesięcy dla 16 maszyn. Wyznaczoną krzywą poddano suboptymalizacji przez zmianę harmonogramu pracy maszyn ze względu na kryterium minimalizacji czasu pracy maszyn w tzw. szczytach dobowych. Osiągnięto istotne obniżenie kosztu energii elektrycznej, co poprawiło wyniki ekonomiczne przedsiębiorstwa.

**Abstract.** This paper presents the process of plotting an electric power daily load curve for a food processing plant, taking a cured meat production plant as an example. The electric power consumption was examined during a period of 12 months for 16 machines. A load curve was then suboptimised against the criterion of minimising the machine work time at daily peak hours. Changes in the machines' operation schedules resulted in reducing energy cost, thereby improving the cost-effectiveness of the company. (*Optimisation of the electrical power daily load curves in a food processing plant as an example of DSR mechanisms application – case study*)

**Słowa kluczowe:** przemysł spożywczy, zużycie energii elektrycznej, krzywa obciążenia dobowego, DSR.

**Keywords:** food processing industry, electric power consumption, daily load curve, DSR.

### Wprowadzenie

Wysokość kosztów ponoszonych przez zakłady przetwórcze przemysłu spożywczego na zakup energii elektrycznej zależy m.in. od tzw. mocy zamówionej, zapotrzebowania na moc szczytową oraz opłat taryfowych

Istotnym problemem jest organizowanie produkcji w taki sposób, aby zminimalizować pobór energii elektrycznej w tzw. strefach szczytowych o najwyższych opłatach taryfowych za 1 kWh. Do rozwiązywania tego typu problemów stosuje się mechanizmy tzw. reakcji strony popytowej (DSR, ang. Demand Side Response), czyli dobrowolnego, tymczasowego dostosowania zapotrzebowania na moc, realizowanego przez użytkownika końcowego w odpowiedzi na sygnał cenowy (cena rynkowa lub taryfa energii elektrycznej) lub realizowanym na podstawie umowy z użytkownikiem końcowym [1].

Złożona struktura zużycia energii elektrycznej w przemyśle spożywczym powoduje znaczne wahania w jej pobożce, których miarą są szczyty i doliny na dobowych lub miesięcznych wykresach obciążenia. Krzywa obciążenia dobowego jest to graficzne przedstawienie przebiegu obciążenia mocą czynną lub bierną w ciągu doby i ukazanie maksymalnego (szczytu) i minimalnego (doliny) zużycia energii elektrycznej [2].

Kształtowanie krzywej obciążenia dobowego energią elektryczną u końcowego odbiorcy (np. w zakładzie przemysłu spożywczego) przez zmniejszanie poboru energii w czasie szczytów taryfowych na rzecz wzrostu poboru w strefach pozaszczytowych jest jedną z form DSR [1,3,4,5,6,7]. Stosowanie mechanizmów DSR, prócz oszczędności w rachunkach za energię elektryczną u końcowego odbiorcy [8,9,10], niesie także ze sobą inne, nie mniej ważne korzyści, do których można zaliczyć:

- zwiększenie wydajności systemu elektroenergetycznego przez wyrównanie zapotrzebowania na moc w ciągu całej doby [1,3,11,12],
- ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> powodowanej odstawianiem (w dolinach) i ponownym rozruchem (w szczytach) bloków energetycznych [11,13],
- wydłużenie żywotności niektórych urządzeń, np. transformatorów [14,15].

### Przedmiot i cel pracy

Przedmiotem pracy jest linia technologiczna do produkcji kielbas w wybranym zakładzie Przetwórstwa Mięsnego. W zakładzie tym wyróżnia się następujące linie technologiczne do produkcji masarskiej:

- linia technologiczna do produkcji wędlin podrobowych,
- linia technologiczna do produkcji wędlin bezostonowych,
- linia technologiczna do produkcji produktów blokowych,
- linia technologiczna do produkcji wędzonek,
- linia technologiczna do produkcji kielbas.

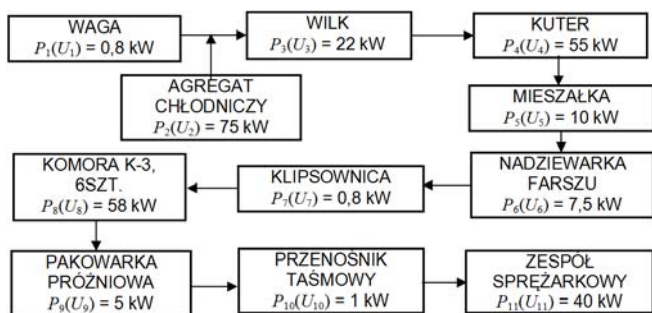
Zakład przetwórczy zasilany jest energią elektryczną z ENERGIA - OPERATOR S.A. Oddział w Olsztynie. Moc zamówiona zakładu przetwórczego wynosi 1500 kW.

Celem pracy jest wyznaczenie i suboptymalizacja krzywej obciążenia dobowego wybranego zakładu przemysłu spożywczego zgodnie z ideą DSR.

### Metodyka

Badano zużycie energii elektrycznej dla linii technologicznej do produkcji wędlin. Czas badań wynosił 6 miesięcy. Strukturę funkcjonalną oraz moc elektryczną maszyn w badanej linii przedstawiono na rysunku 1.

Niektóre odbiorniki energii elektrycznej (maszyny) zagregowano ze względów funkcjonalnych (tworzą nierozzerwalny ciąg technologiczny) np. wilk, kuter, mieszalnia i nadziewarka do produkcji kielbas cienkich, wilk, kuter, mieszalnia, nadziewarka i klipsownica do produkcji kielbas grubych; pakowarka próżniowa i przenośnik taśmowy.



Rys. 1. Struktura funkcjonalna linii do produkcji kielbas

Sposób utworzenia agregatów oraz ich moc elektryczną przedstawiono poniżej (oznaczenia jak na rysunku 1):

Agregat nr 1:  $P_I = P_1(U_1) = 0,8 \text{ kW}$

Agregat nr 2:  $P_{II} = P_2(U_2) = 75 \text{ kW}$

Agregat nr 3:

$P_{III} = P_3(U_3) + P_4(U_4) + 2P_5(U_5) + 2P_6(U_6) = 112 \text{ kW}$

Agregat nr 4:

$P_{IV} = P_3(U_3) + P_4(U_4) + 2P_5(U_5) + 2P_6(U_6) + P_7(U_7) = 113 \text{ kW}$

Agregat nr 5:

$P_V = P_3(U_3) + P_4(U_4) + P_5(U_5) + P_6(U_6) = 94,5 \text{ kW}$

Agregat nr 6:  $P_{VI} = 6P_8(U_8) = 348 \text{ kW}$

Agregat nr 7:  $P_{VII} = P_9(U_9) + P_{10}(U_{10}) = 6 \text{ kW}$

Agregat nr 8:  $P_{VIII} = P_{11}(U_{11}) = 40 \text{ kW}$

Moc całkowita  $P_z$  odbiorników badanej linii technologicznej jest następująca:

$$(1) \quad P_z = \sum_{i=1}^8 P(U_i) = 808,5 \text{ kW}$$

gdzie:  $i$  – numer agregatu.

Ogólna postać krzywej obciążenia dobowego określona jest równaniem:

$$(2) \quad P = f(t)$$

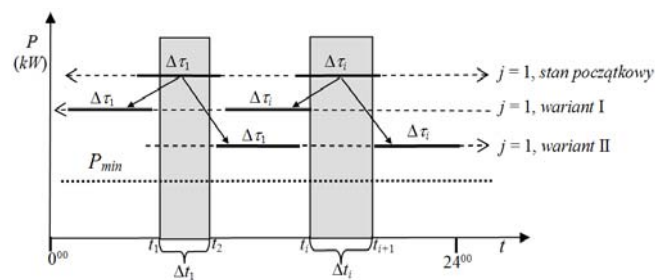
gdzie:  $P$  – moc chwilowa (kW),  $t$  – czas dobowy,  $t \in \{[0^{00} - 24^{00}]\}$ .

Sformalizowana postać funkcji kryterium optymalizacji  $F$  jest następująca:

$$(3) \quad F = \text{opt } f(\Delta t_i)_{i=1}^J = \min \left( \sum_{j=1}^J P_j \right)_i$$

gdzie:  $\Delta t_i$  – szerokość interwału  $i$ -tego słupa,  $i$  – numer słupa taryfy szczytowej,  $j$  – numer warstwy w  $i$ -tym słupie.

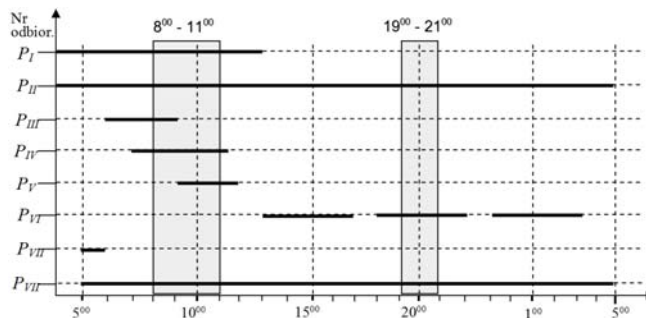
Ilustrację graficzną suboptymalizacji krzywej obciążenia dobowego pokazano na rysunku 2.



Rys.2. Ilustracja graficzna suboptymalizacji krzywej obciążenia dobowego dla danej linii technologicznej

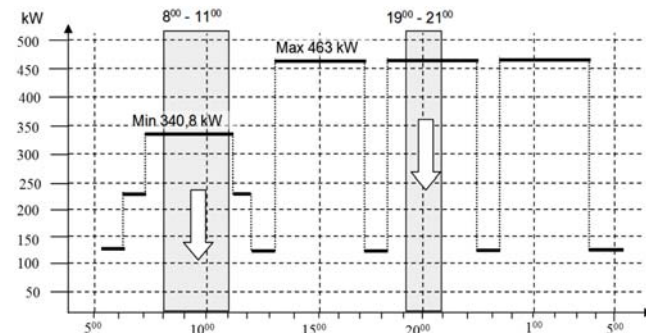
Suboptymalizacja krzywej obciążenia dobowego polega na takim przemieszczaniu interwałów pracy poszczególnych linii technologicznych ( $\Delta \tau_i$ ), aby uzyskać minimalną moc  $P_{min}$  pracujących maszyn w słupie o szerokości  $\Delta t_i$  [2]. Na rysunku 2 pokazano stan początkowy dla warstwy  $j = 1$  oraz przykładowe stany dla tej warstwy po suboptymalizacji – wariant I i wariant II. Zgodnie z wzorem (3) w słupach  $\Delta t_i$  zminimalizowano czas pracy linii technologicznej, która stanowi warstwę o numerze „j”.

Podczas badań zidentyfikowano rzeczywisty harmonogram pracy poszczególnych agregatów (odbiorników energii elektrycznej). Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 3, z którego wynika, że agregaty nr II i VII pracują w sposób ciągły, a pozostałe w sposób dyskretny.



Rys.3. Harmonogram pracy odbiorników energii elektrycznej rozpatrywanej linii technologicznej

Wyznaczona w oparciu o dane z rysunku 3, krzywa obciążenia dobowego jest pokazana na rysunku 4.

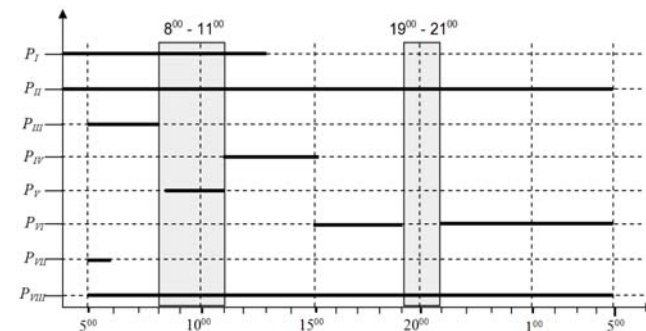


Rys.4. Rzeczywista krzywa obciążenia dobowego energią elektryczną

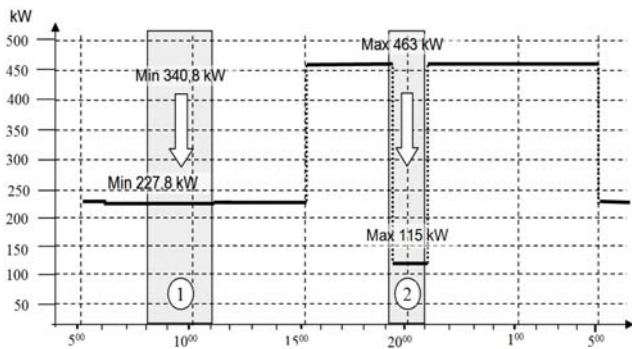
Optymalizacja krzywej obciążenia dobowego [1,16] polega na przesuwaniu czasu pracy odbiorników poza strefę największego obciążenia, co jest możliwe w odniesieniu do odbiorników pracujących dyskretnie (po kilka godzin w ciągu doby). W cyklu produkcyjnym przesunięcie czasu pracy jednego odbiornika powoduje konieczność zmiany czasu pracy innego odbiornika, co prowadzi do zmian w organizacji całego cyklu produkcyjnego.

W celu suboptymalizacji krzywej z rysunku 4 dokonano rekonstrukcji harmonogramu pracy odbiorników z rysunku 3. Wyniki przeprowadzonej suboptymalizacji przedstawiono na rysunkach 5 (harmonogram) i 6 (krzywa obciążenia dobowego).

Jak widać na rysunku 6 moc pobierana w słupie nr 1 o szerokości 3. godzin (między godz.  $8^{00}$  a  $11^{00}$ ) zmniejszyła się o 113 kW, tj. o 101 700 kWh/rok. Natomiast w słupie nr 2 o szerokości 2. godziny (między godz.  $19^{00}$  a  $21^{00}$ ) moc pobierana zmniejszyła się o 348 kW tj. o 208 800 kWh/rok. Łącznie w słupach szczytowych (o najwyższym koszcie jednostkowym energii elektrycznej) zmniejszono zużycie energii elektrycznej o 310 500 kWh/rok.



Rys. 5. Uporządkowany harmonogram pracy odbiorników elektrycznej po suboptymalizacji



Rys. 6. Krzywa obciążenia dobowego energią elektryczną po suboptymalizacji

### Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań i po dokonaniu suboptymalizacji krzywej obciążenia dobowego energią elektryczną rozpatrywanej linii technologicznej uzyskano:

- zmniejszenie poboru energii elektrycznej w godzinach porannego szczytu taryfowego o ok. 33% (z 341 kW do 228 kW);
- zmniejszenie poboru energii elektrycznej w godzinach wieczornego szczytu taryfowego o ok. 75% (z 463 kW do 115 kW);
- poprawę charakterystyki chwilowych obciążeń dobowych, ograniczenie szczytów i dolin obciążenia energetycznego, co jest szczególnie istotne w aspekcie problematyki DSR;
- istotne oszczędności finansowe.

Należy dodać, że oszczędności dotyczą tylko jednej, wybranej do badań linii technologicznej. Na podstawie otrzymanych wyników można założyć, że wyznaczenie wg przedstawionej metody krzywych obciążenia dobowego dla pozostałych linii i suboptymalizacja harmonogramu pracy pozwoli uzyskać istotne oszczędności finansowe w całym zakładzie. Można stwierdzić, że przedstawiona procedura jest efektywną metodą bezinwestycyjnego obniżania kosztów produkcji w przedsiębiorstwie, która jest często niedoceniana przez służby utrzymania ruchu.

**Autorzy:** dr hab. inż. Jacek Bieranowski, prof. UWM, [jacbie@uwm.edu.pl](mailto:jacbie@uwm.edu.pl); dr inż. Tomasz Olkowski, [tomasz.olkowski@uwm.edu.pl](mailto:tomasz.olkowski@uwm.edu.pl) Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Katedra Elektrotechniki Energetyki Elektroniki i Automatyki, ul. Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn.

### LITERATURA

- [1] Rasolomampionona D.D., Robak S., Chmurski P., Tomasik G. Przegląd istniejących mechanizmów DSR stosowanych na rynkach energii elektrycznej. *Rynek Energii*, 87 (2010), nr 2, 138-143
- [2] Góra S. Gospodarka elektroenergetyczna w przemyśle. Wyd. PWN, Warszawa 1982
- [3] Fice M. Prosumencki potencjał DSM/DSR w kształtowaniu profilu KSE. *Biblioteka Źródłowa Energetyki Prosumenckiej* (Nr katalogowy 1.3.15), [www.klaster3x20.pl](http://www.klaster3x20.pl), Politechnika Śląska, Gliwice 2014.
- [4] O'Connell N., Pinson P., Madsen H., O'Malley M. Benefits and challenges of electrical demand response: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39 (2014), 686-699
- [5] PSE Operator S.A. Opracowanie modelu stosowania mechanizmów DSR na rynku energii w Polsce. ETAP IV: Opracowanie raportu z realizacji zadania szczegółowego. Opracowanie wykonane w ramach umowy nr DO/411/BK/2008 zawartej pomiędzy PSE Operator S.A. a Centrum Zastosowań Zaawansowanych Technologii Sp. z o.o. („CATA”).
- [6] Albadi M.H., El-Saadany E.F. A summary of demand response in electricity markets. *Electric Power Systems Research*, 78 (2008), 1989-1996
- [7] Chmurski P., Tomasik G., Rasolomampionona D.D., Robak S. Możliwość implementacji mechanizmów DSR w warunkach funkcjonującego rynku energii elektrycznej w polsce. *Rynek Energii*, 87 (2010), nr 2, 26-31
- [8] Albadi M.H., El-Saadany E.F. Demand response in electricity markets: an overview. *IEEE PES GM*, Montreal, (2007), 1-5
- [9] Jazayeri P., Schellenberg A., Rosehard W.D., Doudna J., Wideregren S., Lawrence D., Mickey J., Jones S. A survey of load control programs for price and system stability. *IEEE Trans. Power Syst.*, 20 (2005), n.3, 1504-1509
- [10] Kirschen D.S. Demand-side view of electricity markets. *IEEE Trans. Power Syst.*, 18 (2003), 520-527
- [11] Zerrahn A., Schill W.P. On the representation of demand-side management in power system models. *Energy*, 84 (2015), 840-845
- [12] Strbac G. Demand side management: benefits and challenges. *Energy Policy*, 36 (2008), 4419-4426
- [13] Bergaentzle C., Clastres C., Khalfallah H. Demand-side management and European environmental and energy goals: an optimal complementary approach. *Energy Policy*, 67 (2014), 858-869
- [14] Jargstorff J., Vanthournout K., Derybel T., Hertem D.V. Effect of demand response on transformer lifetime expectation. *Proceedings of the ISGT Europe*, Digital object identifier: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465805; 2012
- [15] Behrangrad M. A review of demand side management business models in the electricity market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47 (2015), 270-283
- [16] Budny B., Groman A. Gospodarka ciepła i energetyczna w zakładzie przemysłu spożywczego. Wyd. AR-T Olsztyn 1981