

Aleksandra Rak¹

STATYSTYCZNE MIARY ZAPOTRZEBOWANIA NA CIEPŁO W SYSTEMIE CIEPŁOWNICZYM

Streszczenie: W artykule omówiono statystyczne miary wpływające na zapotrzebowanie na ciepło w miejskim systemie ciepłowniczym oraz kierunki zmian obciążenia sieci ciepłowniczej. Głównym czynnikiem determinującym ilość wytwarzanej energii cieplnej i dostarczanej odbiorcom do budynków mieszkalnych oraz użyteczności publicznej jest temperatura otoczenia. Statystyczną miarą zapotrzebowania na ciepło jest liczba stopniodni grzania S_d , od której w danym sezonie grzewczym zależy zużycie energii na ogrzewanie budynków, a tym samym poziom emisji CO₂. Na podstawie wybranych sezonów grzewczych wyznaczono charakterystyki wpływające na warunki pracy sieci ciepłowniczej w tym zmiany zapotrzebowania na ciepło odniesione do temperatury otoczenia oraz stopień wykorzystania mocy cieplnej w systemie. Dla uzyskania poprawy efektywności energetycznej dystrybucji ciepła wskazano na potrzebę zastosowania narzędzi informatycznych do monitoringu parametrów pracy sieci oraz prognozowania zapotrzebowania na ciepło w oparciu o warunki pogodowe.

Słowa kluczowe: zapotrzebowanie cieplne, systemy ciepłownicze, liczba stopniodni

1. Wstęp – charakterystyka procesu dostawy ciepła

Zaopatrzenie w ciepło jest jednym z ważniejszych sektorów gospodarki energetycznej kraju, która wpływa na tempo wzrostu gospodarczego. Proces zaopatrzenia odbiorców w ciepło odbywa się poprzez system ciepłowniczy obejmujący następujące elementy niezbędne do zapewnienia ciągłości oraz jakości dostarczania ciepła (KUCZYŃSKI T. 2012):

- źródła wytwarzające ciepło o właściwych parametrach w niezbędnej ilości i w odpowiednim czasie,
- sieć ciepłowniczą doprowadzającą czynnik grzewczy do odbiorców,
- węzły ciepłownicze transformujące parametry czynnika grzewczego,
- instalacje wewnętrzne w poszczególnych budynkach.

¹ mgr inż., Politechnika Częstochowska, Wydział Zarządzania, Instytut Inżynierii Produkcji, e-mail: arak@fluid.is.pcz.pl

Szeroko pojęte ciepłownictwo zabezpiecza zarówno potrzeby bytowe społeczeństwa jak i odbiorców przemysłowych. Ciepło w Polsce produkowane jest zazwyczaj w źródłach scentralizowanych (ciepło systemowe). Scentralizowane źródło ciepła wraz z siecią ciepłowniczą, węzłami cieplnymi i przyłączami tworzy system ciepłowniczy, którego eksploatacja powinna być prowadzona w sposób elastyczny, zapewniający niezawodność dostaw ciepła przy ograniczeniu zużycia energii, strat przesyłowych oraz uwzględnieniu wpływu na środowisko (RAK A. 2015a).

2. Szacowanie zapotrzebowania na ciepło

Podstawowymi parametrami wpływającymi na wielkość zapotrzebowania na ciepło w sezonie grzewczym są temperatura powietrza zewnętrznego oraz długość sezonu grzewczego tzn. ilość dni, w których wymagana jest praca systemu ciepłowniczego. Wielkościami, które łączą te parametry są liczba stopniodni grzania S_d lub liczba stopniogodzin grzania S_g , jeśli zostaną uwzględnione zmiany temperatury zewnętrznej w ciągu doby. Koncepcję stopniodni jako statystycznej miary zapotrzebowania energii na ogrzewania budynków przyjęto w latach 20. ubiegłego wieku. Wykazano, że zużycie paliw w domach zmienia się proporcjonalnie do stopniodni grzania obliczonych dla wybranej temperatury bazowej t_b i przyjętej temperatury wewnętrznej równej $21,1^\circ\text{C}$ (DOPKE J. 2009). Także współcześnie stopniodni grzania wykorzystuje się jako narzędzie do prognozowania i nadzorowania zużycia energii. Istnieje szereg metod wyznaczania liczby stopniodni grzania, jedną z nich jest metoda średniej dziennej temperatury powietrza. Wg tej metody stosowanej m.in. w USA, Kanadzie i Niemczech liczbę stopniodni grzania $S_d(t_b)$ dla danej temperatury bazowej t_b oblicza się ze średnich dziennych temperatur powietrza zewnętrznego $t_{sd}(i)$ wg następującej formuły (DOPKE J. 2009):

$$S_d(t_b) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n [t_b - t_{sd}(i)] & \text{dla } t_{sd}(i) \leq t_b \\ 0 & \text{dla } t_{sd}(i) > t_b \end{cases} \quad (1)$$

Natomiast w metodzie przyjętej przez Eurostat ilość stopniodni grzania $Sd(18^{\circ}\text{C}; 15^{\circ}\text{C})$ dla temperatury bazowej $t_b=18^{\circ}\text{C}$ i temperatury granicznej $t_{gr}=15^{\circ}\text{C}$ oblicza się ze wzoru:

$$Sd(18^{\circ}\text{C}; 15^{\circ}\text{C}) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n [18^{\circ}\text{C} - t_{sd}(i)] & \text{dla } t_{sd}(i) \leq 15^{\circ}\text{C} \\ 0 & \text{dla } t_{sd}(i) > 15^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

Według tej metodyki dniami grzewczymi są dni o $t_{sd}(i) < t_{gr} = 15^{\circ}\text{C}$. Natomiast w polskiej normie PN-B-02025 zdefiniowano roczną liczbę stopniodni grzania $Sd(t_{wo})$ wg formuły:

$$Sd(t_{wo}) = \left\{ \sum_{i=1}^{12} [t_{wo} - t_e(i)] \cdot Ld(i) \right. \quad \text{dla } t_e(i) \leq t_{wo} \quad (3)$$

gdzie: t_{wo} – obliczeniowa temperatura wewnętrzna (20°C dla pokoi, przedpokoi, kuchni),
 $t_e(i)$ – średnia miesięczna temperatura powietrza zewnętrznego,
 $Ld(i)$ – liczba dni grzewczych w danym miesiącu.

Miesięczne liczby stopniodni grzania Sd dla wybranej sieci ciepłowniczej w sezonie grzewczym 2013/2014 obliczone wg zależności (1)÷(3) ze średnich dobowych temperatur powietrza t_{sd} oraz średnie miesięczne temperatury powietrza zewnętrznego t_e podano w tabeli 1.

Tabela 1. Liczba stopniodni grzania dla wybranej sieci ciepłowniczej

Okres	$Sd(12^{\circ}\text{C})$	$Sd(14^{\circ}\text{C})$	$Sd(15^{\circ}\text{C})$	$Sd(18^{\circ}\text{C})$	$Sd(20^{\circ}\text{C})$	$Sd(18^{\circ}\text{C}; 15^{\circ}\text{C})$	$Sd(t_{wo})$	t_e
-	[$^{\circ}\text{C} \cdot \text{dzień}$]							[$^{\circ}\text{C}$]
09.2013	38,7	33,3	47,1	179,8	239,8	171,9	40,0	12,0
10.2013	69,1	172,9	202,3	232,4	294,4	224,8	294,4	10,5
11.2013	208,8	244,5	274,5	388,0	448,0	388,0	448,0	5,1
12.2013	306,5	490,9	521,9	492,5	554,5	492,5	554,5	2,1
01.2014	392,9	527,8	558,8	578,9	640,9	578,9	640,9	-0,7
02.2014	232,9	415,6	443,6	400,9	456,9	400,9	456,9	3,7
03.2014	158,2	481,2	512,2	339,9	401,9	339,9	401,9	7,0
04.2014	69,4	179,2	204,2	222,2	282,2	214,1	282,2	10,6
05.2014	40,2	48,4	66,2	156,5	210,3	149,7	32,9	13,4
Sezon	1 516,7	2 593,8	2 830,8	2 991,1	3 528,9	2 960,7	3 151,7	7,1

Źródło: opracowanie własne

Liczbę stopniodni można wykorzystać do obliczenia zużycia energii w domach mieszkalnych i budynkach użyteczności publicznej wg wzoru:

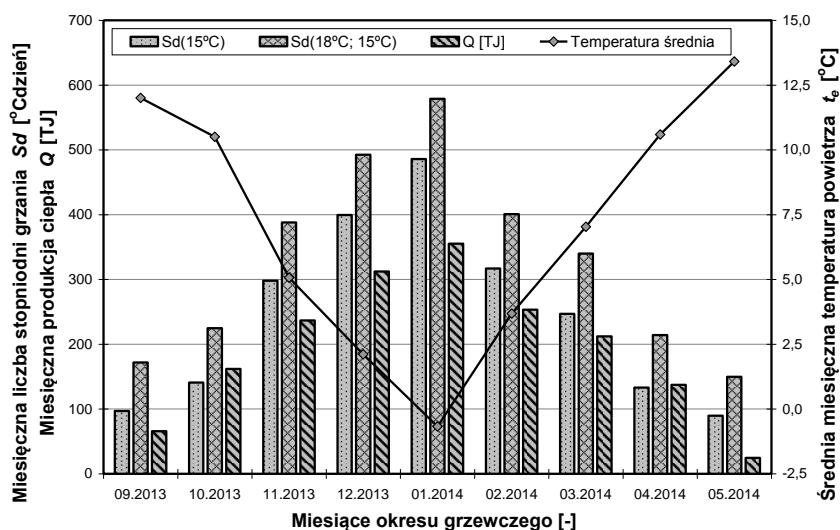
$$E = a + b \cdot Sd(t_b) + e \quad (4)$$

gdzie: E – zużycie energii, a , b – współczynniki,

$Sd(t_b)$ – liczba stopniodni w zależności od temperatury bazowej t_b ,

e – błąd metody.

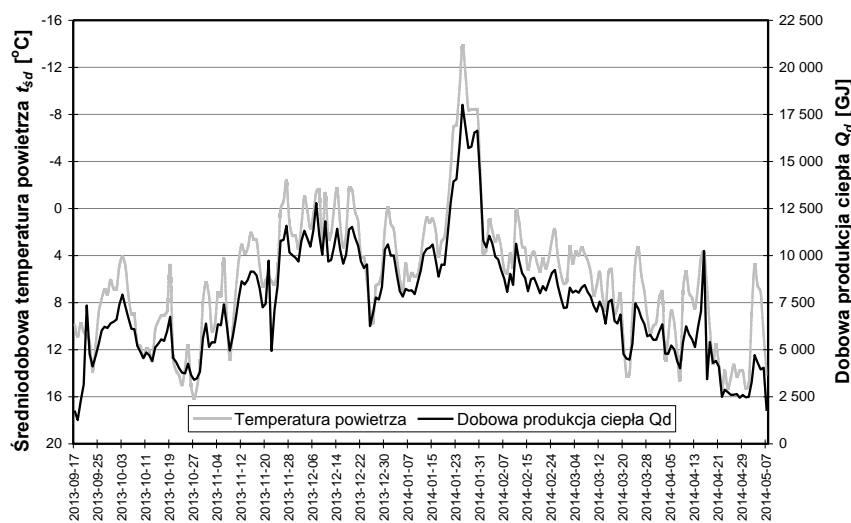
Człon a określa stałe zużycie energii na cele bytowe, natomiast zmienny sezonowo składnik $b \cdot Sd(t_b)$ opisuje zużycie energii niezbędne do ogrzewania budynków zależnie od warunków pogodowych (temperatura, wiatr, nasłonecznienie). Wielkość stopniodni grzania Sd dobrze oddaje zapotrzebowanie na ciepło w sezonie grzewczym, co potwierdza wykres podany na rysunku 1 sporządzony dla wybranej sieci ciepłowniczej na podstawie danych sezonu 2013/2014.



Rys. 1. Miesięczne liczby stopniodni grzania Sd , produkcja ciepła Q oraz średnie miesięczne temperatury powietrza t_e dla sieci ciepłowniczej

Źródło: opracowanie własne

Można stwierdzić dobrą korelację pomiędzy rzeczywistą wielkością wyprodukowanego ciepła Q , a liczbą stopniodni grzania Sd . Zmienność dobowej produkcji ciepła w trakcie sezonu grzewczego dla analizowanej sieci miejskiej pokazana na rysunku 2 wykazuje pełną zgodność ze zmianami temperatury zewnętrznej.



Rys. 2. Zmiany dobowej produkcji ciepła Q_d w miejskiej sieci ciepłowniczej oraz średniodobowe temperatury powietrza t_{sd} w sezonie grzewczym 2013/2014

Źródło: opracowanie własne

3. Bilans energetyczny ciepła w systemie ciepłowniczym

Dla systemu ciepłowniczego o strukturze pokazanej na rysunku 3 bilans ciepła można określić zależnością (RAK A. 2015a):

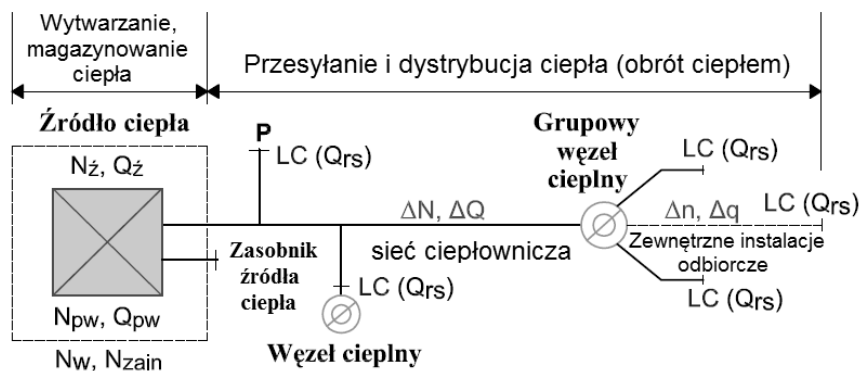
$$Q_w = Q_{L\dot{Z}C} + \sum_{i=1}^n Q_{rsi} + \Delta Q + \sum_{j=1}^k Q_{rsj} + \Delta q + Q_{pw} + Q_z \quad (5)$$

gdzie:

Q_w – ciepło wytworzone w systemie ciepłowniczym,

$Q_{L\dot{Z}C}$ – ciepło zmagazynowane w zasobniku ciepła,

Q_{rsi} – ciepło przekazane danemu odbiorcy w węźle cieplnym sieci,
 ΔQ – sumaryczne straty ciepła w sieci ciepłowniczej,
 Q_{rsj} – ciepło przekazane danemu odbiorcy w zewnętrznej instalacji,
 Δq – sumaryczne straty ciepła w zewnętrznych instalacjach odbiorczych,
 Q_{pw} – ciepło zużyte na potrzeby własne w systemie,
 Q_z – ciepło wykorzystane w źródle.



Rys. 3. Wytwarzanie i dystrybucja ciepła w systemie ciepłowniczym

Źródło: opr. wg CHOMIAK A. 2010.

Na podstawie przepływu wody grzewczej w sieci wytwarzanej przez źródło ciepła i operując mocą jako wielkością ciepła w jednostce czasu można bilans mocy systemu ciepłowniczego przedstawić w następującej postaci (RAK A. 2015a):

$$G_z \cdot c_w \cdot (t_z - t_p) - \Delta P_s = N_{o\Sigma} \quad (6)$$

gdzie:

G_z – natężenie przepływu wody na wyjściu ze źródła ciepła, t/s,
 $N_{o\Sigma}$ – wykorzystana sumaryczna moc cieplna dla węzłów sieci, MW,
 c_w – ciepło właściwe wody, kJ/(kg·K),
 t_z – temperatura wody w rurociągu na wyjściu ze źródła,
 t_p – temperatura wody na powrocie do źródła
 ΔP_s – przesyłowe straty mocy w sieci ciepłowniczej, MW.

Uwzględniając, że pierwszy człon równania X.6 określa moc cieplną P_z wytwarzaną przez źródło ciepła równanie bilansu mocy systemu ciepłowniczego można przekształcić do postaci (RAK A. 2015a):

$$P_z - \Delta P_s = K_{w\Sigma} \cdot N_{z\Sigma} \quad (7)$$

gdzie:

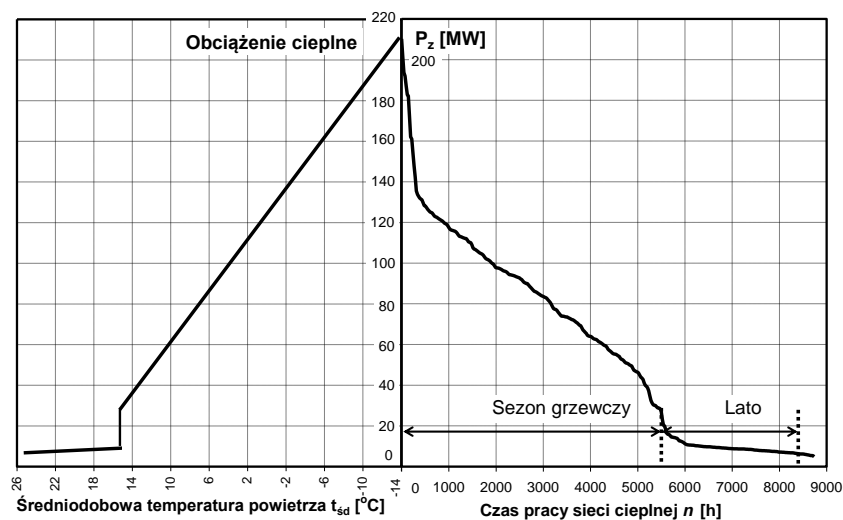
$K_{w\Sigma}$ – sumaryczny uśredniony wskaźnik wykorzystania mocy cieplnej,

$N_{z\Sigma}$ – sumaryczna zamówiona moc cieplna w danej sieci, MW.

Na podstawie bilansu mocy i zmienności temperatury zewnętrznej w sezonie grzewczym można sporządzić roczne wykresy zapotrzebowania na ciepło. Zwykle są to dwa typy wykresów (SZKAROWSKI A. 2012):

- wykres roczny obciążeń cieplnych w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego,
- wykres roczny uporządkowany w zależności od częstotliwości występowania określonej temperatury zewnętrznej.

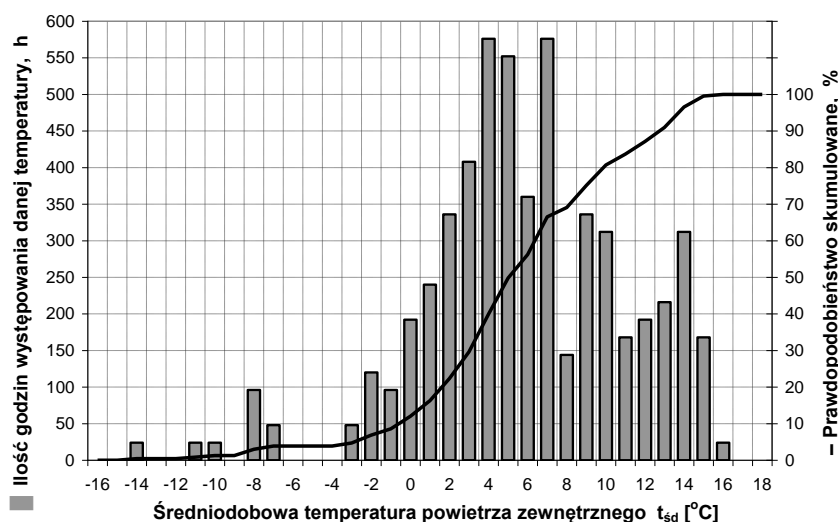
Wykresy te dla danej sieci ciepłowniczej pokazano na rysunku 4



Rys. 4. Uporządkowane roczne wykresy zapotrzebowania na ciepło w miejskiej sieci ciepłowniczej dla sezonu grzewczego 2013/2014

Źródło: opracowanie własne

Do sporządzenia prawej części wykresu niezbędne są dane o długo-trwałości występowania danej temperatury zewnętrznej w ciągu sezonu grzewczego. Odpowiedni rozkład statystyczny dla analizowanej sieci dla danych sezonu 2013/2014 pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Wykres częstotliwości średnich temperatur dobowych dla miejskiej sieci ciepłowniczej w sezonie grzewczym 2013/2014

Źródło: opracowanie własne

Wykresy roczne zapotrzebowania na ciepło stanowią przydatne narzędzie do analizy zagadnień ciepłownictwa: określania parametrów eksploatacji kotłów, czasu pracy ciepłowni, czasu trwania poszczególnych obciążeń cieplnych i harmonogramu dostaw paliwa.

4. Systemy zarządzania pracą sieci ciepłowniczej

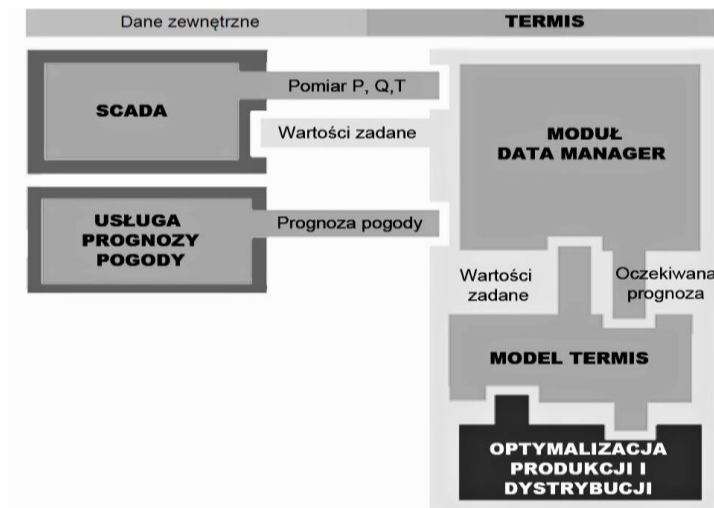
Niezależnie od planowania obciążenia sieci ciepłowniczej dla całego sezonu grzewczego niezbędne jest dostosowanie chwilowej mocy cieplnej systemu do zużycia ciepła w danym okresie czasu przez odbiorców

końcowych. Istotne jest zatem dostarczenie informacji o dobowym profilu zużycia ciepła przez odbiorcę w celu optymalizacji pracy całego systemu ciepłowniczego (JACHURA A. 2015). Wymaga to odpowiedniego opomiarowania sieci ciepłowniczej oraz bieżącej akwizycji zebranych danych w celu ich dalszej analizy i przetwarzania.

W ostatnich latach wraz z rozwojem systemów informatycznych przedsiębiorstwa ciepłownicze zaczęły wykorzystywać specjalistyczne pakiety oprogramowania. Umożliwiają one nie tylko bieżącą kontrolę warunków pracy sieci z wizualizacją ich stanu na bazie programów SCADA, ale również prognozowanie zapotrzebowania na ciepło. Zastosowane modele prognostyczne oparte o sieci neuronowe mogą wykorzystywać na potrzeby uczenia dane historyczne dotyczące całkowitego zapotrzebowania na ciepło po stronie końcowych odbiorców oraz temperaturę otoczenia mierzoną w stacji pogodowej zlokalizowanej na terenie miasta (ALEKSIEJUK P. 2016).

Rozwój pakietów oprogramowania dedykowanych dla sektora ciepłowniczego nie tylko zapewnia bieżącą kontrolę stanu pracy systemów ciepłowniczych, ale daje zupełnie nowe możliwości w zakresie analizy i sterowania ich pracą, a także modelowania stanów statycznych i dynamicznych występujących w realnych systemach ciepłowniczych. Obecnie na rynku dostępnych jest kilka zaawansowanych programów do modelowania i optymalizacji pracy sieci ciepłowniczych m.in. Bentley SisHYD, który jest użytkowany przez dostawców ciepła w krajach skandynawskich oraz program TERMIS testowany w krajowych sieciach ciepłowniczych (RAK A. 2015b).

Schemat funkcjonalny programu TERMIS pokazano na rysunku 6. Niezbędną komunikację i zarządzanie siecią umożliwia moduł *Data Manager*, który korzysta z danych zewnętrznych w postaci informacji o parametrach pracy sieci oraz dotyczących prognozy pogody. Dane z systemów monitoringu i odczytu (SCADA) uzupełnione o prognozę pogody są przekazywane do modelu sieci ciepłowniczej. W oparciu o te informacje system oblicza i symuluje pracę sieci oraz podaje wytyczne dotyczące parametrów jej prowadzenia (wartości zadane).



Rys. 6. Schemat funkcjonalny programu TERMIS

Źródło: <http://www.schneider-electric.com/en/product-range-download/61418-termis-software>

Istotnym blokiem oprogramowania jest moduł *Temperature Optimization*, który pozwala na ograniczenie strat ciepła w sieci przez automatyczną regulację wartości nastawczych temperatur w źródle, przy jednoczesnym zapewnieniu, że temperatura u odbiorcy końcowego spełnia wymagania. Optymalizacja temperatury zasilania z predykcją nastaw uwzględnia energię zakumulowaną w sieci oraz zmiany warunków atmosferycznych wynikające z pogody.

Obecnie na polskim rynku funkcjonują firmy świadczące usługi pomiarowe, badawcze oraz doradcze dotyczące procesów, układów i urządzeń energetycznych, ciepło-mechanicznych, energetyki i ochrony środowiska, a także doradztwo w zarządzaniu procesami inwestycyjnymi i modernizacyjnymi. Projektują one i wdrażają inżynierskie systemy informatyczne, które wspierają efektywną eksploatację układu ciepłowniczego. Tego typu narzędziem jest program do prognozowania zapotrzebowania na ciepło w układzie ciepłowniczym SOPES (System Opty-

malizacji Pracy Elektrowni i Sieci Ciepłych). Celem pakietu oprogramowania jest optymalizacja produkcji energii cieplnej i elektrycznej w jednostkach wytwórczych zasilających system ciepłowniczy, bazująca na prognozowanej wielkości produkcji ciepła dla systemu ciepłowniczego

(http://www.energopomiar.com.pl/grafiki/pdf/KARTA_SOPES.pdf).

5. Podsumowanie

Statystyczne miary zapotrzebowania na ciepło są wykorzystywane w systemach ciepłowniczych do analizy pracy sieci oraz jej eksploatacji. Bieżąca obserwacja warunków atmosferycznych i znajomość charakteru dobowego obciążenia cieplnego sieci są wykorzystywane przez operatorów do ręcznego sterowania mocą w tradycyjnych systemach ciepłowniczych. Jednakże informacje te można z powodzeniem wykorzystać także w algorytmach predykcji wartości zadanych w nowoczesnych układach regulacji automatycznej.

Obecnie w bardziej rozbudowanych systemach ciepłowniczych stosowane są zaawansowane narzędzia informatyczne do monitoringu temperatury zewnętrznej, prognozowania zapotrzebowania na ciepło oraz analizy strat ciepła. Działania te mają na celu identyfikację oraz ocenę parametrów pracy sieci ciepłowniczej wraz z przygotowaniem scenariuszy efektywniejszej eksploatacji w zmiennych warunkach pogodowych.

LITERATURA

1. ALEKSIEJUK P. 2016. *Model prognostyczny zapotrzebowania na ciepło z wykorzystaniem struktur sztucznych sieci neuronowych*. „Instal” 2/2016.
2. CHOMIAK A. 2010. *Poprawa efektywności energetycznej w realizacji celów unijnego pakietu klimatyczno-energetycznego*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa” 5(471).
3. DOPKE J. 2009. *Obliczanie miesięcznej liczby stopniodni grzania*. Dostęp: <https://www.ogrzewnictwo.pl/artykuly/>

4. http://www.energopomiar.com.pl/grafiki/pdfy/KARTA_SOPES.pdf
5. <http://www.schneider-electric.com/en/product-range-download/61418-termis-software>, Termis District Energy Management.
6. JACHURA A., SEKRET R. 2015. *Poprawa wykorzystania mocy cieplnej miejskiego systemu ciepłowniczego poprzez uwzględnienie krótkookresowego zapotrzebowania na ciepło*. „Rynek Energii” 5(102).
7. KUCZYŃSKI T., ZIEMBICKI P. 2012. *Inteligentne systemy ciepłownicze zintegrowane w ramach smart grid*. „Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja” 43/9.
8. RAK A. 2015. *Wybrane aspekty techniczne poprawy efektywności energetycznej miejskiego systemu ciepłowniczego*. Rozdział W/In: *Między ewolucją a rewolucją – w poszukiwaniu strategii energetycznej*. Fundacja na rzecz Czystej Energii Poznań Poznań.
9. RAK A. 2015. *Technologie informatyczne do zarządzania i optymalizacji pracy systemu ciepłowniczego*. ICTECH Katowice.
10. SZKAROWSKI A., ŁATOWSKI L. 2012. *Ciepłownictwo*. WNT Warszawa.