

Dariusz GAWIN<sup>1</sup>  
Przemysław WOŹNIAK<sup>2</sup>

## WIELOKRYTERIALNA OPTIMALIZACJA ZUŻYCIA ENERGII NA CHŁODZENIE W BUDYNKACH WIELKOPOWIERZCHNIOWYCH

Poszukując optymalnego sposobu eksploatacji budynku, występują trudności w znalezieniu rozwiązania charakteryzującego się jak najmniejszym zużyciem energii, przy jednoczesnym zapewnieniu komfortu cieplnego ludziom w nim przebywającym, ponieważ kryteria te są sobie przeciwstawne. Sprowadza się to do rozwiązania problemu optymalizacji wielokryterialnej i wyznaczenia zbioru punktów optymalnych, stanowiących kombinację danych parametrów wejściowych do symulacji. Do takiej sytuacji dochodzi coraz częściej w okresie letnim, gdy temperatura operatywna w budynku na skutek działania wysokich wartości temperatur powietrza zewnętrznego i natężenia promieniowania słonecznego, przekracza dopuszczalne normy. Powszechnie stosowane instalacje chłodzenia w budynkach użyteczności publicznej powinny więc zostać poddane optymalizacji, zarówno na etapie projektowania, jak i eksploatacji, polegającej na doborze parametrów określających ich działanie. W niniejszym artykule pokazano zastosowanie algorytmów genetycznych do powyższego zagadnienia optymalizacji wielokryterialnej dla przypadku sklepu wielkopowierzchniowego, zakładając dostępność do prognozowanych danych pogodowych z wyprzedzeniem 24-godzinnym. Dodatkowo, harmonogramy pracy instalacji chłodzenia zostały dobrane w sposób uwzględniający zarządzanie stroną popytową w sposób minimalizujący pobieranie energii elektrycznej w okresie największego obciążenia sieci elektroenergetycznej. Z obliczeń otrzymano kombinacje parametrów wejściowych, pozwalających na zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych przy zastosowaniu zmiennej taryfy energetycznej, jednocześnie zapewniając komfort termiczny przez cały okres pracy budynku i pobierając energię elektryczną w sposób bardziej równomierny w ciągu doby. Dowodzi to zasadności podjętych badań i możliwości zastosowania powyższej procedury w zarządzaniu rzeczywistych obiektów wielkopowierzchniowych przy użyciu skalibrowanych z nimi modeli komputerowych.

**Słowa kluczowe:** algorytmy genetyczne, Demand-Side Management, Model Predictive Control, Precooling

<sup>1</sup> Dariusz Gawin, Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, [dariusz.gawin@p.lodz.pl](mailto:dariusz.gawin@p.lodz.pl)

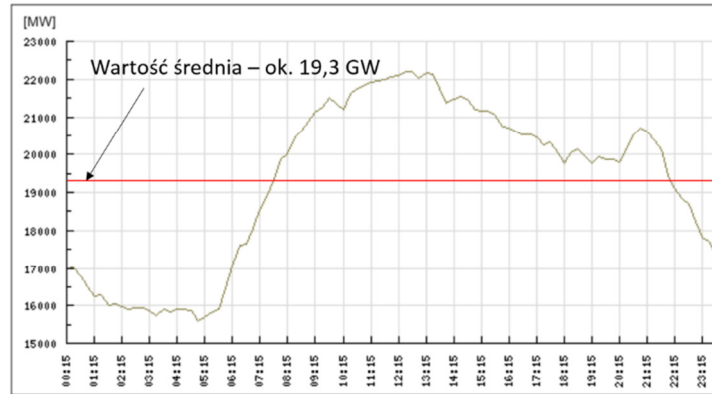
<sup>2</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Przemysław Woźniak, Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, [przemyslaw.wozniak@p.lodz.pl](mailto:przemyslaw.wozniak@p.lodz.pl)

## 1. Wprowadzenie

Budynek w trakcie eksploatacji poddawany jest zmiennym obciążeniom termicznym i wilgotnościowym. Wynikają one głównie z warunków klimatycznych otaczającego go środowiska zewnętrznego oraz przeznaczenia i sposobu użytkowania obiektu, które prowadzą do powstawania zysków wewnętrznych od urządzeń i ludzi w nim przebywających.

Zastosowanie komputerowych symulacji energetycznych budynków w celu doboru optymalnych ustawień systemów ogrzewania, chłodzenia i wentylacji w odpowiedzi na prognozowane wartości wyżej wymienionych czynników staje się coraz częściej podejmowaną tematyką badawczą [1]. Wielokrotnie dowiedziono, że predyktywny model zarządzania budynkiem (ang. Model Predictive Control – MPC) jest bardziej efektywny od sposobu klasycznego i prowadzi do minimalizowania zużycia energii i kosztów operacyjnych, przy jednoczesnym zapewnieniu komfortu termicznego [2]. Może być również z powodzeniem zaimplementowany w konstrukcji inteligentnych sieci elektroenergetycznych (ang. Smart Grid) wykorzystujących dynamicznie zmieniające się w ciągu dnia jednostkowe ceny energii (ang. Real-Time Pricing – RTP) [3]. Efektem dostosowania się do wysokich ich wartości w okresie szczytowego zapotrzebowania [4] jest taki dobór parametrów definiujących pracę budynku, aby pobierać możliwie jak najwięcej energii w okresie pozaszczytowym. Taki sposób zarządzania stroną popytową energii (ang. Demand-Side Management – DSM) prowadzi do uniknięcia przeciążenia sieci elektroenergetycznej, bez konieczności zwiększania maksymalnej mocy wytwórczej [5].

Celem niniejszej pracy jest dobór optymalnych parametrów chłodzenia w sklepie wielkopowierzchniowym dla przykładowych prognoz meteorologicznych dla okresu doby w okresie letnim, które mogłyby stanowić bazę dla zastosowania MPC. Szczególny nacisk położono na użycie technik DSM, uwzględniając zmienną taryfę energetyczną. Motywacją do przeprowadzenia takiej analizy jest narastający problem niezrównoważonego poboru energii elektrycznej w Polsce (rys. 1), który w 2015r. doprowadził do wprowadzenia 20-tego stopnia zasilania w dniach o najwyższych temperaturach powietrza zewnętrznego i tym samym do ograniczenia maksymalnej dostępnej mocy dla odbiorców.

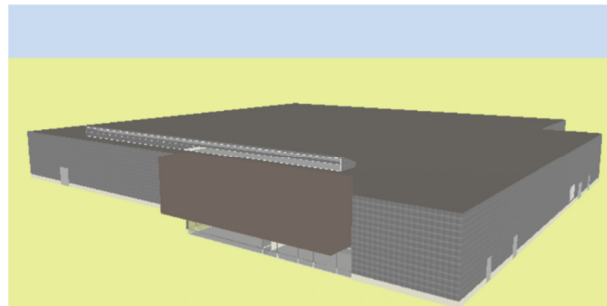


Rys. 1. Przykładowy rozkład obciążenia Polskiej Sieci Elektroenergetycznej - 6 sierpnia 2015r. [5]

Fig. 1. Exemplary electricity load distribution of Polish Power System on August 6th, 2015 [5]

## 2. Opis budynku i parametrów wejściowych symulacji

Analizowany obiekt handlowy charakteryzuje się powierzchnią użytkową  $4900 \text{ m}^2$  i kubaturą  $31900 \text{ m}^3$ . Konstrukcja przegród jest typowa dla przemysłowych hal stalowych – ściany zew. z płyt warstwowych o współczynniku przenikania ciepła  $U=0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , posadzka betonowa bez warstwy izolacji cieplnej. Okna dwuszybowe ( $U=1,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ), o łącznej powierzchni ok.  $150 \text{ m}^2$ , zlokalizowane są wyłącznie na elewacji wschodniej. Założono pracę budynku w godzinach 9:00-21:00, podczas której uwzględniono zyski ciepła od oświetlenia (o mocy  $40 \text{ kW}$ ) oraz od przebywających w nim ludzi.



Rys. 2. Wizualizacja analizowanego obiektu w programie DesignBuilder

Fig. 2. Visualisation of the analyzed building using DesignBuilder software

Obiekt wyposażony jest w system elektrycznego ogrzewania, chłodzenia oraz wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej. Strumień powietrza wentylacyjnego został założony na poziomie 10 l/(s·osobę) w godzinach pracy budynku, przy zagęszczeniu 1 osoby na 10 m<sup>2</sup> powierzchni użytkowej. Wizualizację obiektu przedstawiono na rys. 2.

Symulacje energetyczne, jak i cała procedura optymalizacji wielokryterialnej, wykorzystująca algorytmy genetyczne (wg [6]), zostały przeprowadzone w programie DesignBuilder – nakładce na moduł obliczeniowy EnergyPlus, który jest najczęściej wykorzystywanym programem komputerowym w badaniach dotyczących optymalizacji budynków [1].

Wyniki symulacji reprezentowane są przez pojedyncze „osobniki”, których genotyp (parametry wejściowe symulacji) zapisywany jest jako kombinacja różnych wartości zmiennych decyzyjnych. Poszukiwanie rozwiązań optymalnych odbywa się poprzez określanie zbioru niezdominowanych osobników (optymalnych w sensie Pareto) w obrębie poszczególnych pokoleń [7]. Dominację określa się na zasadzie jak najlepszego przystosowania do przyjętych dwóch funkcji celu: 1) zużycia energii elektrycznej na chłodzenie, 2) liczby godzin dyskomfortu termicznego wg [8], z których każda podlega minimalizacji.

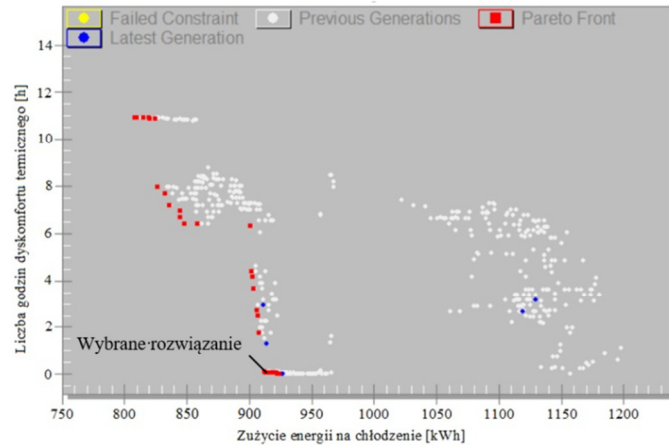
Przyjęto następujące zmienne decyzyjne:

- harmonogramy działania instalacji chłodzenia, uwzględniające dodatkowo wstępne schłodzenie w okresie nocnym (ang. precooling) jako technikę DSM,
- wartość temperatury operatywnej w budynku przy wstępnym chłodzeniu (18,0÷20,0°C),
- maksymalną dopuszczalną temperaturę operatywną w budynku (20,1÷26,0°C).

Obliczenia optymalizacyjne wykonano dla 100 pokoleń populacji złożonej z 20 „osobników” dla najczęściej stosowanego okresu prognozowania odpowiedzi budynku – 24h. Godzinowe dane klimatyczne, przyjęte jako przykładowe dane z prognozy pogody, pochodzą z bazy danych Typowego Roku Meteorologicznego dla lokalizacji Warszawa – Okęcie [9] dla dnia 9 lipca, który charakteryzował się najwyższą wartością temperatury powietrza zewnętrznego w całym roku.

### 3. Analiza wyników przeprowadzonych symulacji

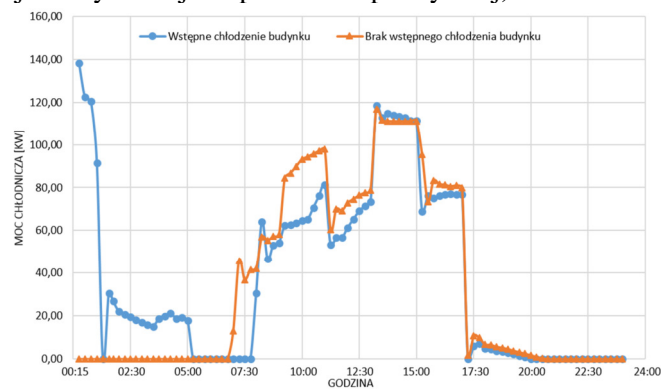
Na rys. 3 przedstawiono wyniki wszystkich symulacji wykorzystanych w procedurze optymalizacyjnej, z zaznaczeniem kolorem czerwonym rozwiązań należących do frontu Pareto. Dalszej analizie poddano wariant należący do frontu Pareto, charakteryzujący się zapewnieniem komfortu cieplnego w trakcie wszystkich godzin pracy obiektu (wstępne schłodzenie budynku w godzinach 1:00÷6:00, temperatura operatywna wstępnego schłodzenia: 20,0°C, maksymalna temperatura operatywna: 22,3°C).



Rys. 3. Rozwiązania należące do frontu Pareto w przestrzeni wszystkich możliwych rozwiązań

Fig. 3. Solutions belonging to Pareto front within feasible solution space

Na rys. 4 przedstawiono przebieg zmian zużycia mocy na chłodzenie dla powyższego wariantu i odpowiadającego mu konwencjonalnego harmonogramu pracy instalacji chłodzenia, zakładającego chłodzenie jedynie w czasie pracy obiektu (przy takiej samej maksymalnej temperaturze operatywnej).



Rys. 4. Porównanie zapotrzebowania na moc chłodniczą dla optymalnego wariantu wstępnego schłodzenia z odpowiadającymi mu klasycznym sposobem sterowania instalacjami

Fig. 4. Comparison of cooling load demand for the optimal precooling technique and conventional way of HVAC control

Analizując Rys. 4, można zaobserwować wyraźne zmniejszenie zapotrzebowania na pobieraną moc elektryczną w godzinach szczytowego zapotrzebowania (tj. 9:00-13:00) dla wariantu stosującego technikę DSM. Największą redukcję, wynoszącą 31% otrzymano o godz. 10:00 (64,57kW w stosunku do wyj-

ściowych 93,05kW). W tabeli 1 zestawiono wyniki obliczeń kosztów operacyjnych dla tych samych wariantów, z wykorzystaniem zmiennej, dwustrefowej taryfy energetycznej w przypadku wstępnego schładzania budynku.

Tabela 1. Koszt operacyjny chłodzenia dla wybranych wariantów sterowania instalacjami

Table 1. Cooling operating costs for the chosen variants of HVAC control

Wariant	Maksymalna temperatura operacyjna [°C]	Zużycie energii na chłodzenie [kWh]	Koszt operacyjny chłodzenia wg jednostrefowej taryfy C11 [10] [zł]	Koszt operacyjny chłodzenia wg dwustrefowej taryfy C22a (lipiec) [10] [zł]
Ze wstępnym chłodzeniem do 20°C	22,3°C	916,59	-	355,67
Bez wstępnego chłodzenia		835,22	356,64	-

Mimo większego zużycia energii na chłodzenie, przy zastosowaniu odpowiedniej zmiennej taryfy energetycznej, koszt operacyjny w przypadku wstępnego schładzania budynku jest niższy niż bez stosowania tego zabiegu. Jednocześnie uzyskiwana jest redukcja wymaganej mocy elektrycznej, co czyni ten wariant bardziej korzystnym z punktu widzenia zarządcy sieci elektroenergetycznych. Alternatywnie, możliwe jest także wybranie innego punktu z frontu Pareto, np. takiego, który określa wariant charakteryzujący się dodatkowo mniejszym zużyciem energii na cele chłodnicze (przy jednoczesnym pogorszeniu warunków komfortu cieplnego).

#### 4. Podsumowanie

W niniejszym artykule zaproponowano procedurę pozwalającą na wyznaczenie optymalnego sposobu sterowania systemem chłodzenia w sklepie wielkopowierzchniowym, w oparciu o prognozowane dane meteorologiczne z wyprzedzeniem 24-godzinnym. Wykorzystano w tym celu moduł optymalizacyjny z programu DesignBuilder, bazujący na algorytmach genetycznych, przystosowanych do optymalizacji wielokryterialnej, która jest niezbędna w przypadku jak najlepszego dostosowania się do przeciwstawnych funkcji celu (w tym przypadku zużycia energii i godzin dyskomfortu cieplnego). W ten sposób uniknięto konieczności ręcznego sterowania instalacją chłodzącą, która nie gwarantuje znalezienia optymalnej kombinacji ustawień tej instalacji. Taki sposób zarządzania chłodzeniem w budynku, po wstępnym skalibrowaniu modelu z istniejącym obiektem, pozwala na zmniejszenie kosztów operacyjnych związanych z zużyciem energii na chłodzenie w okresie letnim, jednocześnie nawiązując do metodyki DSM, wpływającej na zrównoważenie poboru energii z sieci elektroenergetycznej w ciągu doby.

Innym możliwym podejściem byłoby dodanie, jako trzeciej funkcji celu, kryterium minimalizujące koszt operacyjny. W takim przypadku występowałby jednak problem związany z wizualizacją przestrzeni możliwych rozwiązań, w tym też z wyborem punktu ze zbioru rozwiązań Pareto-optimalnych. Możliwe jest również zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej z dwiema funkcjami celu, rezygnując z kryterium zużycia energii i zastępując je wcześniej wspomnianym kryterium kosztu operacyjnego. Oba modele pozwalałyby na znalezienie kombinacji parametrów jeszcze korzystniejszych finansowo dla zarządcy budynku, jednak otrzymanywane większe zużycie energii byłoby sprzeczne z obowiązującą polityką energooszczędności i zrównoważonego rozwoju.

### Literatura

- [1] Nguyen A-T, Reiter S., Rigo P.: A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis, *Applied Energy*, vol. 113, 2014, pp. 1043-1058.
- [2] Afram A., Janabi-Sharifi F.: Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC), *Building and Environment*, vol. 72, 2014, pp. 343-355.
- [3] Avci M., Erkoc M., Rahmani A., Asfour S.: Model predictive HVAC load control in buildings using real-time electricity pricing, *Energy and Buildings*, vol. 60, 2013, pp. 199-209.
- [4] Adika C. O., Wang L.: Smart charging and appliance scheduling approaches to demand side management, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 57, 2014, pp.232-240.
- [5] <http://www.pse.pl> {dostęp 19.05.2016}.
- [6] Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T.: A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II., *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, 2002.
- [7] Zitzler E.: *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, 1999.
- [8] ANSI/ASHRAE Standard 55-2013: *Thermal environmental conditions for human occupancy*, Atlanta: American Society of Heating, Ventilation and Air-conditioning Engineers Inc., 2013.
- [9] <http://www.mib.gov.pl> {dostęp 19.05.2016}.
- [10] <http://www.energa.pl> {dostęp 19.05.2016}.

## MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION OF COOLING ENERGY USAGE IN LARGE-FLOOR-AREA BUILDINGS

### Summary

While searching for an optimal way of building exploitation, the difficulty in finding a solution characterized by the lowest energy consumption with simultaneously assuring thermal comfort of the people inside arises. The solution aiming at meeting the two contrary criteria results in application of multi-objective optimization through determining the set of optimal points being a combination of simulation entry parameters. Assuring thermal comfort of the people inside a building is especially inconvenient in summer, when the building's operative temperature exceeds allowable standards due to influence of high exterior air temperature and solar radiation intensity. Hence, commonly utilized air - conditioning systems should undergo optimization at the stage of both design and during exploitation based on the proper operating parameters choice. This paper analyzes the usage of genetic algorithms in the multi-objective optimization of a large - floor - area store assuming the access to weather conditions forecasted in 24 - hour advance. Furthermore, the HVAC system work schemes were set in a way including the minimization of electrical energy consumption in the peak hours of the power system demand. The performed calculations made it possible to obtain the combination of entry parameters allowing mitigation of exploitation costs through variable electrical energy tariff as well as assuring thermal comfort within the whole building's operation period while consuming the electrical energy in a more sustainable way. The results prove validity of the undertaken research and possibility of application of the aforementioned procedure in a control system of real large - floor - area buildings, taking advantage of their calibrated computational models.

**Keywords:** genetic algorithms, Demand-Side Management, Model Predictive Control, Precooling

DOI:10.7862/rb.2016.1

*Przesłano do redakcji:* 23.05.2016 r.

*Przyjęto do druku:* XX.YY.2016 r. (informacje redakcyjne – prosimy ich nie usuwać)