



Politechnika Wrocławska
Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska

*energetyka ciepła,
ciepłownictwo,
ciepła woda użytkowa,
węzeł ciepłowniczy.*

– Praca doktorska –

mgr inż. Michał Fijewski

**Badania pełnoszeregowego węzła ciepłowniczego
okresowo pracującego jako szeregowo-równoległy**

Promotor

prof. dr hab. inż. Janusz Jeżowiecki

Wrocław, czerwiec 2000 r.

Spis treści

SPIS TREŚCI	1
POJĘCIA OGÓLNE [44].....	3
OZNACZENIA.....	5
1. WPROWADZENIE.....	10
1.1. WĘZŁY CIEPŁOWNICZE JAKO MIEJSCA TRANSFORMACJI CIEPŁA.....	10
1.2. WĘZŁY PEŁNOSZEREKOWE (SZEREKOWO-SZEREKOWE) Z ZASOBNIKAMI C.W.U. .	15
1.3. WĘZŁY SZEREKOWO-RÓWNOLEGŁE Z ZASOBNIKAMI C.W.U.	19
1.4. PODSUMOWANIE STANU WIEDZY I KIERUNKÓW PROWADZONYCH BADAŃ	22
2. WĘZŁ PEŁNOSZEREKOWY Z MOŻLIWOŚCIĄ OKRESOWEJ PRACY JAKO SZEREKOWO-RÓWNOLEGŁY	25
2.1. BUDOWA WĘZŁA	25
2.2. ALGORYTM AUTOMATYCZNEJ REGULACJI	26
2.2.1. <i>Funkcje zaworów automatycznej regulacji</i>	26
2.3. ANALIZA PRACY WĘZŁA	29
2.4. FUNKCJA PRIORYTETU CIEPŁEJ WODY UŻYTKOWEJ.....	36
2.5. ZASTOSOWANIE ZASOBNIKÓW CIEPŁEJ WODY	37
3. TEZA PRACY.....	39
4. CEL I ZAKRES PRACY	40
5. BADANIA EKSPLOATACYJNE WĘZŁÓW PEŁNOSZEREKOWYCH Z PRIORYTETEM C.W.U. OKRESOWO PRACUJĄCYCH W UKŁADZIE SZEREKOWO-RÓWNOLEGŁYM.....	41
5.1. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW OBJĘTYCH BADANIAMİ	41
5.1.1. <i>Węzeł ciepłowniczy przy ulicy Grunwaldzkiej 45 w Ustce</i>	41
5.1.2. <i>Węzeł ciepłowniczy SW-0 w Słupsku</i>	42
5.1.3. <i>Węzeł ciepłowniczy SW-1 w Słupsku</i>	42
5.1.4. <i>Węzeł ciepłowniczy SW-2 w Słupsku</i>	42
5.1.5. <i>Węzeł ciepłowniczy SW-3 w Słupsku</i>	43
5.1.6. <i>Węzeł ciepłowniczy SW-4 w Słupsku</i>	43
5.1.7. <i>Węzeł ciepłowniczy SW-5 w Słupsku</i>	43

5.1.8.	<i>Zestawienie podstawowych urządzeń i wielkości badanych węzłów ciepłowniczych (tabela 5.1.)</i>	44
5.2.	METODYKA OPRACOWANIA WYNIKÓW POMIARÓW	46
5.2.1.	<i>Opomiarowanie węzłów</i>	46
5.2.2.	<i>Równania strumienia przepływu wody</i>	47
5.2.3.	<i>Równania strumienia ciepła</i>	49
5.3.	ANALIZA METROLOGICZNA PRZEPROWADZONYCH POMIARÓW	51
5.4.	BADANIA POBORU CIEPŁEJ WODY UŻYTKOWEJ	55
5.4.1.	<i>Dane pomiarowe</i>	55
5.4.2.	<i>Nierównomierność dobowego poboru ciepłej wody użytkowej</i>	56
5.4.3.	<i>Dobowy pobór ciepłej wody użytkowej</i>	70
5.4.4.	<i>Ocena wielkości dobowego zużycia ciepłej wody użytkowej</i>	76
5.4.5.	<i>Zużycie ciepłej wody użytkowej w cyklu rocznym</i>	79
5.4.6.	<i>Ocena dobowego zużycia wody ciepłej w okresie wakacyjnym</i>	82
5.4.7.	<i>Tygodniowy pobór ciepłej wody użytkowej</i>	83
5.4.8.	<i>Podsumowanie badań zużycia ciepłej wody użytkowej przez odbiorców zasilanych z dwufunkcyjnych węzłów ciepłowniczych SW-1, SW-3 i SW-5</i>	91
5.5.	BADANIA ZMIENNOŚCI STRUMIENIA WODY SIECIOWEJ	93
5.5.1.	<i>Wartości wskaźnikowe ciepłej wody użytkowej</i>	93
5.5.2.	<i>Określenie pojęcia współczynnika nierównomierności strumienia wody sieciowej K_{WS}</i>	94
5.5.3.	<i>Badanie dobowej nierównomierności strumienia wody sieciowej</i>	99
6.	TEORETYCZNY MODEL ZMODYFIKOWANEGO WĘZŁA CIEPŁOWNICZEGO	123
6.1.	PROBLEM MATEMATYCZNEGO MODELOWANIA PROCESÓW W WĘZŁE CIEPŁOWNICZYM	123
6.2.	MODEL ZJAWISK CIEPLNYCH I HYDRAULICZNYCH	124
6.3.	MODEL DZIAŁANIA UKŁADU ZAWORÓW AUTOMATYCZNEJ REGULACJI	125
7.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI	130
7.1.	WNIOSKI O CHARAKTERZE POZNAWCZYM	132
7.2.	WNIOSKI O CHARAKTERZE UTYLITARNYM	133
	LITERATURA	134

Pojęcia ogólne [35]

Przedsiębiorstwo ciepłownicze – przedsiębiorstwo energetyczne prowadzące działalność gospodarczą w zakresie przesyłania i dystrybucji ciepła za pomocą sieci ciepłowniczej.

Źródło ciepła – połączone ze sobą urządzenia lub instalacje, służące do wytwarzania ciepła dostarczanego do sieci ciepłowniczej.

Sieć ciepłownicza – połączone ze sobą urządzenia lub instalacje, służące do przesyłania i dystrybucji ciepła ze źródeł ciepła do obiektów, należące do przedsiębiorstwa ciepłowniczego.

Przyłącze – odcinek sieci ciepłowniczej łączący źródło ciepła z tą siecią lub odcinek sieci ciepłowniczej doprowadzający ciepło wyłącznie do jednego węzła ciepłowniczego.

Węzeł ciepłowniczy – połączone ze sobą urządzenia lub instalacje, służące do zmiany rodzaju lub parametrów nośnika ciepła dostarczanego z sieci ciepłowniczej oraz regulacji ilości ciepła dostarczanego do instalacji odbiorczych.

Grupowy węzeł ciepłowniczy – węzeł ciepłowniczy, z którym połączone są instalacje odbiorcze obsługujące więcej niż jeden budynek.

Instalacja odbiorcza – połączone ze sobą urządzenia lub instalacje, służące do transportowania ciepła lub ciepłej wody z węzłów ciepłowniczych do odbiorników ciepła lub punktów poboru ciepłej wody użytkowej w budynkach.

Zamówiona moc cieplna – największy pobór ciepła dostarczanego w postaci określonego nośnika ciepła, jaki może wystąpić w warunkach obliczeniowych dla wszystkich rodzajów potrzeb cieplnych przez okres co najmniej 1 godziny.

Warunki obliczeniowe – obliczeniowa temperatura powietrza atmosferycznego określona dla strefy klimatycznej, w której zlokalizowane są obiekty, do których dostarczane jest ciepło lub temperatura wody użytkowej.

Obliczeniowe natężenie przepływu nośnika ciepła – największe natężenie przepływu nośnika ciepła odpowiadające zamówionej mocy ciepłej i parametrom nośnika ciepła określonym w tabeli regulacyjnej dla warunków obliczeniowych.

Wykres regulacyjny – przedstawiona w postaci tabeli lub na wykresie zależność temperatury nośnika ciepła od warunków atmosferycznych.

Sezon ogrzewczy – okres między wrześniem a majem roku następnego, w którym warunki atmosferyczne powodują konieczność ciągłego dostarczania ciepła na cele ogrzewania budynków.

Oznaczenia

τ -	czas, h,
φ -	współczynnik akumulacji,
ψ -	współczynnik redukcji mocy cieplnej wymienników c.w.u.,
Δg_s -	względny dodatkowy strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła ciepłowniczego ze względu na obniżenie temperatury zasilającej wody sieciowej,
$\Delta g_s^{\max}$ -	względny dodatkowy strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła ciepłowniczego ze względu na pracę wymienników II stopnia przy maksymalnym godzinowym poborze c.w.u.,
$\Delta g_s^{\text{śr}}$ -	względny dodatkowy strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła ciepłowniczego ze względu na pracę wymienników II stopnia przy średnim godzinowym poborze c.w.u.,
Δg_s^{zas} -	względny dodatkowy strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła ciepłowniczego ze względu na pracę wymienników II stopnia przy poborze c.w.u. i zastosowaniu zasobników c.w.u.,
Δp_{CO} -	spadek ciśnienia w instalacji centralnego ogrzewania, kPa,
Δp_{dysp} -	dyspozycyjna różnica ciśnień przed węzłem ciepłowniczym, kPa,
Δp_{Vco} -	spadek ciśnienia w zaworze regulacyjnym centralnego ogrzewania, kPa,
Δp_{Vcw} -	spadek ciśnienia w zaworze regulacyjnym ciepłej wody użytkowej, kPa,
$\Delta p_{\text{węzła}}$ -	dyspozycyjna różnica ciśnień w węźle ciepłowniczym, kPa,
Δp_{wymI} -	spadek ciśnienia w wymienniku ciepłej wody I stopnia, kPa,
Δp_{wymII} -	spadek ciśnienia w wymienniku ciepłej wody II stopnia, kPa,
Δp_{ZRC} -	spadek ciśnienia w zaworze różnicy ciśnień, kPa,
Δt_{ekI} -	ekonomiczny przyrost temperatury w wymiennikach I stopnia, °C,

η_w -	sprawność węzła ciepłowniczego,
c_w -	ciepło właściwe wody, kJ/(kg·K),
g_s -	względny strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła ciepłowniczego,
$g_s^{\max}$ -	względny strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła ciepłowniczego przy maksymalnym godzinowym poborze c.w.u.,
$g_s^{\text{śr}}$ -	względny strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła ciepłowniczego przy średnim godzinowym poborze c.w.u.,
g_s^{zas} -	względny obniżony strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła ciepłowniczego przy zastosowaniu zasobników c.w.u.,
g_s^{co} -	względny strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła ciepłowniczego na potrzeby centralnego ogrzewania,
$g_s^{\text{co-R}}$ -	względny rzeczywisty strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła ciepłowniczego na potrzeby centralnego ogrzewania,
n -	liczba mieszkańców,
t_c -	temperatura wody cyrkulacyjnej, °C,
t_{cw} -	temperatura ciepłej wody użytkowej, °C,
t_{cwl} -	temperatura ciepłej wody użytkowej za wymiennikiem I stopnia, °C,
t_{cwz1} -	temperatura ciepłej wody w w górnej części zasobnika, °C,
t_{cwz2} -	temperatura ciepłej wody w w dolnej części zasobnika, °C,
t_e -	temperatura powietrza zewnętrznego, °C,
t'_e -	obliczeniowa temperatura powietrza zewnętrznego, °C,
t_i -	temperatura powietrza wewnątrz ogrzewanych budynków, °C,
t_p -	temperatura wody instalacyjnej centralnego ogrzewania na powrocie, °C,
t'_p -	obliczeniowa temperatura wody instalacyjnej centralnego ogrzewania na powrocie, °C,

t_z	temperatura wody instalacyjnej centralnego ogrzewania na zasilaniu, °C,
t'_z	obliczeniowa temperatura wody instalacyjnej centralnego ogrzewania na zasilaniu, °C,
t_{zw}	temperatura wody zimnej, °C,
A_{cw}	udział zapotrzebowania na ciepło do przygotowania ciepłej wody użytkowej,
G_{co}	strumień wody instalacyjnej centralnego ogrzewania, kg/s, m ³ /h,
G_{cw}	strumień ciepłej wody użytkowej, kg/s, m ³ /h,
$G_{cw}^{max,h}$	maksymalny godzinowy strumień ciepłej wody użytkowej, kg/s, m ³ /h,
$G_{cw}^{sr,h}$	średni godzinowy strumień ciepłej wody użytkowej, kg/s, m ³ /h,
G_s	strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła ciepłowniczego, kg/s, m ³ /h,
G_s^{co}	strumień wody sieciowej na potrzeby centralnego ogrzewania, kg/s, m ³ /h,
G_s^{cw}	strumień wody sieciowej na potrzeby c.w.u., kg/s, m ³ /h,
G_s^{max}	maksymalny strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła, kg/s, m ³ /h,
$G_s^{sr,h}$	strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła obniżony przez obecność zasobników, kg/s, m ³ /h,
G_s^{zas}	strumień wody sieciowej doprowadzany do węzła przy średnim godzinowym poborze ciepłej wody użytkowej, kg/s, m ³ /h,
K_h	godzinowy współczynnik nierównomierności poboru c.w.u.,
P_1	ciśnienie na wejściu do węzła po stronie wody sieciowej, kPa,
P_2	ciśnienie na wyjściu z węzła po stronie wody sieciowej, kPa,
P_3	ciśnienie na zasilaniu instalacji centralnego ogrzewania, kPa,
P_4	ciśnienie na powrocie instalacji centralnego ogrzewania, kPa,

Q_{bud}	-	dodatkowe zyski (straty) ciepła w ogrzewanych budynkach, kW,
Q_{co}	-	zapotrzebowanie ciepła na ogrzewanie budynków, kW,
Q_{cw}	-	zapotrzebowanie ciepła na podgrzanie ciepłej wody użytkowej, kW,
Q_{cwI}	-	moc cieplna wymiennika c.w.u. I stopnia, kW,
$Q_{cw}^{max,h}$	-	maksymalne godzinowe zapotrzebowanie na moc cieplną do przygotowania ciepłej wody użytkowej, kW,
Q_{strat}^{cw}	-	straty ciepła w układzie ciepłej wody użytkowej, kW,
Q_w	-	całkowite zapotrzebowanie na ciepło przez węzeł ciepłowniczy,
RW	-	rodzaj węzła ciepłowniczego,
T_z^{max}	-	maksymalna temperatura wody sieciowej na zasilaniu, °C,
T_z^{min}	-	minimalna temperatura wody sieciowej na zasilaniu, °C,
T_p	-	temperatura wody sieciowej na powrocie za węzłem ciepłowniczym, °C,
T_p^o	-	obliczeniowa temperatura wody sieciowej na powrocie za węzłem ciepłowniczym, °C,
T_z	-	temperatura wody sieciowej na zasilaniu przed węzłem ciepłowniczym, °C,
T_z^o	-	obliczeniowa temperatura wody sieciowej na zasilaniu przed węzłem ciepłowniczym, °C,
T_z^R	-	rzeczywista temperatura wody sieciowej na zasilaniu przed węzłem ciepłowniczym, °C,
V_{zas}	-	objętość zasobników ciepłej wody użytkowej, dm ³ ,

Oznaczenia na schematach

KR	-	kryza dławiąca,
V_{CW}	-	zawór automatycznej regulacji ciepłej wody użytkowej,
V_{CW2}	-	zawór automatycznej regulacji ciepłej wody użytkowej,

V_{CO} -	zawór automatycznej regulacji centralnego ogrzewania,
V_{CO2} -	zawór automatycznej regulacji centralnego ogrzewania na obejściu kryzy,
W_1 -	wodomierz wody sieciowej na wyjściu z węzła,
W_2 -	wodomierz ciepłej wody użytkowej,
PC -	pompa cyrkulacyjna,
$PŁ$ -	pompa ładująca zasobnik ciepła,
PO -	pompa obiegowa układu centralnego ogrzewania,
Z_{RR} -	zawór ręczny regulacyjny,
Z_Z -	zawór zwrotny,

1. Wprowadzenie

1.1. Węzły ciepłownicze jako miejsca transformacji ciepła

W zdalaczynnych systemach ciepłych spotyka się wiele rozwiązań konstrukcyjnych węzłów ciepłowniczych. W zależności od potrzeb odbiorców oraz sposobu dostarczenia ciepłej wody użytkowej można je podzielić na jedno- i dwufunkcyjne. Z ekonomicznego punktu widzenia najbardziej efektywne są układy skojarzonej transformacji ciepła na cele centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej, czyli węzły dwufunkcyjne. Procesy cieplno-hydrauliczne, jakie zachodzą w ich obrębie, mogą być osiągane przy różnej sprawności energetycznej. Decydują o niej zarówno rozwiązania techniczno-konstrukcyjne węzła, jak i własności regulacyjne stosowanych urządzeń automatycznej regulacji. O złożoności problemu mogą świadczyć zależności funkcyjne, jakie występują w obrębie węzła ciepłowniczego pomiędzy poszczególnymi procesami cieplno-hydraulicznymi:

$$G_s = f(Q_{co}, Q_{cw}, RW) \quad / 1.1/$$

$$G_s^{co} = f(Q_{co}, Q_{bud}) \quad / 1.2/$$

$$G_s^{cw} = f(Q_{cw}, Q_{strat}^{cw}) \quad / 1.3/$$

$$T_z = f(\tau, t_e) \quad / 1.4/$$

$$T_p = f(\tau, t_e, RW, \eta_w) \quad / 1.5/$$

$$t_z = f(\tau, t_e, G_{co}) \quad / 1.6/$$

$$t_p = f(\tau, t_e, G_{co}, Q_{bud}) \quad / 1.7/$$

Jednym z głównych parametrów oceny systemu ciepłowniczego jest zmienność strumienia wody grzewczej transportowanej przez sieci ciepłne. Jest ona odzwierciedleniem (superpozycją) strumienia ciepła dostarczanego do różnego rodzaju odbiorców i na różne cele. Wiadomo, że głównymi odbiorcami ciepła z miejskich sieci ciepłowniczych są budynki mieszkalne i użyteczności publicznej, a więc przede wszystkim potrzeby centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej. Duże obiekty przemysłowe zasilane są w ciepło albo z własnych ciepłowni technologicznych, albo odrębnymi magistralami technologicznymi. Dlatego udział ciepła na cele przemysłowe w całkowitej ilości energii cieplnej transportowanej sieciami ciepłnymi jest stosunkowo nieduży.

Jeżeli strumień ciepła jest dostarczany do odbiorców według centralnej regulacji jakościowej (najczęstszy ze sposobów), realizowanej zgodnie z wykresem regulacyjnym, to zmienność strumienia wody sieciowej wywołują jedynie węzły ciepłownicze z centralnym przygotowaniem ciepłej wody użytkowej - głównie węzły dwufunkcyjne: c.o. - c.w.u. Przy stałych parametrach obliczeniowych wody sieciowej o strumieniu wody krążącej w układzie decydować będzie:

- średniodobowe zapotrzebowanie wody sieciowej dla potrzeby ciepłej wody,
- zapotrzebowanie wody sieciowej w okresach maksymalnego poboru wody ciepłej.

Z punktu widzenia jakości pracy sieci ciepłowniczej najkorzystniejszym węzłem byłby taki, który zapewni stały przepływ wody sieciowej niezależnie od dynamiki poboru ciepłej wody użytkowej i zmian temperatur zewnętrznych. Założenie to, według ustaleń teoretycznych, spełniać powinien każdy węzeł dwustopniowy z zasobnikiem, a także układ pełnoszeregowy bez akumulacji po stronie ciepłej wody użytkowej [7]. Ich istotną zaletą jest wykorzystywanie temperatury wody powrotnej z instalacji centralnego ogrzewania, co znacznie zmniejsza strumień wody sieciowej, a także w przypadku współpracy z elektrociepłownią podnosi sprawność wytwarzania energii cieplnej. Dodatkowo jeszcze, obecność zasobników ciepłej wody pozwala na złagodzenie niekorzystnego

wplywu zmiennego w czasie poboru ciepłej wody na temperaturę wody sieciowej i jej strumień.

Spotka się też inny sposób podejścia do skojarzonych węzłów ciepłej wody i centralnego ogrzewania. Zastosowano zamiast zasobników ciepłej wody układy jednostopniowe równoległe o mocy wymiennika ciepłej wody ok. trzykrotnie większej od faktycznie potrzebnej. Rozwiązanie takie pozwala na podgrzanie ciepłej wody niezależnie od jej poboru praktycznie bez jakiejkolwiek automatycznej regulacji. Uzyskano w ten sposób znaczne uproszczenie budowy dwufunkcyjnych węzłów (jeden wymiennik, brak automatyki), ale związane jest to z dużymi nakładami finansowymi. Praca węzła ciepłowniczego z tak przewymiarowanym wymiennikiem c.w.u. powoduje konieczność zagwarantowania i dostarczania wymaganej (obliczeniowej) ilości ciepła w wodzie sieciowej. Przyczynia się to do znacznego przewymiarowania przewodów sieci ciepłowniczej i różnego rodzaju urządzeń oraz powoduje bardzo duże wahania przepływu wody grzejnej. Jest to zjawisko niekorzystne ze względu na stabilność pracy całego systemu ciepłowniczego. Tego typu węzły nie powinny być więc stosowane.

Układ dwufunkcyjnego węzła ciepłowniczego zaproponowany w pracy [30] jest kolejnym przykładem odmiennego rozwiązania skojarzonej transformacji ciepła na cele centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej. Autorzy proponują podgrzewanie wody ciepłej wodą instalacyjną c.o. wykorzystując wymiennik pojemnościowy lub przepływowy z zasobnikiem. Rozwiązanie to z założenia wymaga stosowania urządzeń automatycznej regulacji pozwalających realizować pełny priorytet przygotowania c.w.u. względem instalacji c.o. Uzyskuje się w sposób zamierzony wykorzystanie akumulacyjności cieplnej budynku w czasie ładowania zasobnika ciepłej wody. Układ ten od strony wody sieciowej jest jednak tylko jednofunkcyjnym węzłem centralnego ogrzewania lub przygotowania ciepłej wody użytkowej.

Tak więc można uznać, że zdalaczynne sposoby zasilania w ciepło odbiorców komunalnych ze źródeł typu elektrociepłownia wymuszają ograniczenie stosowania węzłów ciepłowniczych do dwu typów. Najbardziej rozpowszechnionymi i

najchętniej stosowanymi są układy dwustopniowe szeregowo-równoległe i szeregowo-szeregowe (pełnoszeregowe) z zasobnikami ciepłej wody użytkowej lub bez nich.

Stosowanie zasobników ciepłej wody użytkowej jest uzależnione od typu odbiorcy i charakteru poboru ciepłej wody. Oczywiście, im zapotrzebowanie na c.w.u. jest bardziej zróżnicowane w czasie, a także im większy jest udział ciepłej wody w całkowitym zapotrzebowaniu na energię cieplną, tym zastosowanie układów akumulacyjnych po stronie ciepłej wody użytkowej jest działaniem skierowanym na poprawę stabilności i ekonomiki pracy systemu ciepłowniczego [7],[18],[19].

Pobór ciepłej wody w budynkach mieszkalnych ma charakter chwilowy i losowy [3],[16],[24],[26],[42]. Zużycie wody uzależnione jest od wielu czynników takich, jak pora roku, dzień tygodnia, godzina doby, emisja telewizyjna, sposób rozliczenia jej zużycia i wiele innych. Można je podzielić na dwie grupy. Pierwszą, związaną z obiektem (budynkiem), drugą związaną z odbiorcą (mieszkańcem budynku). Wszystkie są ze sobą związane w różnych zależnościach występujących w funkcji czasu i w różny sposób oddziałują na zużycie ciepłej wody. Przeprowadzone badania i uzyskane w ich realizacji dane pomiarowe [2],[11],[15],[20],[28],[29] pozwalają na wyróżnienie okresów o zdecydowanie różnych wielkościach poboru wody w ciągu doby. Zauważa się także zmianę charakteru poboru ciepłej wody użytkowej w ciągu tygodnia oraz roku, ponadto szczyty w ciągu roku (Wielkanoc, Boże Narodzenie, Sylwester), jak i dnia (szczyty poranne i wieczorne). Niezaprzeczalnym staje się także fakt, iż wprowadzenie wodomierzy mieszkaniowych dających możliwość rozliczenia za faktycznie zużytą wodę jest czynnikiem znacznie ograniczającym wielkość zapotrzebowania na c.w.u. Redukcja zużycia wody z tego powodu sięga nawet 40% [6],[14],[41] w stosunku do zużycia wody w obiektach, w których rozliczenie odbywa się w oparciu o ryczałt.

Dynamika poboru ciepłej wody użytkowej oddziałuje na urządzenia centralnego przygotowania c.w.u., które muszą być ciągle gotowe do dostarczenia wymaganego strumienia wody o odpowiedniej temperaturze. Istnieje zatem konieczność zapewnienia odpowiedniej mocy cieplnej urządzeń grzewczych oraz

sprawnej cyrkulacji ciepłej wody użytkowej. Ten stan ciągłej gotowości powoduje konieczność zapewnienia dostatecznego strumienia energii cieplnej do ogrzania wody przy maksymalnym jej poborze, a także do pokrycia znacznych strat ciepła urządzeń i rurociągów do otoczenia, których wielkość nie jest dokładnie znana. Świadczą o tym zarówno wyniki badań instalacji c.w.u. np. [6],[14],[23], wykazujące, że straty ciepła wahają się od 23 do 30% ilości ciepła dostarczonego do węzła c.w.u., jak i kilkakrotnie zmieniające się urzędowe maksymalne wskaźniki zużycia energii cieplnej na przygotowanie ciepłej wody ogłaszane przez Ministra Finansów (23.01.96 - 0,191 GJ/m³, 12.04.96 - 0,205 GJ/m³, 9.06.97 - 0,242 GJ/m³) [21].

Powszechne stosowanie urządzeń automatycznej regulacji oraz programatorów pozwala na jeszcze bardziej racjonalną pracę skojarzonego dostarczania ciepła na cele c.o. i c.w.u. w ramach dwufunkcyjnych węzłów ciepłowniczych. Również różne rozwiązania konstrukcyjno-techniczne umożliwiają równoważenie i łagodzenie nierównomierności przepływów wody sieciowej w węźle, przez co zmniejsza się jej faktyczne zużycie.

Ze względu na bardzo szeroki zakres problemów związanych z funkcjonowaniem różnych typów węzłów ciepłowniczych dalsze rozważania ograniczono do układów dwufunkcyjnych z dwustopniowym przygotowaniem ciepłej wody użytkowej z zasobnikiem.

Istnienie i wielkość zasobnika mają istotny wpływ na pracę systemu ciepłowniczego. Objętość zasobnika i moce cieplne wymienników ciepłej wody są od siebie zależne. Z dużymi zdolnościami akumulacyjnymi węzła wiąże się bardziej stabilny przepływ wody sieciowej, a więc i bardziej wyrównana eksploatacja całego systemu ciepłowniczego. Jest to jeden z najważniejszych elementów decydujących o ekonomice pracy systemu ciepłowniczego, przyczyniający się m.in. do równomiernej pracy jednostek kotłowych, zestawów pompowych.

Z uwagi na zastosowanie akumulacji ciepła po stronie ciepłej wody użytkowej możemy wyróżnić układy o pełnej lub ograniczonej akumulacyjności. Pod pojęciem węzła o pełnej akumulacyjności rozumieć należy [7] taki węzeł, w którym objętość zasobników może zapewnić stały przepływ wody sieciowej przez

węzeł oraz jej stałą temperaturę za węzeł przy zmiennym poborze ciepłej wody. Węzeł taki przyjmuje wszystkie wahania przepływu wody ciepłej, co pozwala na utrzymanie stałego zapotrzebowania wody sieciowej dopływającej do węzła. Zapewnienie pełnej akumulacyjności związane jest z przyjęciem najmniejszego z możliwych wymienników ciepła c.w.u. oraz największego zasobnika wody ciepłej. Z powodu konieczności zagwarantowania bardzo dużych powierzchni do ustawienia zasobników wody ciepłej oraz związanych z tym wysokich kosztów inwestycyjnych, a także poważnych kłopotów związanych z okresową koniecznością ich wymiany, układy o pełnej akumulacyjności nie znalazły w dzisiejszej praktyce ciepłowniczej szerszego zastosowania.

Inaczej problem wygląda w przypadku węzłów o ograniczonej akumulacyjności, gdzie zasobnik ciepła nie może zapewnić stałości zapotrzebowania wody sieciowej oraz jej temperatur za węzeł przy zmiennym poborze c.w.u. Przyjęcie zasobnika ciepłej wody mniejszego niż ten z układu o pełnej akumulacyjności, wymaga, dla zapewnienia bilansu cieplnego, zastosowania odpowiednio większych wymienników ciepła, a co za tym idzie i zapewnienia zwiększonego dopływu wody sieciowej. Oznacza to, że im mniejszy będzie zasobnik wody ciepłej (mniejsza akumulacyjność układu c.w.u.) tym większy będzie wpływ chwilowych zmian poboru ciepłej wody na wielkość wahań strumienia wody grzewczej. Pomimo tego, z przyczyn wyżej już wspomnianych, dwufunkcyjne węzły ciepłownicze o ograniczonej akumulacyjności znalazły szerokie zastosowanie w obecnie funkcjonujących systemach ciepłowniczych.

Z literatury, m.in. [13],[16],[19],[36] znanych jest wiele zależności na obliczanie wielkości zasobników i wymienników c.w.u. Ich analiza i wybór najwłaściwszych nie leży w zakresie prezentowanej pracy i dlatego je pominięto.

1.2. Węzły pełnoszeregowe (szeregowo-szeregowe) z zasobnikami c.w.u.

Idea rozwiązania konstrukcyjnego węzła szeregowo-szeregowego (rys. 1.1.) opiera się na koncepcji wykorzystania naturalnej akumulacyjności cieplnej budynku. Zakłada ona, że bezwładność cieplna ogrzewanego obiektu ma wystarczające

[illegible]

Wykorzystanie właściwości akumulacyjnych budynków w chwilach szczytowych poborów ciepłej wody użytkowej zmniejsza faktyczny chwilowy pobór energii cieplnej dostarczanej do centrali. W wyniku „pożyczek” wody grzejnej na cele c.o. do układu c.w.u. zmniejsza się obliczeniowe zapotrzebowanie ciepła przez węzeł. Umożliwia to zarazem zmniejszenie wielkości strumienia wody sieciowej dopływającej do węzła, a więc i masy wody krążącej w całym systemie ciepłowniczym. W rezultacie pozwala to na ograniczenie kosztów produkcji i dystrybucji ciepła poprzez obniżenie mocy cieplnej źródła ciepła, niższego zużycia energii elektrycznej do napędu pomp obiegowych, itp. Końcowy odbiorca energii cieplnej otrzymuje ją po niższych cenach.

- 16 -

ogrzewania i dodatkowego strumienia wody sieciowej przepływającego przez wymiennik c.w.u. II stopnia [16]:

$$\mathbf{G}_s = \mathbf{G}_s^{\text{CO}} + \mathbf{G}_s^{\text{CW}} \quad / 1.8 /$$

gdzie:

$$\mathbf{G}_s^{\text{CO}} = \frac{\mathbf{Q}_{\text{CO}}}{(\mathbf{T}_1 - \mathbf{T}_2) \cdot \mathbf{c}_w} \quad / 1.9 /$$

oraz

$$\mathbf{G}_s^{\text{CW}} = \frac{\mathbf{Q}_{\text{CW}}^{\text{max,h}} \cdot \psi - \mathbf{Q}_{\text{CW}}^{\text{I}}}{\mathbf{K}_h \cdot (\mathbf{T}_1^{\text{min}} - \mathbf{T}_2) \cdot \mathbf{c}_w} \quad / 1.10 /$$

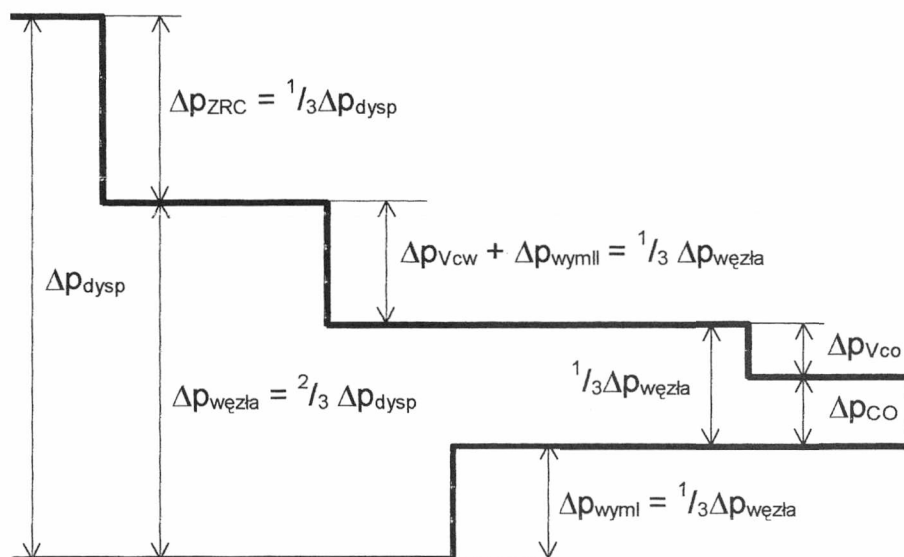
Dodatkowe zastosowanie w tych układach zasobników ciepłej wody daje większe możliwości tłumienia wahań obciążenia cieplnego (strumienia wody grzewczej) wywołanych zmiennym poborem wody ciepłej dzięki pojemności cieplnej zasobnika oraz bezwładności cieplnej budynku. W ten sposób w węzłach tych wielkość zakłócenia pracy instalacji centralnego ogrzewania jest mniejsze niż w przypadku układów pełnoszeregowych bezzasobnikowych. Występujący we wzorze 1.10 współczynnik redukcji ψ przyjmuje wówczas wartości mniejsze od 1 (dla węzłów bezzasobnikowych $\psi=1$).

Węzły szeregowo-szeregowe z zasobnikiem, lub bez niego, pracują poprawnie przez dużą część sezonu grzewczego, a dokładniej, wtedy kiedy temperatura zewnętrzna jest niższa od temperatury załamania wykresu regulacyjnego. Przy wysokich temperaturach zewnętrznych, szczególnie na początku i końcu sezonu grzewczego, gdy temperatury wody sieciowej utrzymywane są na stałym poziomie oraz przy wysokim zapotrzebowaniu na ciepłą wodę, konstrukcja tego węzła wymusza konieczność przegrzewania budynków. Jest ona wynikiem zawyżenia temperatury wody kierowanej do instalacji centralnego ogrzewania. Regulacja automatyczna węzła nie jest bowiem w stanie pogodzić ze sobą dwóch

sprzecznych wymagań: zwiększonego przepływu wody grzewczej z racji zapotrzebowania na ciepłą wodę oraz zmniejszonego przepływu wody grzewczej wynikającego z chwilowego zapotrzebowania ciepła do ogrzewania budynków. Jest to podstawowa wada węzłów ciepłowniczych pracujących w układzie szeregowo-szeregowym.

Zapewnienie właściwej hydraulicznie pracy węzła wymaga przyjęcia poprawnego rozkładu ciśnień w jego obrębie. Można to realizować już na etapie projektowania. Mając określone ciśnienie dyspozycyjne w sieci można dokładnie określić wymagany spadek ciśnienia na poszczególnych elementach węzła ciepłowniczego. Poprawny rozkład ciśnienia zapewniający poprawne własności regulacyjne zaworów automatycznej regulacji pokazano na wykresie (rys. 1.2.).

Prowadzenie pełnoszeregowych węzłów ciepłowniczych z zachowaniem priorytetu ciepłej wody użytkowej powinno realizować przesunięcie w czasie dostarczania ciepła na cele centralnego ogrzewania do układu ciepłej wody, przyczyniając się do łagodzenia wielkości zmian przepływu wody sieciowej. W rzeczywistości jednak, jak wykazują przeprowadzane badania nad tego typu centralami [4],[5],[30],[31],[33], stateczność cieplna budynków jak i akumulacyjność cieplna zasobników wody ciepłej w wielu węzłach tego typu wykorzystywana jest w niewielkim stopniu, lub w ogóle. Powoduje to niekorzystne i nie zgodne z projektowymi przebiegi zmian temperatury i wielkości strumienia masy wody sieciowej dopływającej do węzła ciepłowniczego. Sytuacja taka powstaje w przypadku przewymiarowania węzła od strony potrzeb centralnego ogrzewania, zbyt małego udziału ciepła dla potrzeb ciepłej wody użytkowej w stosunku do c.o., czy stosowania zbyt dużych pomp ładująco-cyrkulacyjnych. Przyczyny niewłaściwej pracy węzłów szeregowo-szeregowych pogłębiają się z powodu szeroko rozpowszechnionych prac termorenowacyjnych istniejących budynków zmniejszających znacznie ich potrzeby cieplne oraz mniejszego poboru c.w.u. ograniczanego indywidualnym opomiarowaniem jej zużycia. Konieczna wydaje się więc być dokładna weryfikacja nowych obciążeń cieplnych instalacji centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej zasilanych z węzłów ciepłowniczych tego typu.



Rys. 1.2. Wstępny rozkład ciśnienia w dwufunkcyjnym pełnoszeregowym węźle ciepłowniczym.

Uzyskane wyniki potwierdzają także podstawową wadę układów pełnoszeregowych, a mianowicie, że w okresach przejściowych, przy dość wysokiej temperaturze zewnętrznej, występuje wyraźne przegrzewanie budynków w wyniku niezachowania parametrów wykresu regulacyjnego centralnego ogrzewania [37] Ponadto wykazują, że w godzinach nocnych następuje znaczne podwyższenie temperatury wody sieciowej powracającej z węzła, co tłumaczy brak poboru ciepłej wody [31].

1.3. Węzły szeregowo-równoległe z zasobnikami c.w.u.

Najprostsze dwufunkcyjne węzły ciepłownicze pracujące w układzie jednostopniowym równoległym cechują się poza swoją prostotą budowy i niskimi nakładami inwestycyjnymi bardzo poważnymi wadami, które znacznie ograniczają ich stosowanie w scentralizowanych systemach ciepłowniczych. Do podstawowych wad należy zaliczyć:

- bardzo duże wahania przepływu wody sieciowej spowodowane nierównomiernością poboru c.w.u.,
- brak dochłodzenia powrotnej wody sieciowej,

- znaczne obliczeniowe zapotrzebowanie na wodę sieciową dopływającą do węzła liczone w oparciu o maksymalne zapotrzebowanie na wodę ciepłą.

Uzupełnienie układu wymiennikiem c.w.u. I stopnia włączonego szeregowo w przewód powrotny z instalacji centralnego ogrzewania oraz zastosowanie zasobników wody ciepłej stworzyło konstrukcję najbardziej popularną w polskich systemach ciepłowniczych - węzeł szeregowo-równoległy z zasobnikiem (rys. 1.3.). Układ ten, w porównaniu z pierwowzorem, dwukrotnie zmniejsza obliczeniowe zapotrzebowanie wody sieciowej [16] dzięki zastosowaniu wymiennika I stopnia o średniej mocy ok. 50% całkowitego zapotrzebowania na ciepło do przygotowania c.w.u. Wymiennik ten dodatkowo obniża temperaturę wody powrotnej w sieci ciepłowniczej podnosząc w ten sposób sprawność źródła ciepła (elektrociepłownia). Zastosowany zasobnik wody ciepłej ogranicza wpływ poboru ciepłej wody na chwilową moc wymiennika c.w.u. II stopnia włączonego równoległe do sieci ciepłowniczej. Stanowi on ochronę (bufor) sieci ciepłej przed dużymi zmianami przepływu wody grzewczej wywołanymi nierównomiernością poboru ciepłej wody. Wymagany strumień wody sieciowej jaki musi dopłynąć do węzła wynosi [16]:

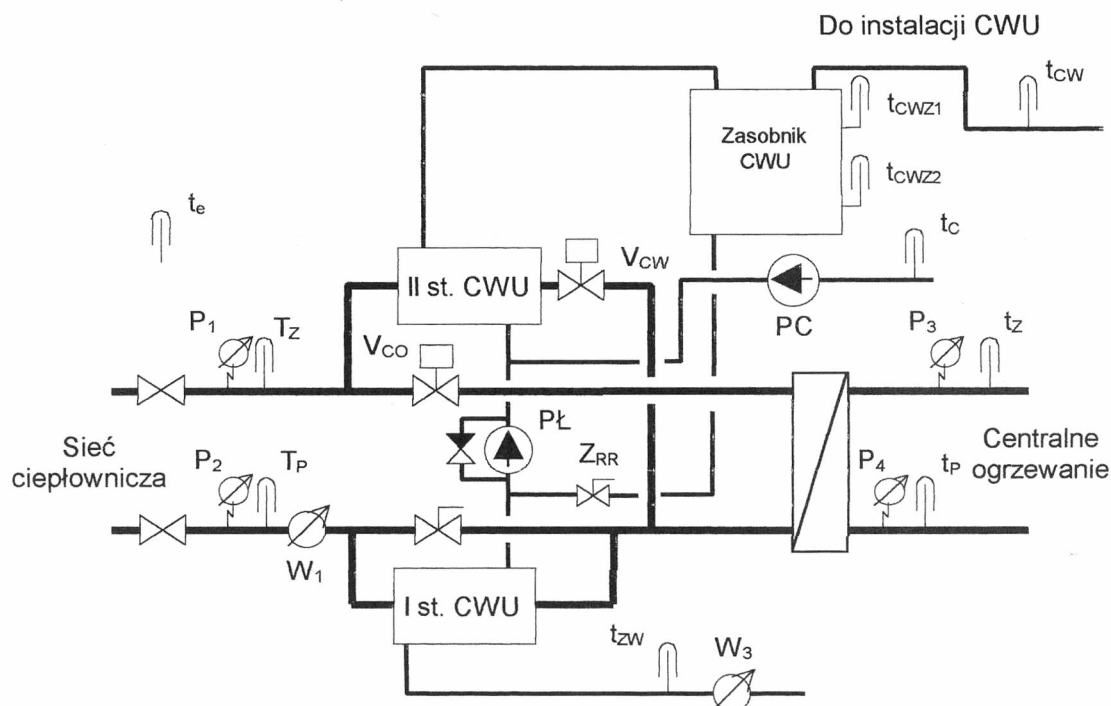
$$G_s = G_s^{CO} + G_s^{CW} \quad / 1.11 /$$

gdzie:

$$G_s^{CO} = \frac{Q_{CO}}{(T_1 - T_2) \cdot c_w} \quad / 1.12 /$$

oraz

$$G_s^{CW} = \frac{Q_{CW}^{max,h} - Q_{CW}^I}{(T_1^{min} - T_2) \cdot c_w} \quad / 1.13 /$$



Rys. 1.3. Schemat dwufunkcyjnego szeregowo-równoległego węzła ciepłowniczego z zasobnikiem.

Wprowadzenie automatycznej regulacji pozwoliło na pracę węzłów szeregowo-równoległych z wykorzystaniem funkcji priorytetu ciepłej wody użytkowej. Pozwala to, podobnie jak w przypadku węzłów pełnoszeregowych, wykorzystać pojemność cieplną ogrzewanych budynków do łagodzenia wpływu zmiennego w czasie poboru wody ciepłej na przepływ wody sieciowej w węźle. W porównaniu z węzłami szeregowo-szeregowymi praca układu przygotowania ciepłej wody użytkowej wywołuje znaczne wahania przepływu wody sieciowej. Ponadto, ze względu na dynamiczne działanie układu automatycznej regulacji, ich czas reakcji powinien odpowiadać dokładnie parametrom dynamicznym obiektów regulowanych. Nie spełnienia tego warunku zawór regulacyjny ciepłej wody V_{cw} (rys. 1.3.), który cechuje się znacznie większą stałą czasową, niż instalacja c.w.u. Tak więc, nagłe zmniejszenie poboru ciepłej wody powoduje, ze względu na bezwładność i opóźnienie działania zaworu regulacyjnego, brak schłodzenia wody sieciowej przepływającej przez wymiennik c.w.u. II stopnia, a w rezultacie zawyżanie

temperatury wody sieciowej powracającej z węzła ciepłowniczego. Przyczynia się to do zmniejszenia efektywności pracy systemu ciepłowniczego szczególnie przy współpracy z elektrociepłownią. Zjawisko to nie występuje w układach pełnoszeregowych.

Przewody i armatura węzła powinny być tak dobrane [29, 30], aby przy danym ciśnieniu dyspozycyjnym, w obiegach wody sieciowej możliwy był przepływ zapewniający obliczeniową moc cieplną zarówno przez układ c.o. jak i przez wymiennik II stopnia. Co więcej, przy różnych stopniach otwarcia zaworów regulacyjnych V_{CW} i V_{CO} , sumaryczny przepływ wody sieciowej przez węzeł nie powinien przekraczać zależności określonej równaniem /1.11/. Zmiana strumienia wody sieciowej wywołana pracą zaworów automatycznej regulacji nie powinna oddziaływać na wartość ciśnienia dyspozycyjnego przed węzłem. W związku z tym, praca układu szeregowo-równoległego z zachowaniem funkcji priorytetu ciepłej wody użytkowej i zapewnieniem stabilnych parametrów wody sieciowej wymaga stosowania na wejściu do węzła regulatorów przepływu i różnicy ciśnień.

1.4. Podsumowanie stanu wiedzy i kierunków prowadzonych badań

W polskich systemach ciepłowniczych najczęściej stosowanymi układami centralnego przygotowania ciepłej wody użytkowej są dwufunkcyjne węzły szeregowo-równoległe i pełnoszeregowe (szeregowo-szeregowe). Występują one jako układy bezzasobnikowe lub z zasobnikiem ciepłej wody. Ich praca oceniana jest w dwojaki sposób - od strony:

- stabilności przepływu wody sieciowej,
- jakości przygotowania c.w.u.

Te dotychczasowe węzły ciepłownicze wyposażane są w urządzenia automatycznej regulacji, których zadaniem jest zapewnienie właściwego dostarczania ciepła na cele centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej. Ponadto mają umożliwiać wykorzystywanie akumulacyjności cieplnej ogrzewanych budynków w celu łagodzenia wpływu dynamicznych zmian poboru ciepłej wody na wahania strumienia wody sieciowej dopływającej do węzła. Realizowana, według założeń,

funkcja priorytetu c.w.u. i stosowanie zasobników wody ciepłej powinny ustabilizować strumień wody sieciowej krążącej w systemie ciepłowniczym. Jednakże zebrane doświadczenia z działania dwufunkcyjnych węzłów szeregowo-równoległych i pełnoszeregowych wykazują rozbieżności między założeniami teoretycznymi, a praktyką. Uwypuklają wady w ich konstrukcji i w eksploatacji, do których należy przede wszystkim zaliczyć:

- w węzłach pełnoszeregowych
 - **konieczność przegrzewania budynków;** przy wysokich temperaturach zewnętrznych, szczególnie na początku i końcu sezonu ogrzewczego, gdy temperatura wody sieciowej ma stały poziom oraz przy dużym zapotrzebowaniu na ciepłą wodę, występuje zawyżanie strumienia wody sieciowej kierowanej do centralnego ogrzewania i niedotrzymywanie (podniesienie) temperatury na zasilaniu; regulacja automatyczna nie jest bowiem wówczas w stanie pogodzić ze sobą dwóch sprzecznych wymagań: zwiększonego przepływu wody grzewczej z racji zapotrzebowania na ciepłą wodę oraz zmniejszonego przepływu wody grzewczej wynikającego z chwilowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków.
- w węzłach szeregowo-równoległych
 - **znaczne wahania strumienia wody sieciowej,** wywołane zmiennym poborem ciepłej wody, które z kolei powodują zawyżanie temperatury wody powracającej z centralnego ogrzewania, z uwagi na bezwładność działania zaworów regulacyjnych c.w.u.

Pogodzenie różnych wymagań w zakresie centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej w ramach wspólnego węzła z zapewnieniem ekonomicznej pracy systemu ciepłowniczego skłania do poszukiwań innych rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych dwufunkcyjnych węzłów ciepłowniczych, które chociaż w części wyeliminują wady obecnie stosowanych układów.

Inny aspektem prezentowanym w literaturze jest spojrzenie na ciepłą wodę użytkową od strony instalacji i jej wpływ na ograniczenia zużycia ciepła na jej przygotowanie w węźle ciepłowniczym. Powszechne instalowanie wodomierzy, jako

podstawy rozliczeń za pobraną wodę, spowodowało bardzo duże zmniejszenie jej zużycia, a tym samym konieczność weryfikacji mocy ciepłych urządzeń przygotowania c.w.u. Powstało szerokie pole działania dla wielu badaczy związanych z zagadnieniami ciepłownictwa i przygotowania ciepłej wody użytkowej. Poszukuje się więc w wielu pracach [1],[8],[15],[17],[20],[22],[23],[24],[25],[26],[32],[39],[41],[42],[43] odpowiedzi między innymi na pytania:

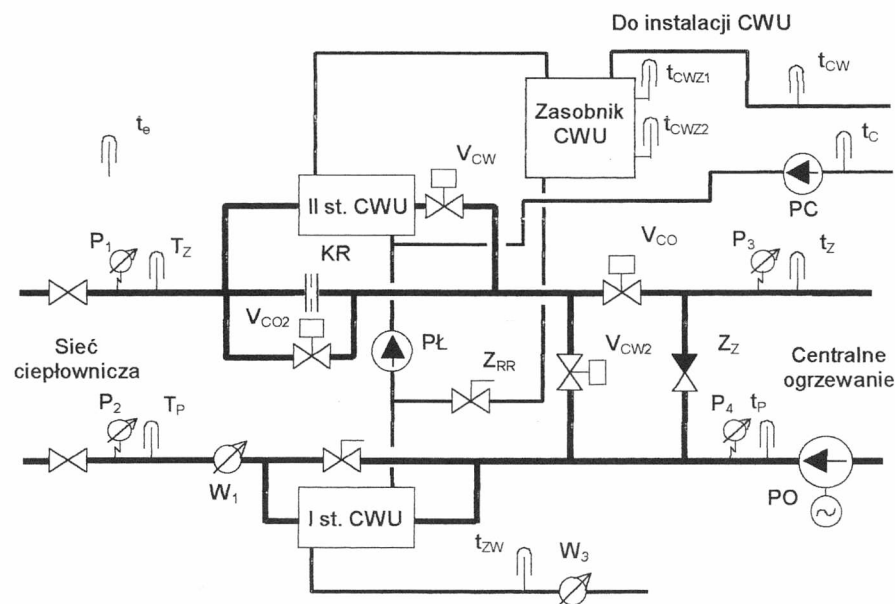
- jak duże jest ograniczenie poboru ciepłej wody?,
- jaki jest charakter poboru ciepłej wody w ciągu doby, roku?,
- jakie są możliwości wykorzystania stateczności cieplnej budynków przy zmniejszonym udziale ciepłej wody użytkowej?,
- czy funkcja priorytetu c.w.u. występuje i jaka jest ona duża?,
- jak bardzo zmienił się udział ciepłej wody w całkowitym zapotrzebowaniu na ciepło przez dwufunkcyjny węzeł ciepłowniczy?

Skierowanie uwagi głównie na stosowanie indywidualnych liczników zużycia ciepłej wody w mieszkaniach oraz wpływu zmniejszonego poboru wody na wymagane parametry pracy węzłów ciepłowniczych pozostawiają sprawę modyfikacji istniejących systemów ciepłowniczych za otwartą i godną zainteresowania. Zmniejszenie zużycia ciepłej wody użytkowej jest przecież faktem, a więc dalszych oszczędności w racjonalnym gospodarowaniu zasobami energetycznymi należy szukać w miejscach produkcji ciepła (kotłownie), jego transportu (sieci ciepłone), czy też jego transformacji (węzły ciepłownicze).

2. Węzeł pełnoszeregowy z możliwością okresowej pracy jako szeregowo-równoległy

2.1. Budowa węzła

Oryginalną konstrukcję dwufunkcyjnego węzła ciepłowniczego, której pomysłodawcą jest Ryszard Śnieżyk [12], przedstawiono na rysunku 2.1. Budowa jego oparta jest o węzeł pełnoszeregowy, a oryginalność polega na możliwości okresowej pracy węzła jako szeregowo-równoległego. Zachowany został w nim szeregowy sposób włączenia wymienników I i II stopnia ciepłej wody użytkowej.



Rys. 2.1. Schemat dwufunkcyjnego pełnoszeregowego węzła ciepłowniczego z mieszaniną pompową, zasobnikową, okresowo pracującego jako szeregowo-równoległy.

Wprowadzone w prezentowanym węźle modyfikacje w stosunku do dotychczas znanego węzła pełnoszeregowego polegają przede wszystkim na zautomatyzowaniu połączenia (tzw. spięcia) letniego oraz na zmianie położenia zaworu regulacyjnego c.o. (V_{CO}), poza to połączenie, ale przed węzłem centralnego ogrzewania. Pojawia się więc dodatkowy zawór automatycznej regulacji, który

zamienia dotychczasowe spięcie letnie (pracujące tylko poza sezonem ogrzewczym) w połączenie czynne również w okresach przejściowych. Prezentowany węzeł występuje w obrębie układu c.o. jako zmieszania pompowego, z pompą obiegową na powrocie z instalacji c.o. i z zaworem zwrotnym na podmieszaniu zimnym.

Rozwiązanie to, według założeń autora, przejmuje zalety układu pełnoszeregowego, tj. zdolność wykorzystania ciepła zakumulowanego przez budynek (priorytet c.w.u.) oraz realizowanie przesunięć dostawy ciepła z centralnego ogrzewania do ciepłej wody użytkowej przez zmianę temperatury wody sieciowej, a nie jej strumienia. Zarazem eliminuje podstawową wadę układu pełnoszeregowego, czyli przegrzewanie budynku w przypadku zbieżności małego zapotrzebowania ciepła na centralne ogrzewanie z dużym poborem ciepłej wody użytkowej (okresy przejściowe sezonu ogrzewczego). Zaletą tego nowego rozwiązania jest również istotne zmniejszenie wahań przepływu wody sieciowej w porównaniu z dotychczasowymi węzłami ciepłowniczymi szeregowo-równoległymi.

2.2. Algorytm automatycznej regulacji

Algorytm automatycznej regulacji węzła zostanie przedstawiony za [9], w pierwszej formie wyszczególnienia funkcji zaworów regulacyjnych, a następnie omówienia układów sterowania: instalacją c.o., instalacją poboru c.w.u., cyrkulacją c.w.u. i ładowaniem zasobnika c.w.u.

2.2.1. Funkcje zaworów automatycznej regulacji

Układ automatyki węzła pracuje z zapewnieniem priorytetu ciepłej wody użytkowej. Zawór regulacyjny V_{CW} ma za zadanie ustalać temperaturę wody ciepłej na wyjściu z wymienników c.w.u. drugiego stopnia na zadanym poziomie ($t_{cw} = 55^{\circ}\text{C}$). Priorytet c.w.u. jest realizowany w ten sposób, że gdy zostaje osiągnięty maksymalny strumień wody sieciowej do węzła, a temperatura c.w.u. jest niższa od zadanej, to następuje przemykanie zaworu c.o. (V_{CO}). Jednocześnie otwiera się zawór V_{CW2} powodując utrzymanie stałego dopływu wody sieciowej do węzła oraz podwyższenie temperatury wody sieciowej przed wymiennikami I stopnia c.w.u.

Zawór regulacyjny V_{CO} stabilizuje temperaturę wody na zasilaniu centralnego ogrzewania w funkcji temperatury zewnętrznej. Zawór regulacyjny na obejściu kryzy V_{CO2} jest odpowiedzialny za zmianę oporności węzła w okresach niskich temperatur zewnętrznych; pracuje sekwencyjnie z zaworem regulacyjnym V_{CO} .

Funkcje zaworów regulacyjnych są następujące:

- V_{CO} - regulacja dostarczania ciepła do c.o.,
- V_{CW} - regulacja dostarczania ciepła do c.w.u.,
- V_{CO2} - regulacja dostarczania ciepła do c.o.; ten zawór zmniejsza oporność węzła przy niskich temperaturach zewnętrznych, kiedy zamknięty jest zawór V_{CW} ,
- V_{CW2} - regulacja dostarczania ciepła do c.w.u.; ten zawór otwiera się przy ograniczaniu dostarczania ciepła do c.o. (pracuje pod koniec sezonu ogrzewczego).

Zawory V_{CW} i V_{CO2} mogą być zastąpione jednym zaworem dwudrogowym, ale średnica tego zaworu byłaby większa od dobranych dwóch zaworów jednodrogowych. Ma to bardzo istotne znaczenie, szczególnie w przypadku dużych węzłów ciepłowniczych, w których są duże średnice zaworów.

2.2.1.1. Sterowanie układem centralnego ogrzewania

Regulacja instalacji centralnego ogrzewania realizowana jest w oparciu o zawór regulacyjny V_{CO} . Sterowany jest on w zależności od temperatur wody instalacyjnej na zasilaniu t_z i powrocie t_p oraz od tego, jak wyposażona jest instalacja wewnętrzna. Jeżeli występują w niej zawory termostatyczne, to zawór V_{CO} jest sterowany od temperatury zewnętrznej i od temperatury wody instalacyjnej na zasilaniu t_z . Natomiast jeżeli w instalacji nie ma zaworów termostatycznych na instalacji, to sterowanie zaworem odbywa się względem średniej temperatury wody instalacyjnej na zasilaniu t_z i powrocie t_p oraz od temperatury zewnętrznej t_e .

W przypadku, kiedy zawór regulacyjny V_{CO} jest całkowicie otwarty i nie zostaje osiągnięta wymagana temperatura wody zasilającej instalację centralnego

ogrzewania, wówczas zapewnienie jej przejmuje zawór na obojętności kryzy V_{CO2} , zmieniając oporność węzła.

Zawory V_{CO} i V_{CO2} pracują sekwencyjnie i mogą być sterowane z jednego wyjścia regulatora, np. oba napędy sterowane sygnałem ciągłym: dla V_{CO} sygnał sterujący $0 \div 5V$, a dla V_{CO2} - $5 \div 10V$.

2.2.1.2. Sterowanie układem ciepłej wody użytkowej

Na podstawie pomiaru temperatury ciepłej wody użytkowej wypływającej z wymienników drugiego stopnia, zawór V_{CW} przyjmuje stopień otwarcia gwarantujący utrzymanie temperatury wody ciepłej t_{CW} na poziomie zadanym $55^{\circ}C$. Jeżeli temperatura wody jest za wysoka, zawór V_{CW} przymyka się, jeżeli za niska - otwiera się.

Zawór regulacyjny spięcia V_{CW2} jest zaworem zapewniającym, w okresach małego zapotrzebowania na ciepło w instalacji c.o., przepływ wody sieciowej przez węzeł (praca w układzie szeregowo-równoległym) i utrzymanie temperatury wody ciepłej na zadanym poziomie. Również w przypadku szczytowego poboru c.w.u. jego otwarcie umożliwia realizację funkcji priorytetu wody ciepłej.

Zawory V_{CW} i V_{CW2} pracują sekwencyjnie i mogą być sterowane z jednego wyjścia regulatora, np. oba napędy sterowane sygnałem ciągłym: dla V_{CW} sygnał sterujący $0 \div 5V$, a dla V_{CW2} - $5 \div 10V$.

2.2.1.3. Sterowanie układem cyrkulacji c.w.u.

Układ cyrkulacji (a dokładniej praca pompy cyrkulacyjnej) jest sterowany w zależności od temperatury wody w przewodzie cyrkulacyjnym t_c i wielkości poboru ciepłej wody. Gdy jej temperatura wody cyrkulacyjnej spadnie poniżej wielkości zadanej i jednocześnie pobór wody ciepłej będzie mniejszy od zadanego, włącza się pompa cyrkulacyjna.

W okresach postojów pompa cyrkulacyjna powinna być jednak włączana, np. co pół godziny na kilka minut, w celu wyrównania temperatury wody cyrkulacyjnej w przewodach.

2.2.1.4. Sterowanie układem ładowania zasobnika c.w.u.

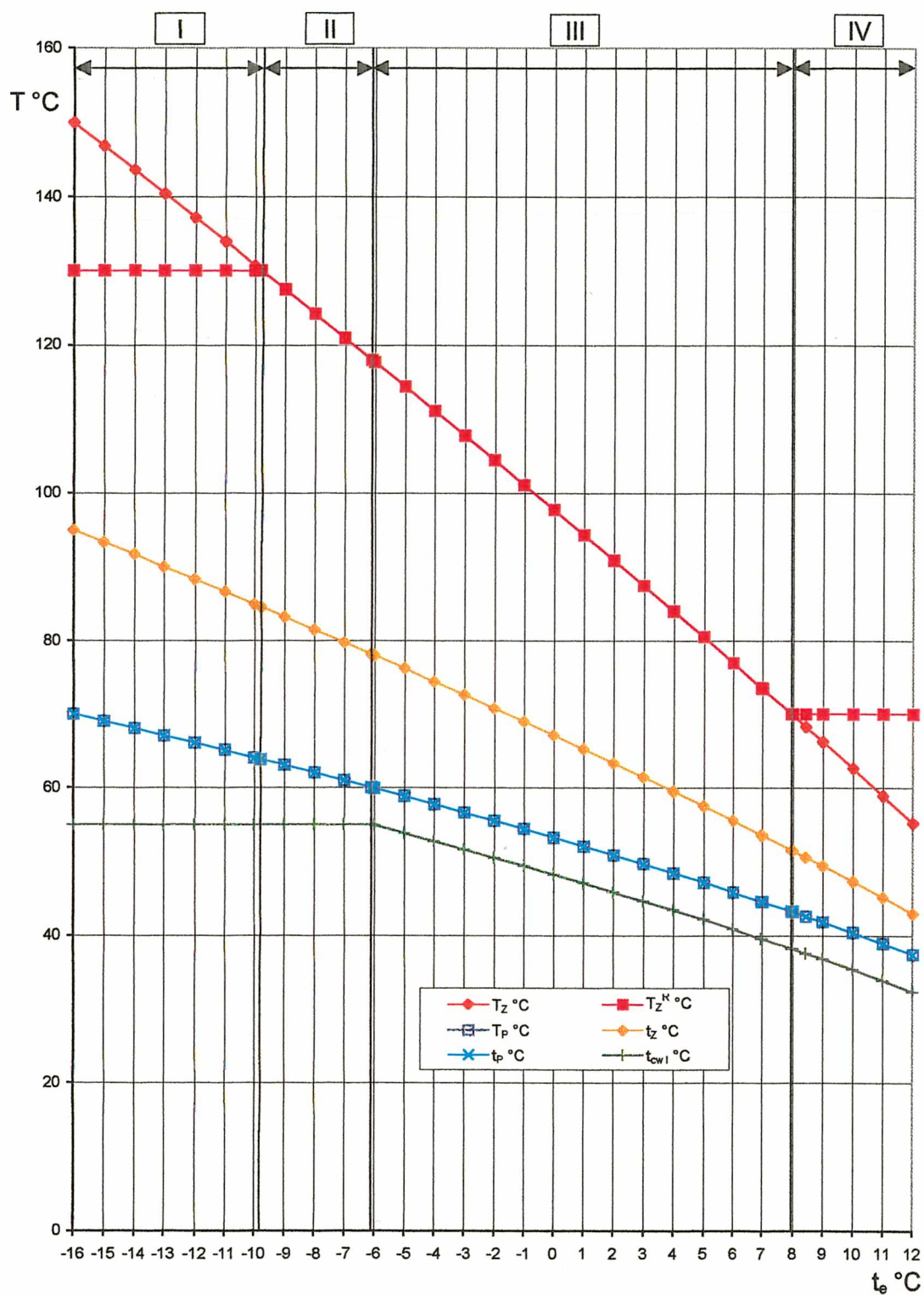
Układ ładowania zasobników jest sterowany przez dwie temperatury: t_{cw1} i t_{cw2} , które są mierzone wewnątrz zasobnika. Jeżeli t_{cw1} spada poniżej wartości zadanej, to włącza się pompa ładująca i powstaje krótki obieg ciepłej wody przez pompę, wymiennik II stopnia i zasobnik. Natomiast pompa jest wyłączana, kiedy w dolnej części zasobnika temperatura wody ciepłej osiągnie zadany poziom.

2.3. Analiza pracy węzła

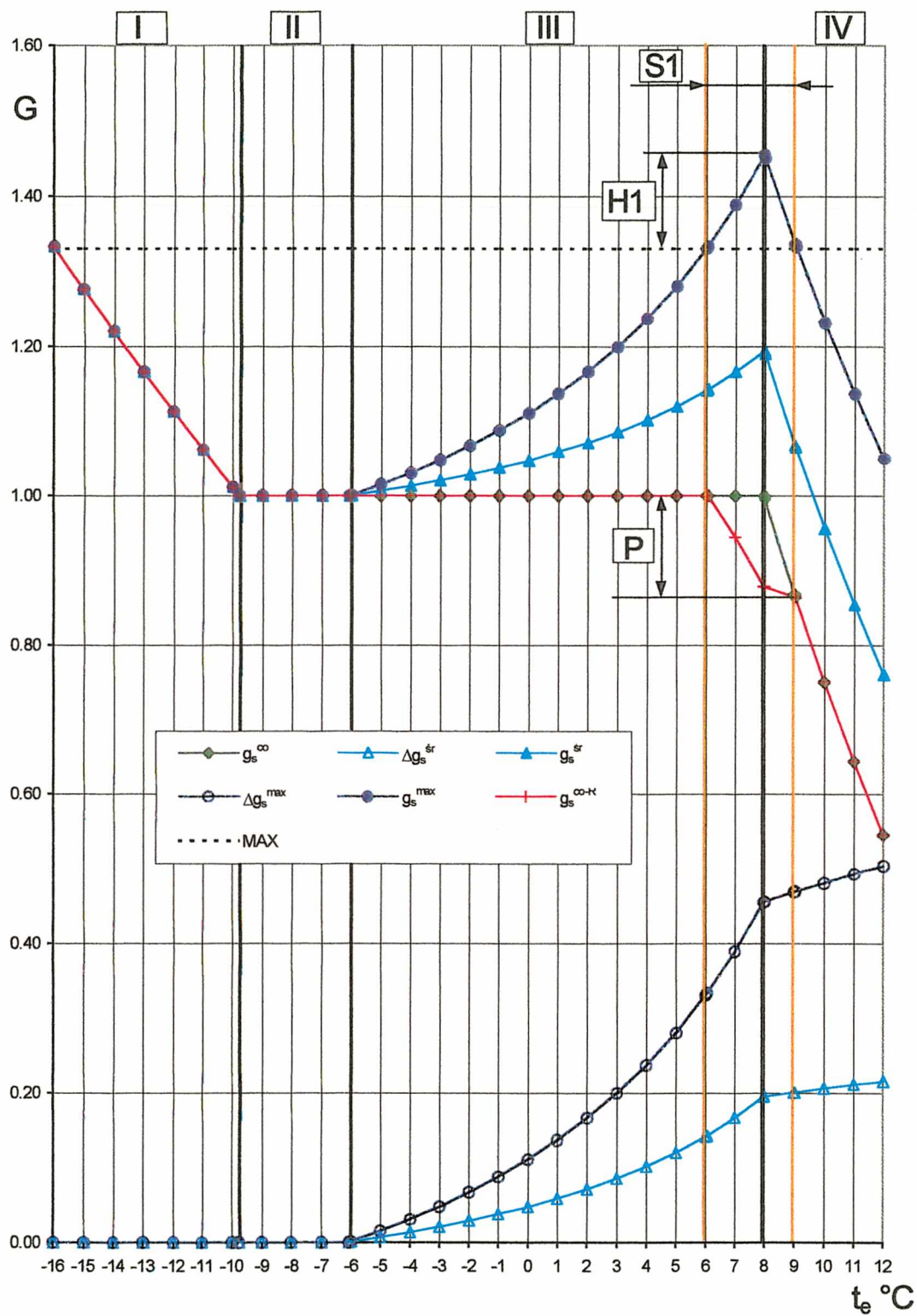
Analiza pracy każdego węzła wymaga wcześniejszego poznania jego działania podczas całego sezonu grzewczego. Sprowadzić to można do prześledzenia stanów jego pracy na podstawie wykresów regulacyjnych temperatur i względnych strumieni wody sieciowej. Szczególnie ważnym czynnikiem są zmiany strumienia wody sieciowej dopływającej do węzła w zależności od zmiennych warunków zewnętrznych oraz zmiennego poboru ciepłej wody. Tak przeprowadzona analiza pozwoli na określenie najbardziej niekorzystnych, a więc najwłaściwszych warunków do przebadania i projektowania poszczególnych elementów węzła ciepłowniczego.

Podstawą do wyznaczenia charakterystycznych obszarów, w których przewiduje się zmienną pracę węzła, jest temperaturowy wykres regulacyjny (rys.2.2). Został on, podobnie jak i wykresy względnego strumienia wody sieciowej, (rys. 2.3 i 2.4) sporządzony dla następujących rzeczywistych parametrów:

- obliczeniowa temperatura wody sieciowej $T_z^o/T_p^o = 150/70^{\circ}\text{C}$,
- maksymalna temperatura wody sieciowej na zasilaniu $T_z^{\max} = 130^{\circ}\text{C}$,
- obliczeniowa temperatura zewnętrzna $t_e^o = -16^{\circ}\text{C}$,
- obliczeniowa temperatura wody instalacyjnej c.o. $t_z^o/t_p^o = 95/70^{\circ}\text{C}$
- udział ciepłej wody $A_{cw} = 0,17$,
- współczynnik godzinowej nierównomierności poboru c.w.u. $K_h = 2,35$ (dla liczby mieszkańców $n = 1092$).



Rys. 2.2. Temperaturowy wykres regulacyjny z dwoma punktami załamania dla przykładowego systemu ciepłowniczego.



Rys. 2.3. Wykres przepływów względnych dla bezzasobnikowego węzła ciepłowniczego.

Na podstawie przedstawionego na rysunku 2.2. wykresu, wyróżnia się w sezonie grzewczym pięć charakterystycznych stanów, zmieniających charakter pracy węzła ciepłowniczego. Są to:

1. obliczeniowa temperatura zewnętrzna,
2. zrównanie się temperatury wody sieciowej ustalonej według wykresu rzeczywistego z temperaturą otrzymaną w oparciu o wykres teoretyczny,
3. włączenie wymienników II stopnia,
4. osiągnięcie minimalnej temperatury wody sieciowej na zasilaniu, tzw. punkt załamania wykresu,
5. koniec sezonu grzewczego.

W związku z tym analizę pracy węzła należy prześledzić w czterech obszarach wydzielonych powyższymi stanami (punktami na rys.2.2). Dotyczyć ona będzie przede wszystkim zmian strumienia wody sieciowej dopływającej do węzła w zależności od temperatury zewnętrznej t_e i wielkości poboru ciepłej wody użytkowej.

• Obszar I

Dotyczy on prowadzenia systemu ciepłowniczego według wykresu regulacyjnego z dwoma punktami załamania. Rzeczywista temperatura zasilającej wody sieciowej utrzymywana jest na stałym poziomie. W celu zapewnienia bilansowania się potrzeb cieplnych układu centralnego ogrzewania, strumień wody sieciowej dopływającej do węzła należy zwiększyć w tym obszarze o wartość

$$\Delta g_s = 1 - \frac{T_Z - T_P}{T_Z^R - T_P} \quad /2.1/$$

Oznacza to, że elementy węzła c.o. należy wymiarować dla obliczeniowej temperatury powietrza zewnętrznego. Ze względu na zniżenie temperatury, jest to wówczas maksymalny strumień wody sieciowej dla węzła – MAX (rys.2.3).

W obszarze I, dzięki wysokiej temperaturze wody powrotnej ciepła woda jest w pełni podgrzewana w wymiennikach pierwszego stopnia. Zawór

regulacyjny ciepłej wody V_{CW} jest więc zamknięty, wymienniki ciepłej wody drugiego stopnia nie pracują. Przed węzłem następuje wzrost oporności hydraulicznej. Cały strumień wody sieciowej przepływa przez kryzę. Jeżeli zawór regulacyjny c.o. V_{CO} jest całkowicie otwarty, a temperatura wody instalacyjnej jest za niska, oznacza to konieczność zastosowania dodatkowego zaworu regulacyjnego c.o. V_{CO2} na obejściu kryzy; obniżyć on będzie oporność całego układu.

Zawór V_{CO} jest odpowiedzialny za utrzymanie właściwej temperatury instalacji c.o. przez regulowanie wielkości strumienia podmieszania zimnego. Początkowo całkowicie otwarty, ze wzrostem temperatury zewnętrznej zostaje przymykany. Układ zmieszania pompowego przez podmieszanie zimne zapewnia utrzymanie obliczeniowych parametrów wody instalacyjnej c.o. W efekcie jest realizowana, na potrzeby centralnego ogrzewania, regulacja jakościowo-ilościowa.

Zawór spięcia V_{CW2} jest zamknięty.

Woda sieciowa powracająca z instalacji centralnego ogrzewania przepływa przez wymiennik ciepłej wody I stopnia, a jej strumień ma zapewnić utrzymanie obliczeniowej temperatury wody ciepłej. Pracuje również obejście wymiennika. Poszczególne strumienie uzależnione są od wartości poboru ciepłej wody.

• Obszar II

Ze względu na zrównanie się temperatury wody sieciowej ustalonej według wykresu rzeczywistego z temperaturą otrzymaną z wykresu teoretycznego, utrzymywany jest stały strumień wody sieciowej dopływającej do węzła, który wynika wyłącznie z potrzeb ogrzewania budynku. Realizowana jest jakościowa regulacja centralnego ogrzewania. W związku z tym stopień otwarcia zaworu regulacyjnego c.o. V_{CO} jest stały.

W dalszym ciągu ciepła woda przygotowywana jest tylko w wymiennikach I stopnia, pracuje także ich obejście. Zakłada się w tych wymiennikach ekonomiczny przyrost temperatury

$$\Delta t_{ek} = T_p - t_{cwl} \geq 5^{\circ}\text{C} \quad /2.2/$$

Zawór spięcia V_{CW2} jest zamknięty.

- **Obszar III**

Temperatura wody sieciowej powracającej z instalacji centralnego ogrzewania jest zbyt niska, aby zapewnić podgrzanie ciepłej wody do parametrów obliczeniowych. Przez wymiennik I stopnia przepływa prawie cały strumień wody sieciowej doprowadzonej do węzła.

Rozpoczyna pracę wymiennik II stopnia. Zawór V_{CW} otwiera się. Powoduje to obniżenie temperatury wody sieciowej przed układem centralnego ogrzewania. Dlatego, aby zapewnić bilans cieplny c.o., otwiera się zawór regulacyjny centralnego ogrzewania V_{CO} , następuje zmniejszenie oporności węzła, a w związku z tym wzrost strumienia dopływającej do niego wody sieciowej.

W przypadku osiągnięcia przez zawór V_{CW} całkowitego otwarcia i jednoczesnego niedotrzymywania temperatury wody ciepłej na poziomie zadanym (duże pobory c.w.u.), zaczyna otwierać się zawór regulacyjny spięcia letniego V_{CW2} . Powoduje to wzrost temperatury przed wymiennikami ciepłej wody pierwszego stopnia i zwiększenie tym samym ich mocy cieplnej. W dalszym ciągu wymagany jest, dla zapewnienia bilansu c.o., wzrost stopnia otwarcia zaworu V_{CO} , aż do ponownego wystąpienia maksymalnego strumienia wody sieciowej dopływającej do węzła. Należy pamiętać, że to zwiększenie strumienia wody sieciowej jest spowodowane pracą układu przygotowania ciepłej wody użytkowej, czyli otwieraniem się zaworów regulacyjnych V_{CW} i V_{CW2} .

W przypadku, kiedy osiągnięty zostanie maksymalny strumień wody sieciowej dopływającej do węzła, a temperatura ciepłej wody za wymiennikiem II stopnia będzie niższa od wymaganej, pojawia się możliwość wykorzystania pojemności cieplnej przegród budowlanych do łagodzenia skutków zwiększonego poboru ciepłej wody użytkowej. Realizowana ona będzie przez

przesunięcie w czasie dostarczania ciepła na cele centralnego ogrzewania do układu ciepłej wody. Zabieg ten przyjęto nazywać priorytetem ciepłej wody.

Tak więc, w tej sytuacji rośnie stopień otwarcia zaworu regulacyjnego na spięciu V_{CW2} , lecz tym razem przy jednoczesnym zamykaniu się zaworu V_{CO} . Powoduje to dalszy wzrost temperatury przed wymiennikami ciepłej wody pierwszego stopnia i zwiększenie tym samym ich mocy cieplnej. Węzeł centralnego ogrzewania w tym czasie otrzymuje zmniejszony strumień ciepła – jest mniejszy od wymaganego strumień wody sieciowej na potrzeby c.o. (krzywa G_s^{co-R} na rys.2.3). Natomiast całkowity strumień wody sieciowej dopływający do węzła jest stały.

W punkcie załamania wykresu występuje największy deficyt ciepła na cele centralnego ogrzewania. Równocześnie stanowi on podstawę do obliczeń projektowych wymienników i zaworów regulacyjnych ciepłej wody użytkowej oraz zaworu regulacyjnego połączenia letniego. Występują wówczas największe strumienie wody sieciowej przepływającej przez te obiegi.

• Obszar IV

W pobliżu punktu załamania wykresu realizowana jest w dalszym ciągu funkcja priorytetu ciepłej wody. Ze względu na to, że temperatura zasilającej wody sieciowej jest wyższa niż wynikałoby to z teoretycznego wykresu regulacyjnego, zawór regulacyjny c.o. V_{CO} zaczyna się zamykać. Im wyższa jest temperatura zewnętrzna, tym mniejszy jest jego stopień otwarcia. Jednocześnie przy dużych poborach c.w.u. pracuje poprawnie układ jej przygotowania, zawór regulacyjny V_{CW} otwiera się, aby utrzymać wymaganą temperaturę wody ciepłej. Żeby ten zwiększony przepływ wody sieciowej nie powodował przegrzewania budynków, to zawór spięcia V_{CW2} jest otwarty, zapewniając wówczas właściwy rozdział wody między te dwa układy. W ten sposób eliminowana jest podstawowa wada dotychczasowych węzłów pełnoszeregowych. Przy osiągnięciu temperatury końca sezonu, całkowicie zamyka się zawór V_{CO} , a otwiera zawór spięcia V_{CW2} . Odtąd węzeł pracuje tylko na potrzeby przygotowania ciepłej wody użytkowej.

2.4. Funkcja priorytetu ciepłej wody użytkowej

Wykorzystanie właściwości akumulacyjnych budynków w okresach zwiększonego poboru ciepłej wody użytkowej zmniejsza podczas ich trwania pobór energii cieplnej dostarczanej do węzła. W wyniku „pożyczek” wody grzejnej na cele c.o. do układu c.w.u. zmniejsza się obliczeniowe zapotrzebowanie na ciepło przez węzeł. Umożliwia to zarazem obniżenie strumienia wody sieciowej dopływającej do węzła, a więc i masy wody krążącej w całym systemie ciepłowniczym. W rezultacie pozwala to na zmniejszenie kosztów produkcji i dystrybucji ciepła przez obniżenie mocy cieplnej źródła ciepła, niższego zużycia energii elektrycznej do napędu pomp obiegowych, itp. Końcowy odbiorca energii cieplnej otrzymuje ją po niższych cenach.

Powstaje jednak pytanie, czy we wszystkich dwufunkcyjnych węzłach ciepłowniczych występuje zjawisko priorytetu ciepłej wody, kiedy występuje i jakie jest ono duże? Odpowiedź związana jest ściśle z wartością maksymalnego udziału ciepłej wody, określoną jako stosunek maksymalnego godzinowego zapotrzebowania na ciepło dla c.w.u. do obliczeniowego zapotrzebowania na ciepło dla c.o. Ponadto należy uwzględnić fakt, że eksploatacja większości systemów ciepłowniczych prowadzona jest według obniżonego wykresu regulacyjnego, a więc maksymalny strumień wody sieciowej, jaki musi dopłynąć do węzła (wynikający z potrzeb cieplnych ogrzewanych budynków) jest większy, niż by to wynikało z parametrów obliczeniowych. Wartość tego zawyżonego strumienia powinna być maksymalnym strumieniem wody sieciowej dla węzła – MAX (rys.2.3).

W zaznaczonym na rysunku 2.3 obszarze S1 obserwuje się, że w przypadku godzinowego maksymalnego poboru ciepłej wody użytkowej $G_{cw}^{max,h}$, potrzeby cieplne badanego węzła są większe niż możliwości dostarczania ciepła (przy założeniu nie przekraczania maksymalnego strumienia wody sieciowej MAX). Oznacza to niedobór ciepła (wody sieciowej), a więc i brak możliwości zbilansowania układu c.o. – c.w.u. Obszar S1 ($t_e = 6 \div 9^\circ C$), w którym potrzeby cieplne węzła ciepłowniczego wymagają większego strumienia wody sieciowej niż

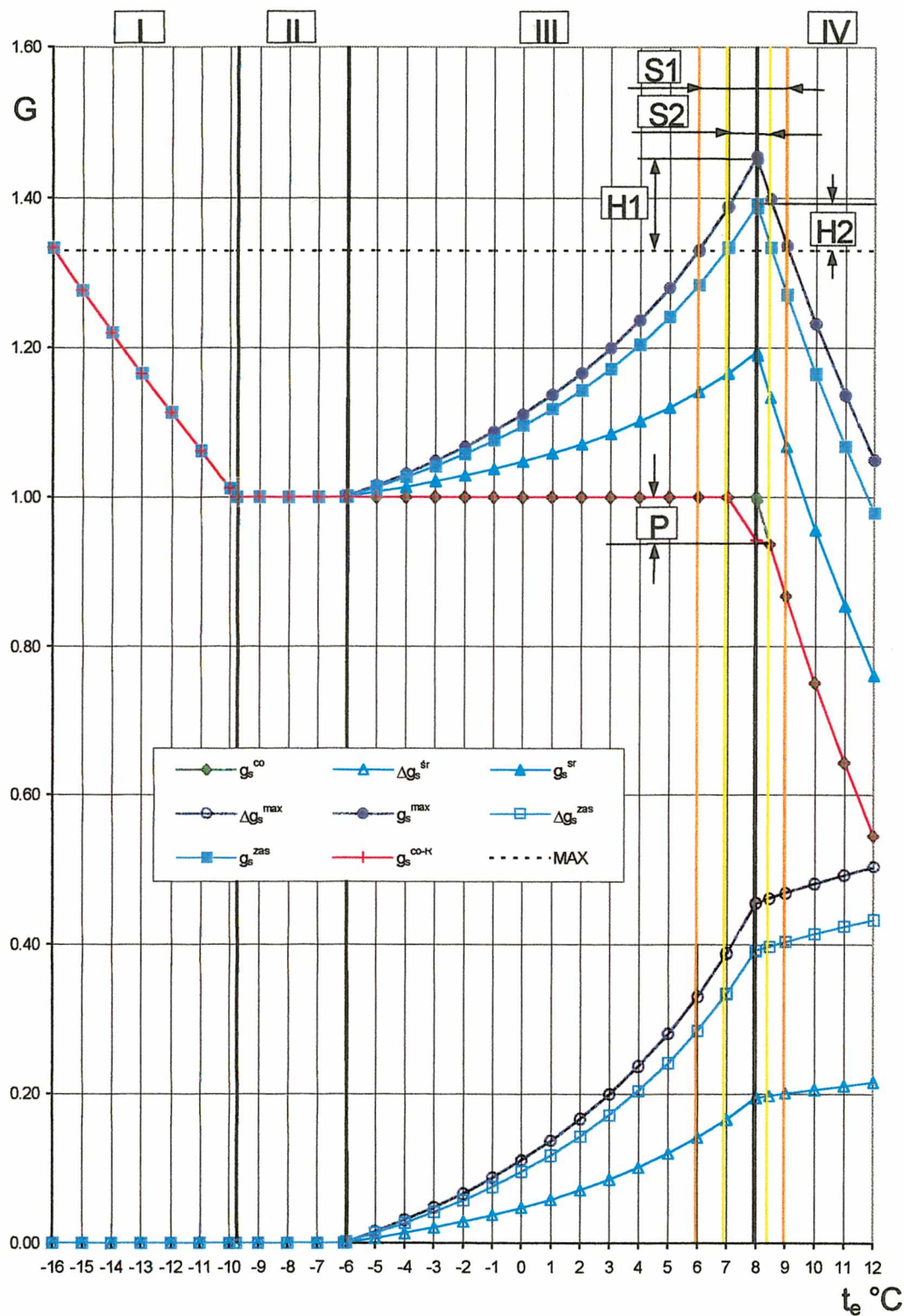
jego wartość maksymalna, jest obszarem występowania priorytetu ciepłej wody użytkowej, a różnica $H1$ jest nazywana głębokością priorytetu. Utrzymany zostaje bowiem wymagany strumień wody sieciowej dopływającej do wymiennika ciepłej wody drugiego stopnia (krzywa $\Delta g_s^{\max}$), ale dzieje się to kosztem pożyczania jego części z układu centralnego ogrzewania – wielkość P .

W przypadku wystąpienia poboru ciepłej wody użytkowej mniejszego niż $G_{cw}^{\max,h}$, np. o wartości średniego godzinowego zapotrzebowania na wodę, funkcja priorytetu c.w.u., przy prezentowanej strukturze obciążeń cieplnych, nie wystąpi (rys.2.3).

2.5. Zastosowanie zasobników ciepłej wody

Przedstawiony na schemacie technologicznym (rys. 2.1.) węzeł zmieszania pompowego występuje jako układ zasobnikowy. Zasobniki wody ciepłej redukują moc cieplną wymienników c.w.u. oraz zmniejszają dodatkowy strumień wody sieciowej dla wymiennika ciepłej wody drugiego stopnia. Ilustruje to na rysunku 2.4 wykres strumieni względnych dla węzła (według schematu na rys. 2.1) z zasobnikiem o objętości 3 m^3 . Naniesiono na nim, na tle wcześniej omówionych charakterystycznych potrzeb cieplnych, strumienie wody sieciowej dopływającej do węzła g_s^{zas} i do wymiennika ciepłej wody drugiego stopnia Δg_s^{zas} przy obciążeniu cieplnym od strony c.w.u. równym zredukowanej wydajności cieplnej wymienników ciepłej wody. Obszar występowania priorytetu c.w.u., w stosunku do układu bezzasobnikowego, zmniejszy się i obejmuje wówczas zakres $S2$ ($7 \div 8,5^\circ\text{C}$). Zasobnik ograniczy także głębokość priorytetu c.w.u. $H2$, a więc i wielkość „pożyczek” P wody sieciowej z układu centralnego ogrzewania.

Pomimo tego, że węzeł jest układem zasobnikowym o ograniczonej akumulacyjności po stronie ciepłej wody, proponuje się dobieranie wymienników c.w.u. na podstawie maksymalnego godzinowego poboru wody ciepłej. Pozwala to na zapewnienie poprawnej pracy dwufunkcyjnego węzła w przypadku awarii zasobnika c.w.u., którego w praktyce nie można wykluczyć.



Rys. 2.4. Wykres przepływów względnych dla węzła ciepłowniczego z zasobnikiem.

3. Teza pracy

Pełnoszeregowy węzeł ciepłowniczy z priorytetem ciepłej wody użytkowej, okresowo pracujący jako szeregowo-równoległy, jest węzłem pozwalającym na znaczne ograniczenie wahań strumienia dopływającej do niego wody sieciowej.

4. Cel i zakres pracy

Celem pracy było przebadanie nowej konstrukcji węzła ciepłowniczego, a w szczególności:

- określenie charakteru i wielkości poboru ciepłej wody użytkowej,
- określenie nierównomierności strumienia wody sieciowej w funkcji temperatury zewnętrznej i poboru ciepłej wody użytkowej,
- wyprowadzenie zależności określającej nierównomierność strumienia wody sieciowej,
- przeanalizowanie wpływu poboru c.w.u. na chwilową moc cieplną węzłów i na zdolności kompensowania strumienia wody sieciowej,
- opracowywanie podstawowych założeń (algorytmu) do stworzenia matematycznego modelu badanego typu węzła, symulującego zachodzące w nim zjawiska cieplno-hydrauliczne; umożliwienie projektowania i analizowania pracy węzłów tego typu.

Praca swym zakresem obejmuje badania eksploatacyjne dwufunkcyjnych zmodyfikowanych węzłów ciepłowniczych, z zasobnikiem, typu zmieszania pompowego, obsługujących wielorodzinne budownictwo mieszkaniowe, zaopatrywane w ciepło przez zdalaczynne systemy ciepłne Ustki i Słupska. Łącznie, w okresie 4 lat, przebadano 7 grupowych węzłów ciepłowniczych dla liczby mieszkańców od 1100 do 6000. Szczegółową charakterystykę przebadanych węzłów podano w punkcie 5.1.

5. Badania eksploatacyjne węzłów pełnoszeregowych z priorytetem c.w.u. okresowo pracujących w układzie szeregowo-równoległym

5.1. Charakterystyka obiektów objętych badaniami

Pełnoszeregowe węzły ciepłownicze, z możliwością okresowej pracy jako szeregowo-równoległe, są obiektami rzeczywistymi włączonymi do systemów ciepłowniczych miast Słupska, Ustki, Kwidzyna i Bydgoszczy. Ich powstanie jest efektem działalności firmy „Ryszard Śnieżyk” nad modernizacją i bardziej ekonomicznym funkcjonowaniem miejskich systemów ciepłych. Zastąpiły one wyeksploatowane już węzły ciepłownicze, niejednokrotnie uniemożliwiające właściwe dostarczenie energii cieplnej (w postaci c.o. i c.w.u.) do odbiorców. Te nowe węzły znacznie poprawiły pracę systemów ciepłowniczych, choć stanowią niewielki procent w całkowitej liczbie węzłów występujących w systemach powyższych miast.

Przeprowadzone badania, zrealizowane w latach 1994 do 1998, dotyczą siedmiu węzłów ciepłowniczych zainstalowanych w Ustce i Słupsku. Zastosowane elektroniczne regulatory i komputery umożliwiły rejestrację parametrów pracy tych węzłów w okresie całego sezonu ogrzewczego. Ze względu na dynamiczne i krótkotrwałe zmiany poboru ciepłej wody użytkowej, parametry pracy węzłów rejestrowane były w krótkich odstępach czasu. Były to przedziały jednodominutowe lub kwadranse.

5.1.1. Węzeł ciepłowniczy przy ulicy Grunwaldzkiej 45 w Ustce

Jest to grupowy dwufunkcyjny węzeł ciepłowniczy zmieszania pompowego, zapewniający dostarczanie ciepła do centralnego ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej dla 6 wielorodzinnych budynków mieszkalnych. Instalacje wewnętrzne centralnego ogrzewania w zasilanych z tego węzła budynkach były wyposażone w zawory termostacyjne. Regulacja temperatury wody grzejnej na c.o.

(zawór V_{CO}) odbywała się więc na podstawie średniej temperatury wody instalacyjnej w zależności od temperatury zewnętrznej t_e , określonej równaniem:

$$t_{co}^{sr} = a + b \cdot t_e \quad / 5.1/$$

Dla warunków klimatycznych Ustki przyjęto funkcję wielomianu /5.1/ w postaci:

$$t_{co}^{sr} = 57,51 - 1,56 \cdot t_e \quad / 5.2/$$

Zużycie ciepłej wody użytkowej jest rozliczane głównie w oparciu o wskazania wodomierzy mieszkaniowych, w które jest wyposażone ok. 87% ogółu mieszkań.

Charakterystyczne wielkości węzła ciepłowniczego przedstawiono w tabeli 5.1.

5.1.2. Węzeł ciepłowniczy SW-0* w Słupsku

Jest to grupowy dwufunkcyjny węzeł ciepłowniczy zmieszania pompowego, zapewniający dostarczanie ciepła do centralnego ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej dla 12 wielorodzinnych budynków mieszkalnych. Jego charakterystyczne wielkości przedstawiono w tabeli 5.1.

5.1.3. Węzeł ciepłowniczy SW-1 w Słupsku

Jest to grupowy dwufunkcyjny węzeł ciepłowniczy zmieszania pompowego, dostarczający ciepło na potrzeby centralnego ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej do osiedla jednorodzinnych domów mieszkalnych oraz 18 wielorodzinnych budynków mieszkalnych. Jego charakterystyczne wielkości przedstawiono w tabeli 5.1.

5.1.4. Węzeł ciepłowniczy SW-2 w Słupsku

Jest to grupowy dwufunkcyjny węzeł ciepłowniczy zmieszania pompowego, zapewniający dostarczający ciepło do centralnego ogrzewania i przygotowania

* Symbole węzłów SW-0 do SW-5 przyjęto za ich oznaczeniem w systemie ciepłowniczym Słupska.

cieplej wody użytkowej dla 11 wielorodzinnych budynków mieszkalnych. Jego charakterystyczne wielkości przedstawiono tabeli 5.1.

5.1.5. Węzeł ciepłowniczy SW-3 w Słupsku

Jest to grupowy dwufunkcyjny węzeł ciepłowniczy zmieszania pompowego, zapewniający dostawę ciepła do centralnego ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej dla 18 wielorodzinnych budynków mieszkalnych. Jego charakterystyczne wielkości przedstawiono tabeli 5.1.

5.1.6. Węzeł ciepłowniczy SW-4 w Słupsku

Jest to grupowy dwufunkcyjny węzeł ciepłowniczy zmieszania pompowego, zapewniający dostarczenie ciepła do centralnego ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej dla 15 wielorodzinnych budynków mieszkalnych. Jego charakterystyczne wielkości przedstawiono w tabeli 5.1.

5.1.7. Węzeł ciepłowniczy SW-5 w Słupsku

Jest to grupowy dwufunkcyjny węzeł ciepłowniczy zmieszania pompowego, dostarczający ciepło na potrzeby centralnego ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej do osiedla domków jednorodzinnych i 29 wielorodzinnych budynków mieszkalnych. Jego charakterystyczne wielkości przedstawiono w tabeli 5.1.

5.1.8. Zestawienie podstawowych urządzeń i wielkości badanych węzłów cieplowniczych (tabela 5.1.)

Tabela 5.1. Charakterystyka podstawowych urządzeń i wielkości badanych węzłów cieplowniczych

	Grunwaldzka 45	SW-0	SW-1	SW-2	SW-3	SW-4	SW-5
Obliczeniowe zapotrzebowanie na ciepło dla c.o. [kW]	1356	1370	2788	1496	2719	1188	5580
Obliczeniowe zapotrzebowanie na ciepło dla c.w.u. [kW]	305	232	514	261	461	177	727
Całkowite zapotrzebowanie na ciepło [kW]	1661	1675	3302	1757	3180	1365	6307
Udział ciepłej wody A_{cw}	0,225	0,223	0,184	0,174	0,170	0,149	0,173
Liczba zasilanych budynków	6	12	18+131	11	18	15	29+46
Liczba mieszkań	1092	1002	1961	1230	1933	1176	6000
Obliczeniowa temperatura wewnętrzna t_i [°C]	20	20	20	20	20	20	20
Obliczeniowe parametry wody instalacyjnej c.o. t_z/t_p [°C]	95/70	95/70	95/70	95/70	95/70	95/70	95/70
Współczynnik zależny od rodzaju grzejnika m	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Obliczeniowe parametry c.w.u. t_{cw}/t_{wz} [°C]	55/10	55/10	55/10	55/10	55/10	55/10	55/10

Tabela 5.1. c.d. Charakterystyka podstawowych urządzeń i wielkości badanych węzłów ciepłowniczych

	Grunwaldzka 45	SW-0	SW-1	SW-2	SW-3	SW-4	SW-5
Regulator elektroniczny	Komputer IBM	RZS Sauter	RZS Sauter	RZS Sauter	RZS Sauter	RZS Sauter	RZS Sauter
Zawór regulacyjny V_{CO}	Danfoss IV2 $k_V=40 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-50 $k_V=40 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-65 $k_V=63 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-50 $k_V=40 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-65 $k_V=63 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-50 $k_V=40 \text{ m}^3/\text{h}$	2x Sauter V6F-65 $k_V=63 \text{ m}^3/\text{h}$
Zawór regulacyjny V_{CO2}	Brak	Sauter V6F-50 $k_V=40 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-32 $k_V=16 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-40 $k_V=25 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-32 $k_V=16 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-40 $k_V=25 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-50 $k_V=40 \text{ m}^3/\text{h}$
Zawór regulacyjny V_{CW}	Danfoss IV2 $k_V=16 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-40 $k_V=25 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-65 $k_V=63 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-32 $k_V=16 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-65 $k_V=63 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-32 $k_V=16 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-65 $k_V=63 \text{ m}^3/\text{h}$
Zawór regulacyjny V_{CW2}	Danfoss IV2 $k_V=10 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-50 $k_V=40 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-25 $k_V=10 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-50 $k_V=40 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-25 $k_V=10 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-50 $k_V=40 \text{ m}^3/\text{h}$	Sauter V6F-50 $k_V=40 \text{ m}^3/\text{h}$
Przepływomierz W1 błąd ΔW_1	Powogaz MW100 $Q_n 60 \text{ m}^3/\text{h}$ $\pm 3\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW100 $Q_n 60 \text{ m}^3/\text{h}$ $\pm 3\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW100 $Q_n 60$ m^3/h $\pm 3\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW100 $Q_n 60$ m^3/h $\pm 3\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW125 $Q_n 100$ m^3/h $\pm 3\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW100 $Q_n 60$ m^3/h $\pm 3\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW200 $Q_n 250$ m^3/h $\pm 3\% \div \pm 5\%$
Przepływomierz W2 błąd ΔW_2	Brak	Powogaz MW150 $Q_n 150 \text{ m}^3/\text{h}$ $\pm 3\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW100 $Q_n 60$ m^3/h $\pm 3\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW100 $Q_n 60$ m^3/h $\pm 3\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW125 $Q_n 100$ m^3/h $\pm 3\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW100 $Q_n 60$ m^3/h $\pm 3\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW200 $Q_n 250$ m^3/h $\pm 3\% \div \pm 5\%$
Przepływomierz W3 błąd ΔW_3	Powogaz MW65 $Q_n 25 \text{ m}^3/\text{h}$ $\pm 2\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW65 $Q_n 25 \text{ m}^3/\text{h}$ $\pm 2\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW65 $Q_n 25 \text{ m}^3/\text{h}$ $\pm 2\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW65 $Q_n 25 \text{ m}^3/\text{h}$ $\pm 2\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW65 $Q_n 25 \text{ m}^3/\text{h}$ $\pm 2\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW65 $Q_n 25 \text{ m}^3/\text{h}$ $\pm 2\% \div \pm 5\%$	Powogaz MW125 $Q_n 100$ m^3/h $\pm 2\% \div \pm 5\%$
Czujniki temperatury błąd ΔT	PT-500 $\pm 1.25\%$	PT-500 $\pm 1.25\%$	PT-500 $\pm 1.25\%$	PT-500 $\pm 1.25\%$	PT-500 $\pm 1.25\%$	PT-500 $\pm 1.25\%$	PT-500 $\pm 1.25\%$
Rodzaj wymienników c.w.u. I stopnia	2xJAD 6/50 równolegle	2xJAD 6/50 równolegle	4xJAD 6/50 równolegle	3xJAD 6/50 równolegle	4xJAD 6/50 równolegle	3xJAD 6/50 równolegle	6xJAD 6/50 równolegle
Rodzaj wymienników c.w.u. II stopnia	2xJAD 6/50 równolegle	1xJAD 6/50	2xJAD 6/50 równolegle	2xJAD 6/50 równolegle	2xJAD 6/50 równolegle	2xJAD 6/50 równolegle	4xJAD 6/50 równolegle
Zasobniki c.w.u. [m^3]	3,0	16,0	12,0	12,0	20,0	16,0	40,0

5.2. Metodyka opracowania wyników pomiarów

5.2.1. Opomiarowanie węzłów

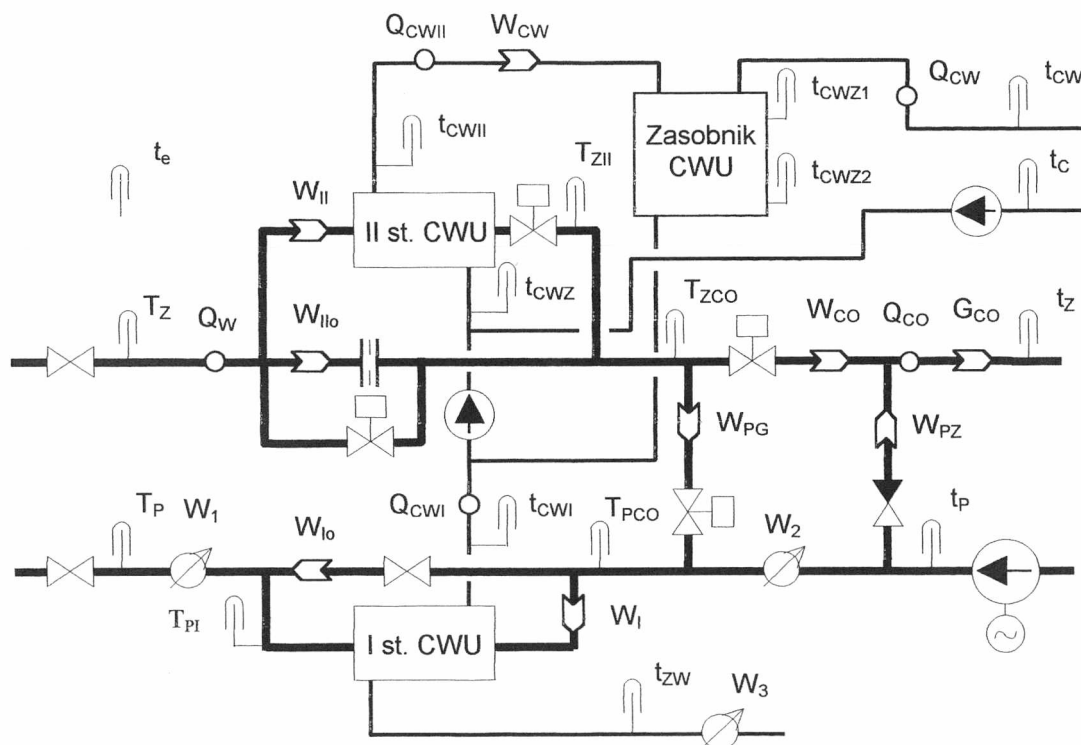
Węzły ciepłownicze są obiektami, w których dokonuje się pomiaru niektórych wielkości w sposób bezpośredni, za pomocą różnych przyrządów metrologicznych. Na ich podstawie inne wielkości można obliczyć za pomocą zależności funkcyjnych; są to wówczas wielkości mierzone pośrednio.

W badanych węzłach ciepłowniczych pomiary bezpośrednie dokonywane były za pomocą czujników temperatury i ciśnienia oraz przepływomierzy. Mierzone wielkości nieelektryczne za pomocą przetworników zamieniane były na sygnały elektryczne, które gromadzono w systemach rejestracji. Wszystkie pomiary prowadzone zostały w funkcji czasu rzeczywistego [12].

Podstawowymi wielkościami mierzonymi bezpośrednio w badanych węzłach ciepłowniczych były: temperatura, ciśnienie i strumień objętości przepływającej wody.

Na schemacie badanych węzłów ciepłowniczych (rys. 5.1.) zaznaczono możliwe miejsca pomiarów bezpośrednich temperatury i strumienia objętości wody oraz miejsca pośredniego pomiaru objętości strumienia wody i ciepła. Pomiar bezpośredni oznaczony został symbolem przyrządu mierniczego (termometru i wodomierza), a pomiar pośredni kółkiem – strumienia ciepła i strzałką – strumienia wody. Na schemacie nie zaznaczono miejsc pomiaru ciśnienia wody sieciowej ze względu na niewystępowanie tych wielkości bezpośrednio w równaniach strumienia przepływu wody i ciepła.

Za pomocą zastosowanego systemu pomiarowego możliwe jest mierzenie bezpośrednio 17 temperatur i 2 lub 3 przepływy (w węzłach SW-0 do SW-5 dokonywany jest pomiar strumienia wody sieciowej do układu c.o. $W_2 = W_{CO}$). Jednak ze względu na wadliwie działający układ rejestracji wielkości strumienia wody sieciowej W_2 w przeprowadzanych analizach nie uwzględniano tej wielkości.



Rys. 5.1. Schemat węzła cieplowniczego z punktami pomiaru bezpośredniego i pośredniego.

Na podstawie schematu węzła ciepłowniczego (rys. 5.1.) ułożono równania opisujące wielkości pomiaru pośredniego, tj. strumienia objętości wody oraz strumienia ciepła przenoszonego przez wodę.

5.2.2. Równania strumienia przepływu wody

- strumień wody sieciowej kierowanej do układu centralnego ogrzewania W_{CO} (w przypadku braku przepływomierza W_2) [m^3/h]:

$$W_{CO} = W_1 \cdot \frac{T_{ZCO} - T_{PCO}}{T_{ZCO} - t_p} \quad / 5.3/$$

- strumień wody instalacyjnej centralnego ogrzewania G_{CO} [m³/h]:

$$\mathbf{G}_{\text{CO}} = \mathbf{W}_1 \cdot \frac{\mathbf{T}_{\text{ZCO}} - \mathbf{T}_{\text{PCO}}}{\mathbf{t}_Z - \mathbf{t}_P} \quad / 5.4/$$

- strumień wody podmieszania gorącego W_{PG} [m³/h]:

$$W_{PG} = W_1 \cdot \frac{T_{PCO} - t_p}{T_{ZCO} - t_p} \quad / 5.5/$$

- strumień wody podmieszania zimnego W_{PZ} [m³/h]:

$$W_{PZ} = W_1 \cdot \left(\frac{T_{ZCO} - T_{PCO}}{t_Z - t_p} - \frac{T_{ZCO} - T_{PCO}}{T_{ZCO} - t_p} \right) \quad / 5.6/$$

- strumień wody sieciowej kierowanej na wymiennik ciepłej wody drugiego stopnia W_{II} [m³/h]:

$$W_{II} = W_1 \cdot \frac{T_Z - T_{ZCO}}{T_Z - T_{ZII}} \quad / 5.7/$$

- strumień wody sieciowej przepływającej przez obejście wymiennika ciepłej wody drugiego stopnia W_{IIo} [m³/h]:

$$W_{IIo} = W_1 \cdot \frac{T_{ZCO} - T_{ZII}}{T_Z - T_{ZII}} \quad / 5.8/$$

- strumień wody sieciowej kierowanej na wymiennik ciepłej wody pierwszego stopnia W_I [m³/h]:

$$W_I = W_1 \cdot \frac{T_{PCO} - T_p}{T_{PCO} - T_{PI}} \quad / 5.9/$$

- strumień wody sieciowej przepływającej przez obejście wymiennika ciepłej wody pierwszego stopnia W_{Io} [m³/h]:

$$W_{Io} = W_1 \cdot \frac{T_p - T_{PI}}{T_{PCO} - T_{PI}} \quad / 5.10/$$

5.2.3. Równania strumienia ciepła

Przy określaniu wartości strumienia ciepła uwzględniono następujące zależności właściwości fizycznych wody od jej temperatury [10]:

- gęstość wody $[\text{t}/\text{m}^3]$:

$$\rho(T) = a_1 - a_2 \cdot T - a_3 \cdot T^2 \quad / 5.11/$$

$$\left. \begin{array}{l} a_1 = 1,006 \\ a_2 = 2,6 \cdot 10^{-4} \\ a_3 = 2,2 \cdot 10^{-6} \end{array} \right\} \quad / 5.12/$$

- ciepło właściwe wody $[\text{J}/(\text{g}^\circ\text{C})]$:

$$c_p(T) = b_1 + b_2 \cdot T - b_3 \cdot T^2 + b_4 \cdot T^3 \quad / 5.13/$$

$$\left. \begin{array}{ll} b_1 = 4,174784 & b_2 = 1,785308 \cdot 10^{-5} \\ b_3 = 5,097403 \cdot 10^{-7} & b_4 = 4,216721 \cdot 10^{-8} \end{array} \right\} \quad / 5.14/$$

- oraz współczynnik przeliczeniowy $D=0,27778$

$$\frac{t}{h \cdot kW} = D \cdot \frac{g}{s \cdot W}$$

- strumień ciepła oddanego do węzła ciepłowniczego Q_w [kW]:

$$Q_w = W_l \cdot (T_Z - T_P) \cdot c_p(T_{sr1}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \quad / 5.15/$$

$$T_{sr1} = \frac{T_Z + T_P}{2} \quad / 5.16/$$

- strumień ciepła do ogrzania wody instalacyjnej centralnego ogrzewania Q_{CO} [kW]:

$$Q_{CO} = W_1 \cdot (T_{ZCO} - T_{PCO}) \cdot c_p(T_{sr2}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \quad / 5.17/$$

$$T_{sr2} = \frac{T_{ZCO} + t_P}{2} \quad / 5.18/$$

- strumień ciepła przekazanego w wymienniku ciepłej wody pierwszego stopnia Q_I [kW]:

$$Q_{CWI} = W_1 \cdot (T_{PCO} - T_P) \cdot c_p(T_{sr3}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \quad / 5.19/$$

$$T_{sr3} = \frac{T_{PCO} + T_{PI}}{2} \quad / 5.20/$$

- strumień ciepła przekazanego w wymienniku ciepłej wody drugiego stopnia Q_{II} [kW]:

$$Q_{CWI} = W_1 \cdot (T_Z - T_{ZCO}) \cdot c_p(T_{sr4}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \quad / 5.21/$$

$$T_{sr4} = \frac{T_Z + T_{ZII}}{2} \quad / 5.22/$$

- strumień ciepła przekazanego na ogrzanie ciepłej wody użytkowej Q_{CW} [kW]:

$$Q_{CW} = Q_{CWI} + Q_{CWI} \quad / 5.23/$$

$$Q_{CW} = W_1 \cdot [(T_{PCO} - T_P) \cdot c_p(T_{sr3}) + (T_Z - T_{ZCO}) \cdot c_p(T_{sr4})] \cdot \rho(T_Z) \cdot D$$

5.3. Analiza metrologiczna przeprowadzonych pomiarów

Zgodnie z teorią pomiarów, błędy pomiarowe dzielą się na błędy systematyczne, błędy przypadkowe i omyłki. W przypadku analizowanych układów pomiarowych w badanych węzłach ciepłowniczych, ze względu na założenie dobrej znajomości parametrów pomiaru, omyłki i błędy przypadkowe można było stosunkowo łatwo wykryć i usunąć z serii rezultatów. Prezentowana analiza metrologiczna dotyczyć więc będzie tylko błędów systematycznych spowodowanych zastosowaną metodą i aparaturą pomiarową.

Jeżeli wartość y mierzona pośrednio jest obliczana na podstawie zależności funkcyjnej

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad / 5.24/$$

to błąd bezwzględny graniczny systematyczny pomiaru wielkości y jest określony wyrażeniem:

$$\Delta y = \pm \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \right| |\Delta x_i| \quad / 5.25/$$

gdzie Δx_i – błąd graniczny pomiaru wielkości x_i mierzonej bezpośrednio.

Jeżeli liczba wielkości mierzonych bezpośrednio jest większa niż 3, to określanie błędu granicznego pomiaru y w oparciu o wzór /5.25/ powoduje jego zawyżenie. Zakłada się wówczas, że błędy Δx_i przyjmują dowolne wartości z przedziału $\langle -\Delta x_i, \Delta x_i \rangle$ i błąd Δy jest zmienną losową. W takiej sytuacji graniczny błąd, systematyczny statystyczny wyraża się wzorem:

$$\Delta y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \right)^2 (\Delta x_i)^2} \quad / 5.26/$$

Natomiast błąd względny graniczny systematyczny definiuje się jako:

$$\partial y = \pm \left(\frac{\Delta y}{y} \right) \cdot 100\% \quad / 5.27/$$

W pracy [12] stwierdzono, że pochodne cząstkowe ciepła właściwego i gęstości po temperaturach $\partial c_p(T)$ i $\partial \rho(T)$ przyjmują wartości znacznie mniejsze od pozostałych pochodnych. Wynika to małych czułości tych wartości na zmiany temperatury. Dlatego też, można znacznie uprościć postacie składowych błędów granicznych, a niektóre z nich w ogóle pominąć.

Błąd względny δQ_{CO} pomiaru ilości ciepła do ogrzania wody instalacyjnej centralnego ogrzewania Q_{CO} według równania /5.17/ zależy w związku z powyższym od błędów pomiaru temperatur T_{ZCO} i T_{PCO} oraz strumienia przepływu W_1 . Błąd względny graniczny, systematycznego statystycznego pomiaru pośredniego ilości ciepła Q_{CO} wynosi:

$$\delta Q_{CO} = \pm \sqrt{(\delta Q_{CO}(T_{ZCO}))^2 + (\delta Q_{CO}(T_{PCO}))^2 + (\delta Q_{CO}(W_1))^2} \quad / 5.28/$$

gdzie:

$$\delta Q_{CO}(T_{ZCO}) = W_1 \cdot c_p(T_{sr2}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \cdot \frac{\Delta T_{ZCO}}{Q_{CO}} \cdot 100\% \quad / 5.29/$$

$$\delta Q_{CO}(T_{PCO}) = -W_1 \cdot c_p(T_{sr2}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \cdot \frac{\Delta T_{PCO}}{Q_{CO}} \cdot 100\% \quad / 5.30/$$

$$\delta Q_{CO}(W_1) = (T_{ZCO} - T_{PCO}) \cdot c_p(T_{sr2}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \cdot \frac{\Delta W_1}{Q_{CO}} \cdot 100\% \quad / 5.31/$$

Błąd względny δQ_{CW} pomiaru ilości ciepła do ogrzania ciepłej wody użytkowej Q_{CW} według równania /5.23/ zależy od błędów pomiaru temperatur T_Z , T_P , T_{ZCO} i T_{PCO} oraz strumienia przepływu W_1 . Błąd względny graniczny, systematycznego statystycznego pomiaru pośredniego ilości ciepła Q_{CW} wynosi:

$$\delta Q_{CW} = \pm \sqrt{(\delta Q_{CW}(T_{PCO}))^2 + (\delta Q_{CW}(T_P))^2 + (\delta Q_{CW}(T_Z))^2 + (\delta Q_{CW}(T_{ZCO}))^2 + (\delta Q_{CW}(W_1))^2} \quad / 5.32/$$

gdzie:

$$\delta Q_{CW}(T_{PCO}) = W_1 \cdot c_p(T_{sr3}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \cdot \frac{\Delta T_{PCO}}{Q_{CW}} \cdot 100\% \quad / 5.33/$$

$$\delta Q_{CW}(T_P) = W_1 \cdot c_p(T_{sr3}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \cdot \frac{\Delta T_P}{Q_{CW}} \cdot 100\% \quad / 5.34/$$

$$\delta Q_{CW}(T_Z) = W_1 \cdot c_p(T_{sr4}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \cdot \frac{\Delta T_Z}{Q_{CW}} \cdot 100\% \quad / 5.35/$$

$$\delta Q_{CW}(T_{ZCO}) = -W_1 \cdot c_p(T_{sr4}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \cdot \frac{\Delta T_{ZCO}}{Q_{CW}} \cdot 100\% \quad / 5.36/$$

$$\delta Q_{CW}(W_1) = ((T_{PCO} - T_P) \cdot c_p(T_{sr3}) + (T_Z - T_{ZCO}) \cdot c_p(T_{sr4})) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \cdot \frac{\Delta W_1}{Q_{CW}} \cdot 100\% \quad / 5.37/$$

Błąd względny δQ_W pomiaru ilości ciepła oddanego do węzła ciepłowniczego Q_W według równania /5.15/ zależy od błędów pomiaru temperatur T_Z i T_P oraz strumienia przepływu W_1 . Błąd względny graniczny, systematycznego statystycznego pomiaru pośredniego ilości ciepła Q_W wynosi:

$$\delta Q_W = \pm \sqrt{(\delta Q_W(T_Z))^2 + (\delta Q_W(T_P))^2 + (\delta Q_W(W_1))^2} \quad / 5.38/$$

gdzie:

$$\delta Q_w(T_Z) = W_1 \cdot c_p(T_{sr1}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \cdot \frac{\Delta T_Z}{Q_w} \cdot 100\% \quad / 5.39/$$

$$\delta Q_w(T_P) = -W_1 \cdot c_p(T_{sr1}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \cdot \frac{\Delta T_P}{Q_w} \cdot 100\% \quad / 5.40/$$

$$\delta Q_w(W_1) = (T_Z - T_P) \cdot c_p(T_{sr1}) \cdot \rho(T_Z) \cdot D \cdot \frac{\Delta W_1}{Q_w} \cdot 100\% \quad / 5.41/$$

Dla wszystkich wielkości mierzonych bezpośrednio, składowe błędów względnych spowodowanych błędami instrumentalnymi pomiarów przepływu W_1 , W_2 i W_3 są co najwyżej klasy zastosowanych przepływomierzy. Tak więc składowa błędów względnych δy wielkości mierzonej pośrednio, zależna od przepływu, będzie przyjmowała dla stałej wartości błędów ΔW_x odpowiednio postać:

$$\delta y = \pm \left(\frac{\Delta W_1}{W_1} \right) \cdot 100\%, \quad \delta y = \pm \left(\frac{\Delta W_2}{W_2} \right) \cdot 100\%, \quad \delta y = \pm \left(\frac{\Delta W_3}{W_3} \right) \cdot 100\% \quad / 5.42/$$

Natomiast zastosowane czujniki i przetworniki temperatur o zmiennym błędzie instrumentalnym będą w różny sposób wpływać na błąd względny mierzonych pośrednio wielkości. Wielkości tych błędów zgodne będą z postaciami wyrażeń zależnych od składowych temperaturowych.

5.4. Badania poboru ciepłej wody użytkowej

5.4.1. Dane pomiarowe

Badania struktury konsumpcji ciepłej wody użytkowej oparto o wyniki pomiarowe pracy trzech węzłów SW-1, SW-3 i SW-5 w Słupsku, zarejestrowane w okresie od roku 1994 do 1998. Wszystkie budynki, zasilane w ciepłą wodę z powyższych węzłów grupowych, posiadają standardowe wyposażenie w przybory sanitarne (wanna, umywalka, zlewozmywak, miska ustępowa) oraz sprawnie działający układ cyrkulacyjny. Ponad 90% mieszkań posiada zainstalowane wodomierze mieszkaniowe, według których zarządcy budynków prowadzą rozliczenie z indywidualnym odbiorcą za zużyta wodę ciepłą.

Wartość poboru strumienia wody ciepłej przez odbiorców (budynki mieszkalne) określano na podstawie pomiaru strumienia wody zimnej dopływającego do układu przygotowania c.w.u. Przyrządem pomiarowym był wodomierz z nadajnikiem impulsów W3 umieszczony w dwufunkcyjnym węźle ciepłowniczym (rys. 5.1.). Pomiary rejestrowane były z częstotliwością piętnastominutową i archiwizowane przy pomocy centrali regulacyjnej RZS Sauter. Utworzony zbiór ciągu wartości mierzonych przez wodomierz W3 obejmuje dla jednego sezonu pomiarowego i jednej centrali ponad 35000 danych. Wszystkie dane pomiarowe z pracy węzłów ciepłowniczych SW-0÷SW5 zostały udostępnione przez Energetykę Ciepłą Słupsk sp. z o.o. w ramach współpracy naukowej z Katedrą Klimatyzacji i Ciepłownictwa Politechniki Wrocławskiej i przy akceptacji pomysłodawcy oryginalnego rozwiązania konstrukcyjnego węzła Ryszarda Śnieżyka.

Zbiory wyników pomiarowych z regulatora RZS Sauter przed dalszą analizą zostały przez autora poddane kontroli poprawności zapisu w celu wyeliminowania wszystkich omyłek i błędów przypadkowych spowodowanych zakłóceniami działania czujników, przetworników i innych elementów toru pomiarowego. Czynnikiem zakłócającym pracę układu rejestrującego jest przede wszystkim wpływ pola elektromagnetycznego pochodzącego np. od oświetlenia jarzeniowego.

Przefiltrowane dane pomiarowe zostały następnie posortowane według daty dnia roku i godziny rejestracji. Powstała baza danych stanowi materiał pomiarowy do dalszych analiz i obliczeń poboru ciepłej wody użytkowej w budynkach mieszkalnych przygotowywanej w sposób centralny w grupowych dwufunkcyjnych węzłach ciepłowniczych.

5.4.2. Nierównomierność dobowego poboru ciepłej wody użytkowej

Sposób rozliczania odbiorcy końcowego z pobranej przez niego ciepłej wody ma decydujący wpływ na wielkość jej zużycia. Różnice w wielkości konsumpcji wody ciepłej jakie występują w przypadku rozliczenia według wodomierza mieszkaniowego, a w oparciu o ryczałt, jak wykazują prowadzone badania [14],[41], sięgają nawet 60%. Można się więc spodziewać znacznego spadku poboru ciepłej wody użytkowej w stosunku do danych normowych ($110 \div 130$ l/d.j.n.) oraz możliwych zmian w dobowym rozkładzie poboru wody i jego wartości charakterystycznych – maksymalnego i średnio godzinowego poboru wody.

Dla zwymiarowania urządzeń przygotowania c.w.u. konieczna jest znajomość rozkładu poboru ciepłej wody oraz poborów średnich i maksymalnych. Aktualnie, brak jest informacji dotyczących, jakie wartości zużycia ciepłej wody użytkowej w budynkach mieszkalnych wielorodzinnych całkowicie wyposażonych w wodomierze mieszkaniowe należy przyjmować przy obliczaniu węzłów ciepłej wody.

Pobór ciepłej wody w budynkach mieszkalnych charakteryzuje się dużą zmiennością, zarówno w czasie doby jak i w poszczególnych dniach tygodnia. Jest to wielkość losowa, praktycznie nigdy nie mająca dokładnie tych samych wartości. Rzetelna analiza procesu poboru ciepłej wody użytkowej wymaga zastosowania metod rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. Nie jest to jednak główny cel pracy i dlatego przeprowadzone badania zużycia c.w.u. wykonano w sposób inżynierski.

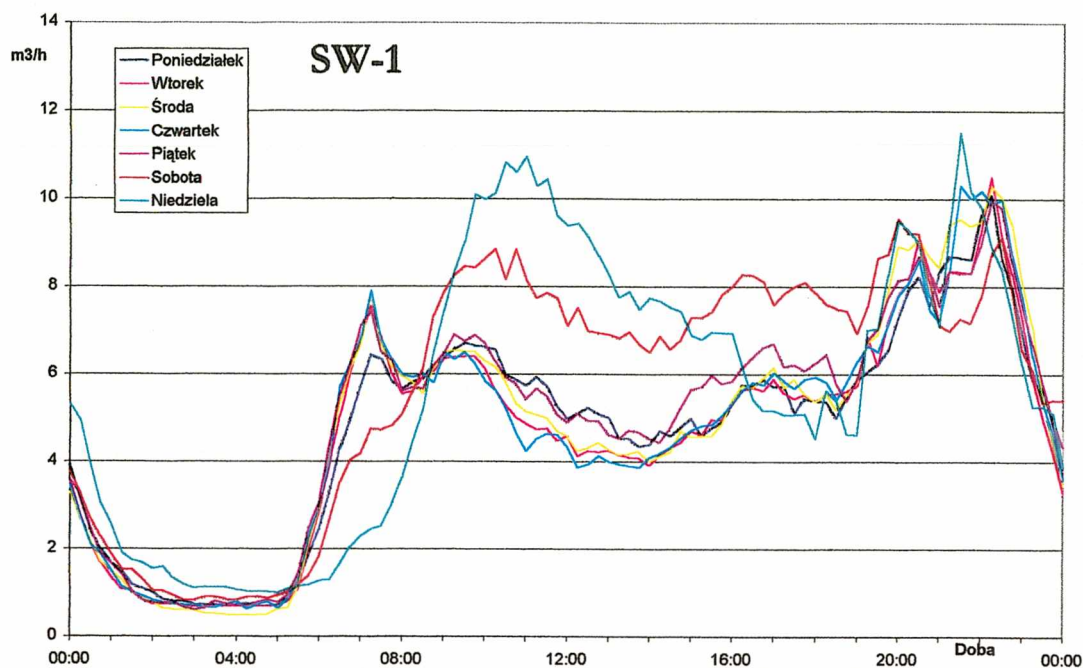
Poszczególnym dniom tygodnia, takim jak dni robocze, dni wolne od pracy i dni świąteczne, można przypisać odpowiadające im charakterystyczne cykle i założyć ich powtarzalność. Na podstawie tego założenia w oparciu o przygotowaną

bazę danych, określono dla każdego dnia tygodnia (od poniedziałku do niedzieli) średni rozkład dziennego poboru wody ciepłej. Dane pomiarowe zostały pogrupowane względem dnia tygodnia i dla każdej grupy wyliczono średnią arytmetyczną wartość poboru wody w danej chwili. Otrzymano więc uśredniony pobór ciepłej wody użytkowej w każdym dniu tygodnia.

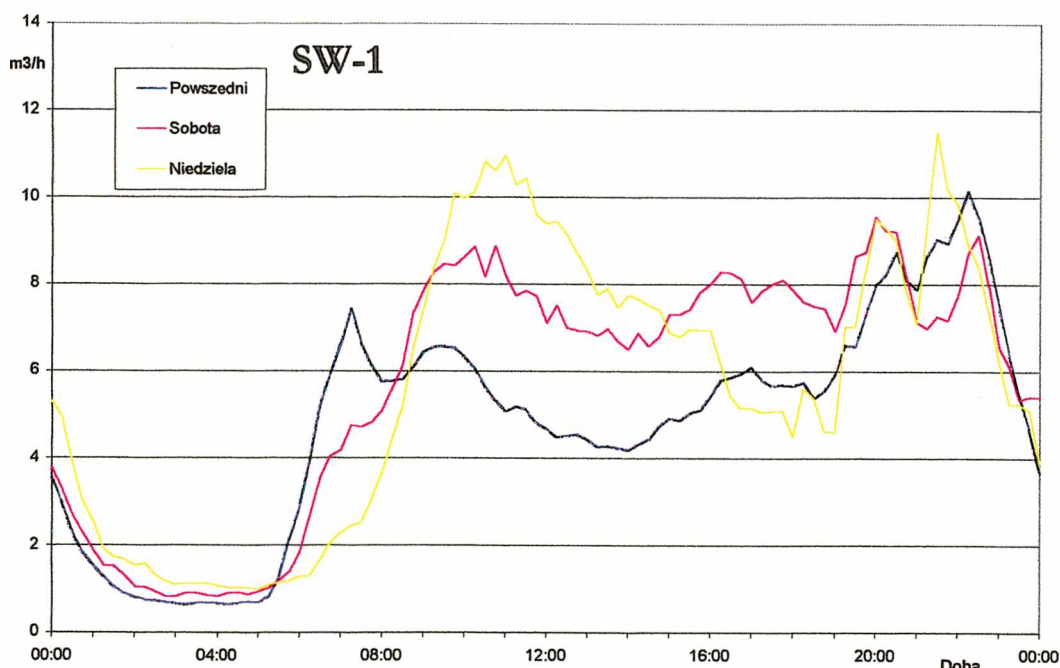
Ze względu na możliwość występowania zmiennego poboru wody ciepłej w cyklu rocznym, a szczególnie zmniejszonego jej zużycia w okresie wakacyjnym [26], przy określaniu średniego rozkładu dziennego, z serii danych wyeliminowano pomiary z okresu od czerwca do września.

Na rysunkach 5.2.÷5.23. przedstawiono uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej dostarczanej do odbiorców z węzłów ciepłowniczych SW-1, SW-3 i SW-5 w sezonach 1994/95÷1997/98. Przedstawiono na nich przebiegi zużycia wody ciepłej w każdym dniu tygodnia. Wykazały one podobieństwo w charakterze i w wartości poboru wody w dniach roboczych oraz odmienną strukturę zużycia wody w soboty i niedziele. Wprowadzono pojęcie zużycia wody ciepłej w dniu powszednim rozumiane jako średni pobór wody z dni roboczych. Otrzymano w ten sposób trzy różne wykresy opisujące charakter i zużycie ciepłej wody użytkowej w budynkach mieszkalnych w tygodniu reprezentatywnym.

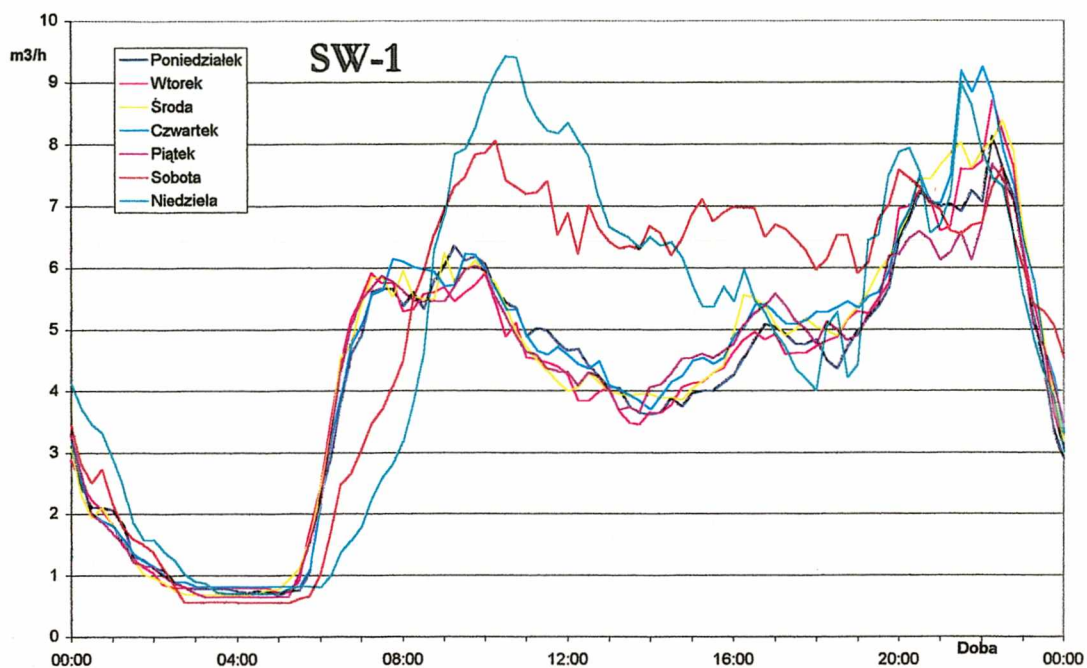
5.4.2.1. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – węzeł SW-1.



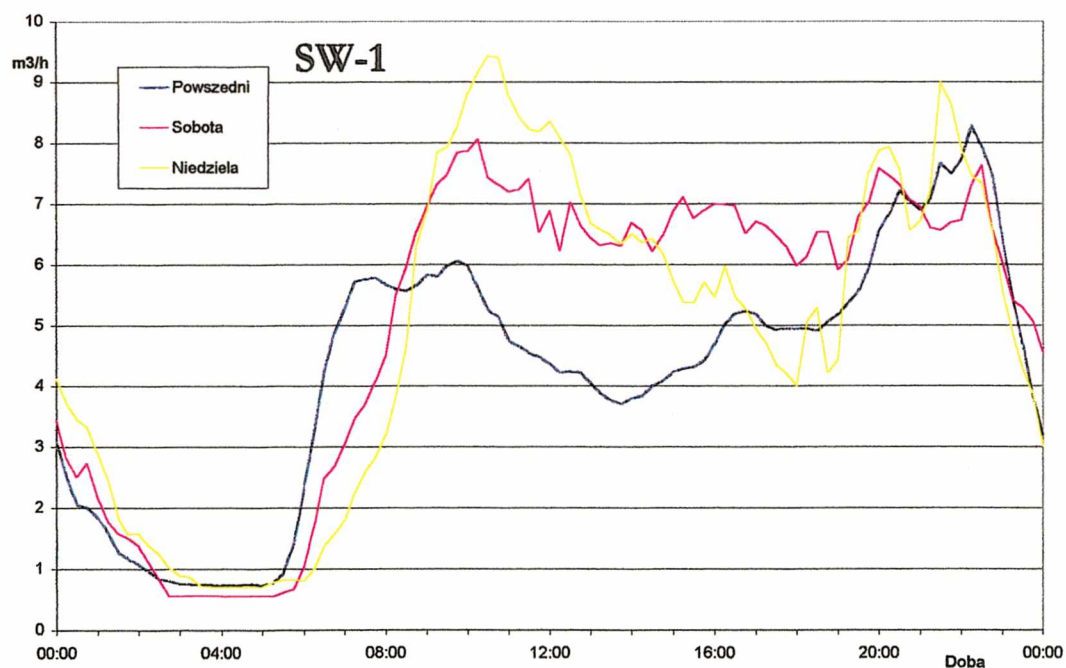
Rys. 5.2. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – sezon 1994/95.



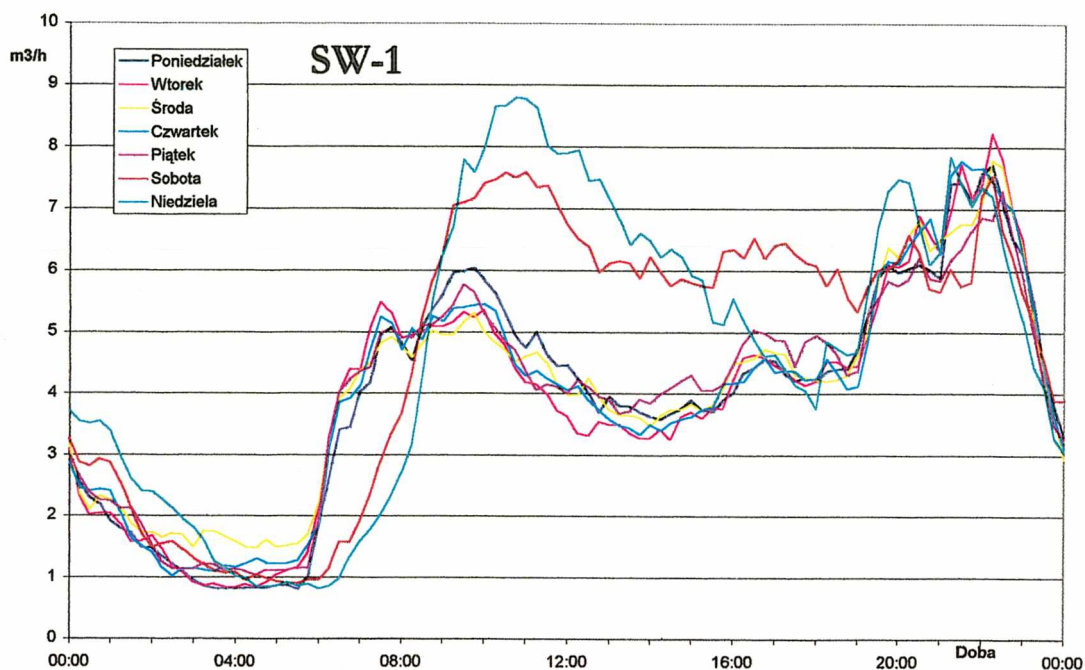
Rys. 5.3. Uśredniony pobór wody ciepłej dla dni charakterystycznych – sezon 1994/95.



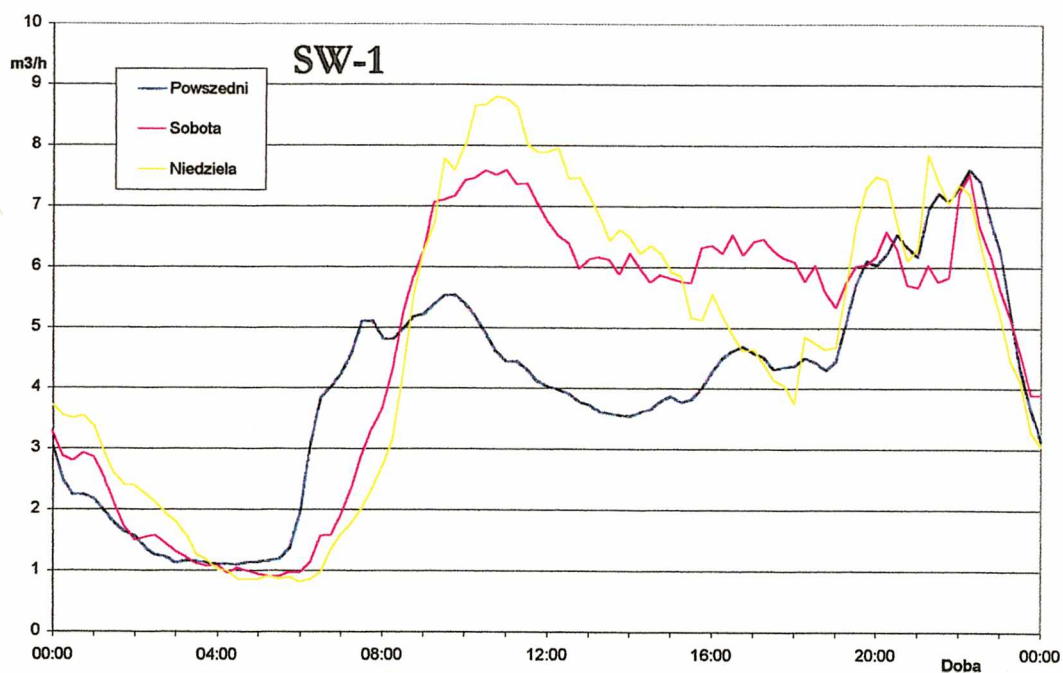
Rys. 5.4. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – sezon 1995/96.



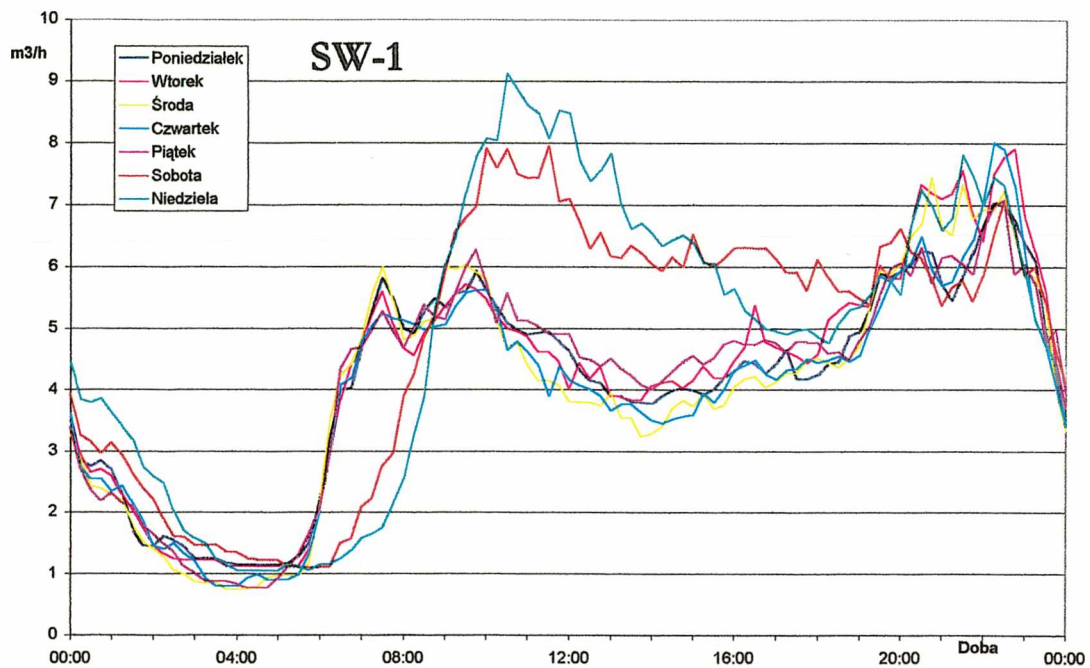
Rys. 5.5. Uśredniony pobór wody ciepłej dla dni charakterystycznych – sezon 1995/96.



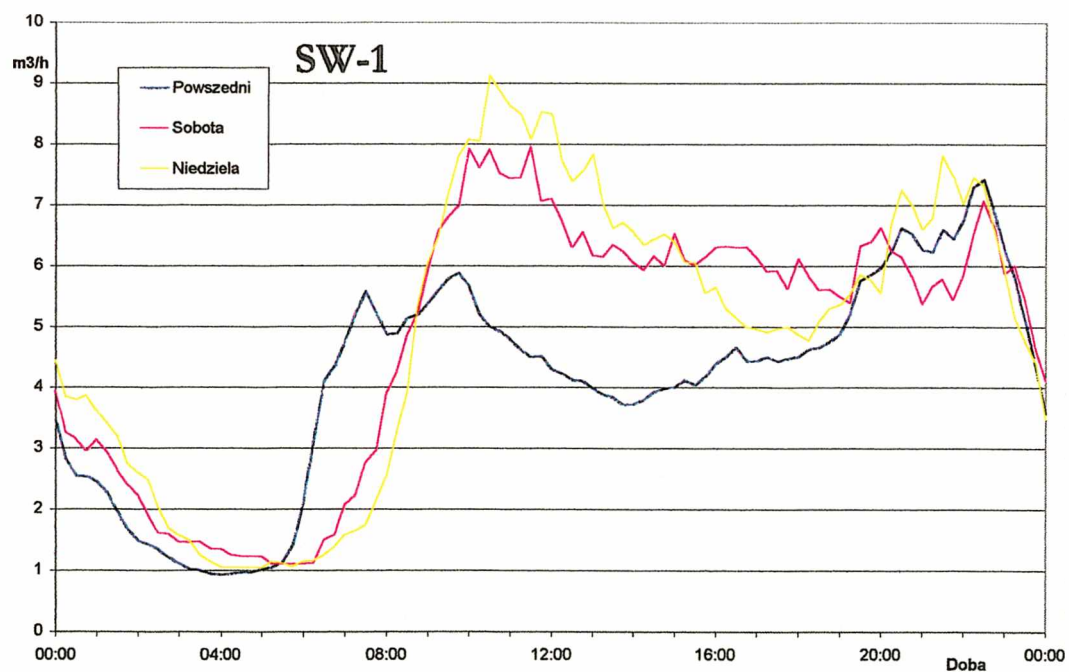
Rys. 5.6. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – sezon 1996/97.



Rys. 5.7. Uśredniony pobór wody ciepłej dla dni charakterystycznych – sezon 1996/97.

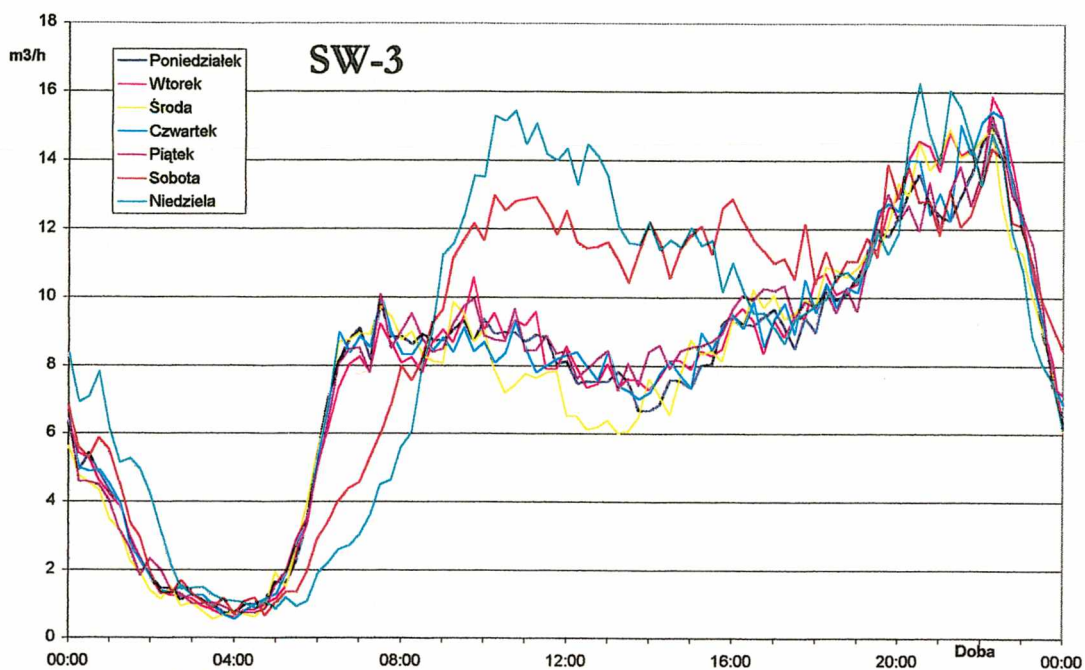


Rys. 5.8. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – sezon 1997/98.

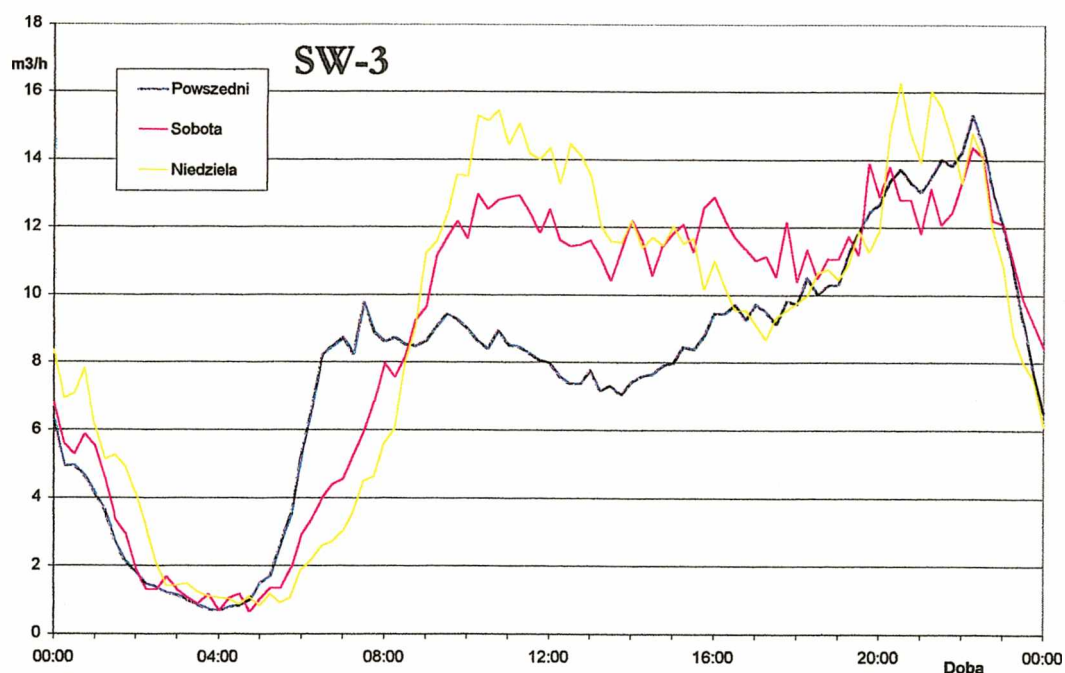


Rys. 5.9. Uśredniony pobór wody ciepłej dla dni charakterystycznych – sezon 1997/98.

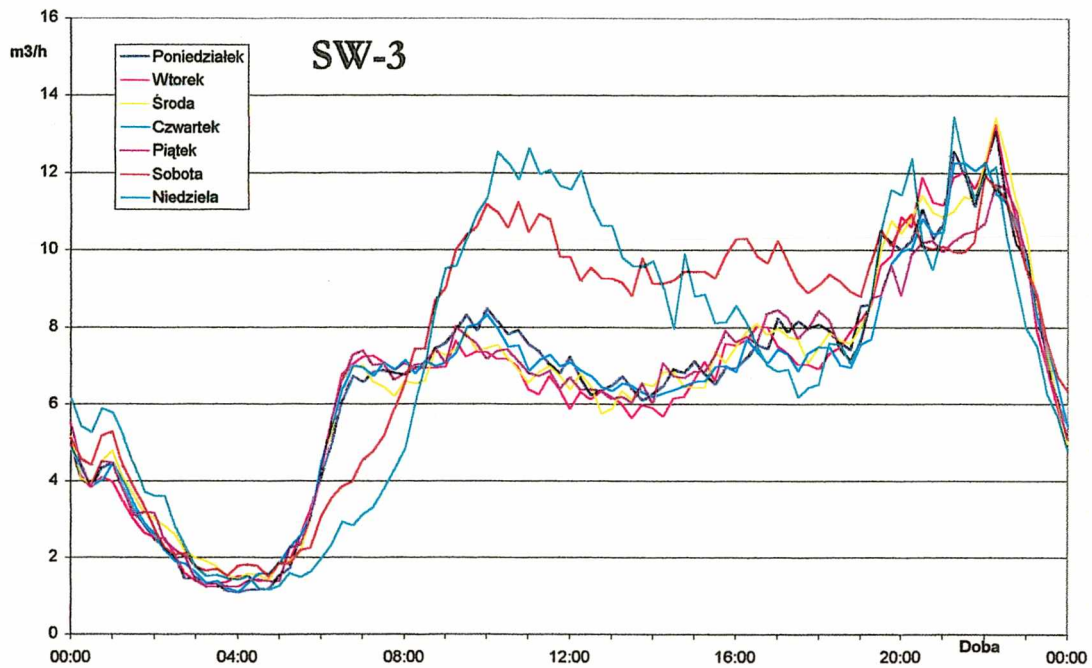
5.4.2.2. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – węzeł SW-3.



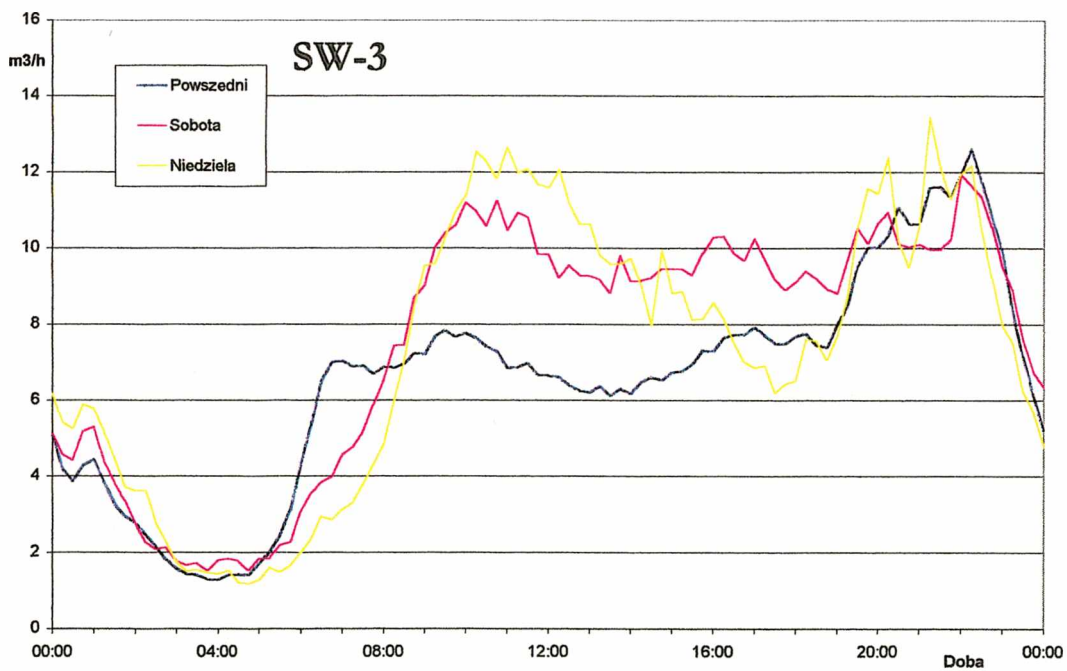
Rys. 5.10. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – sezon 1994/95.



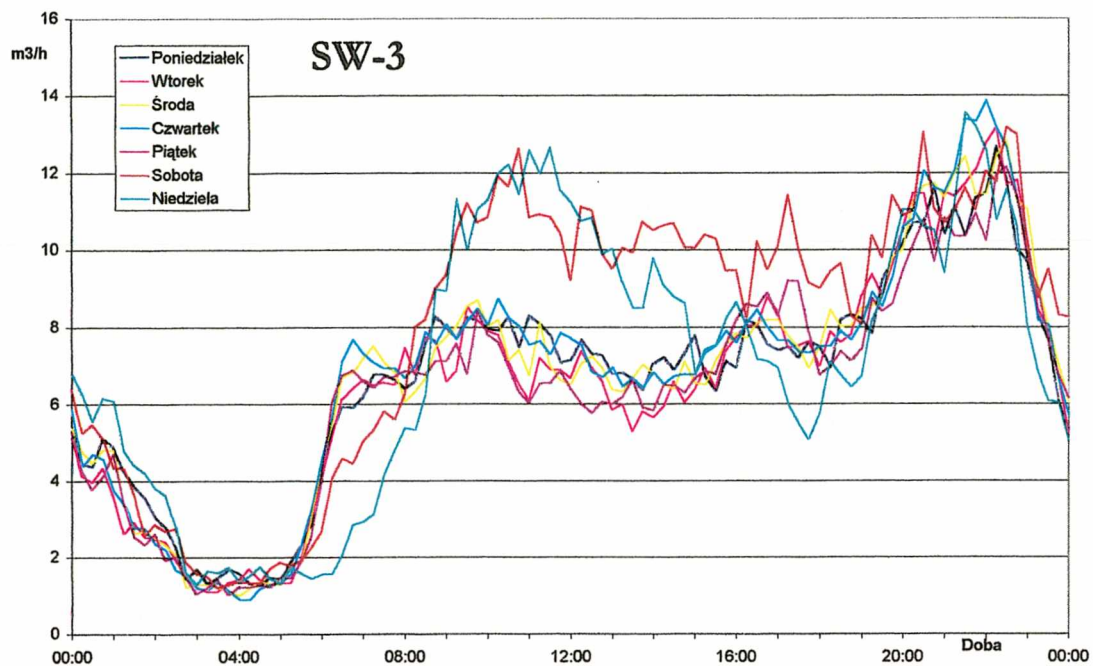
Rys. 5.11 Uśredniony pobór wody ciepłej dla dni charakterystycznych – sezon 1994/95.



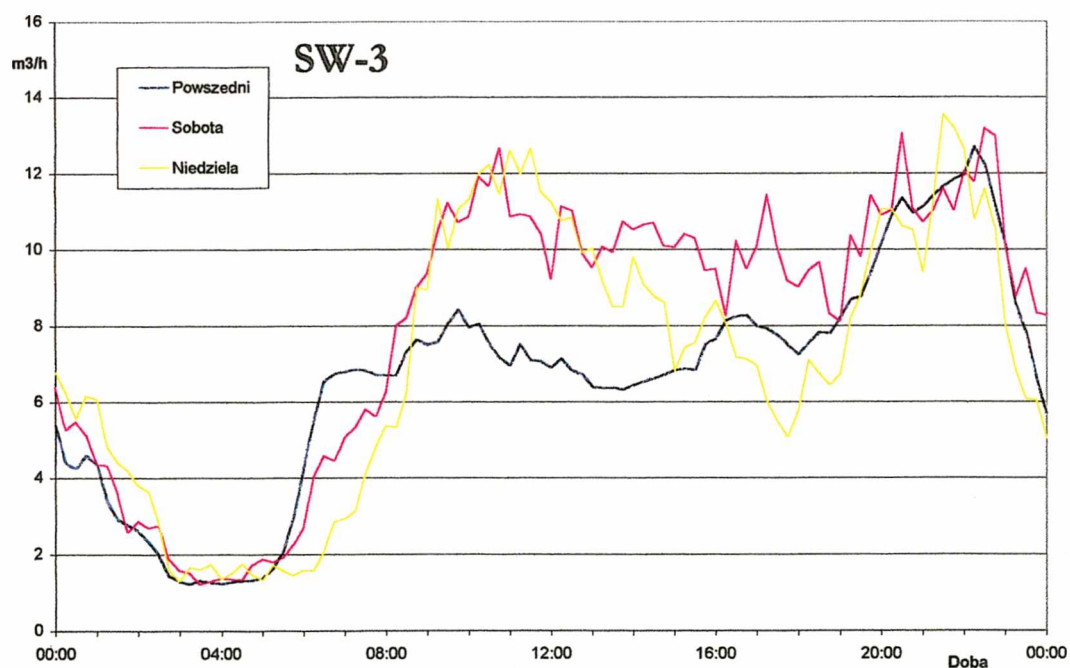
Rys. 5.12. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – sezon 1995/96.



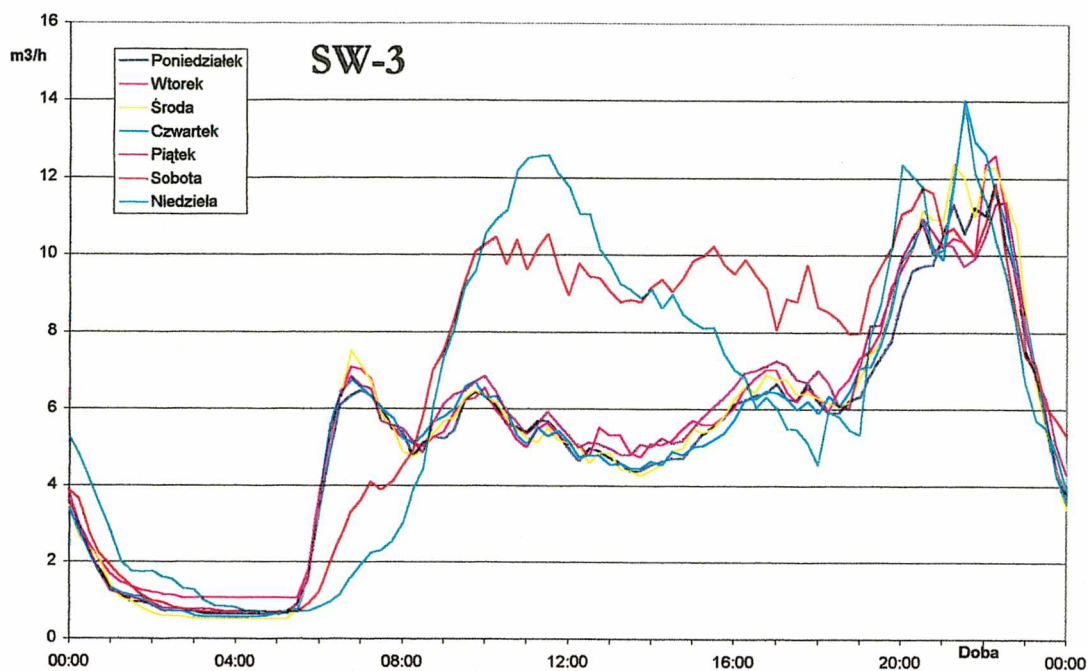
Rys. 5.13 Uśredniony pobór wody ciepłej dla dni charakterystycznych – sezon 1995/96.



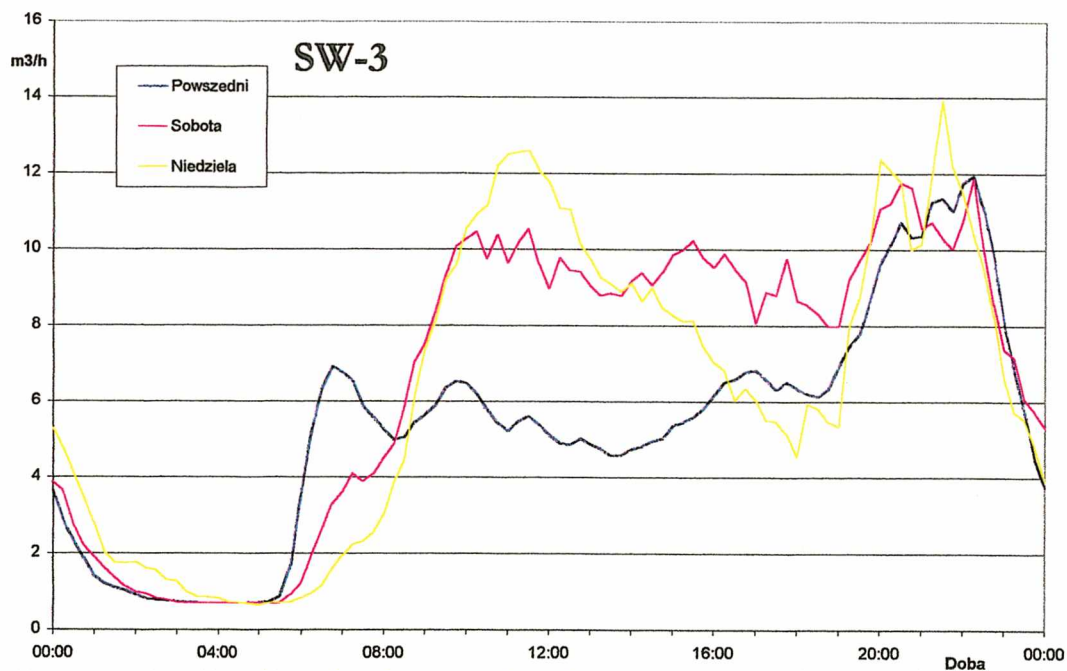
Rys. 5.14. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – sezon 1996/97.



Rys. 5.15 Uśredniony pobór wody ciepłej dla dni charakterystycznych – sezon 1996/97.

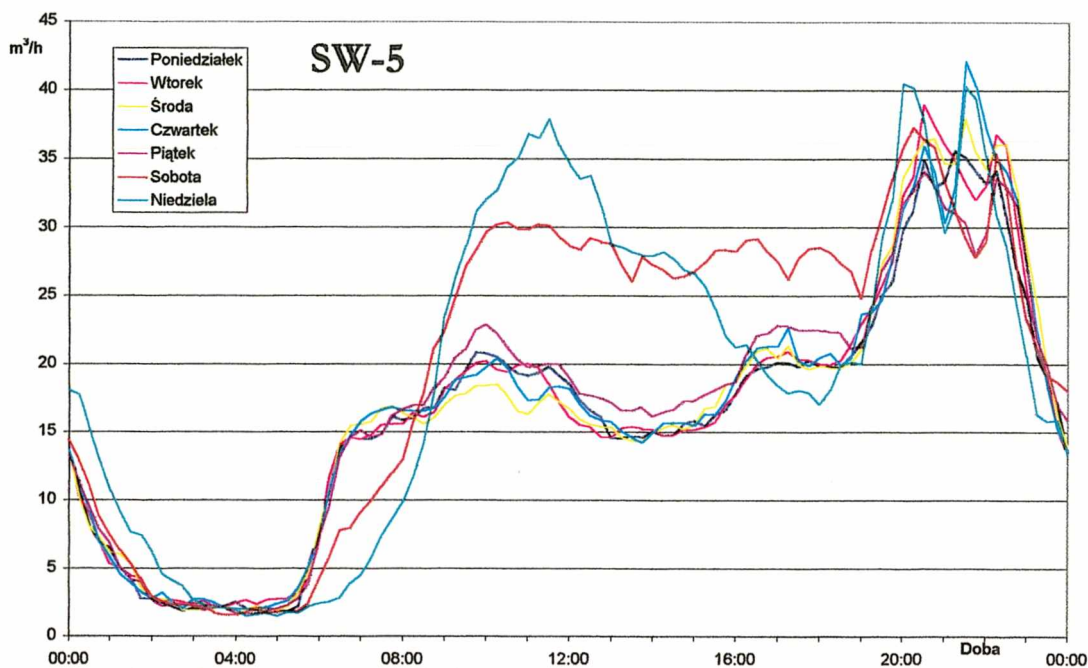


Rys. 5.16. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – sezon 1997/98.

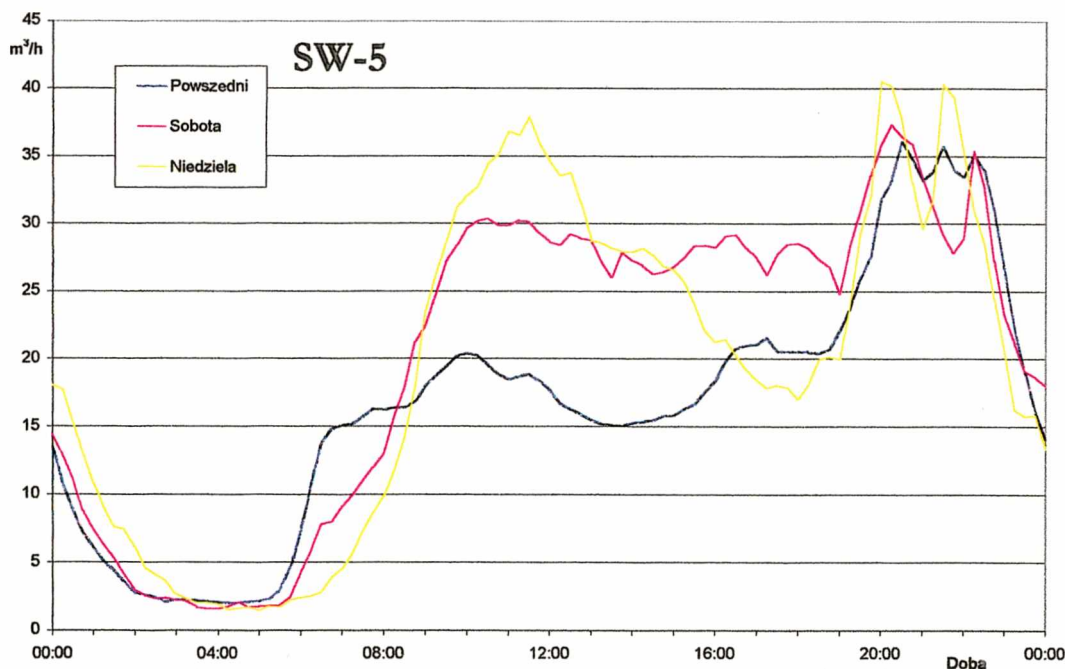


Rys. 5.17 Uśredniony pobór wody ciepłej dla dni charakterystycznych – sezon 1997/98.

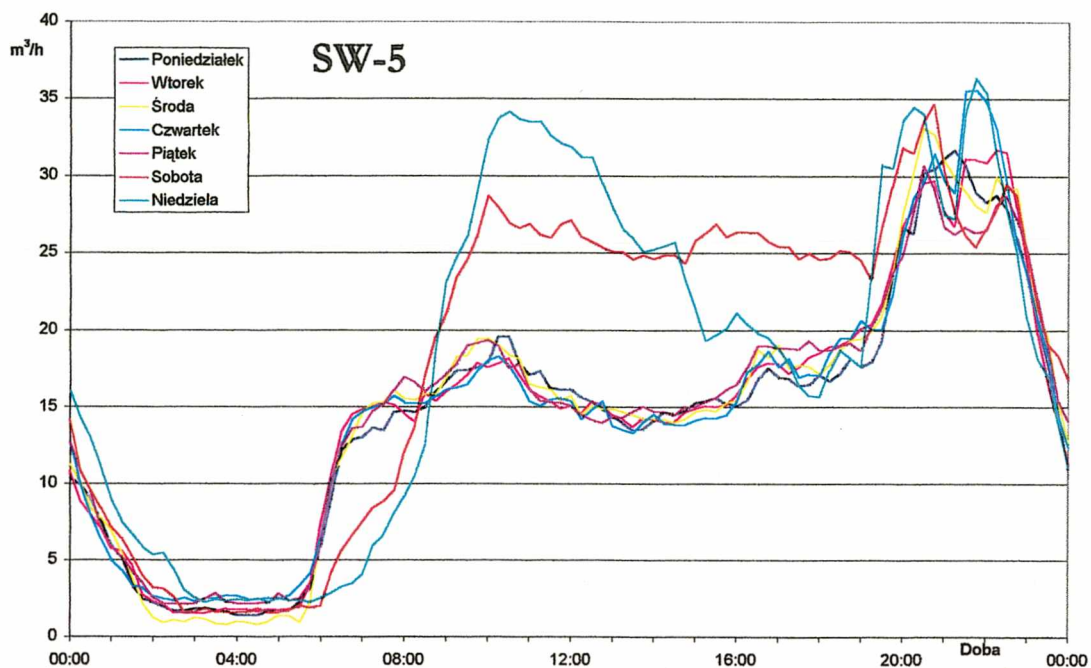
5.4.2.3. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – węzeł SW-5.



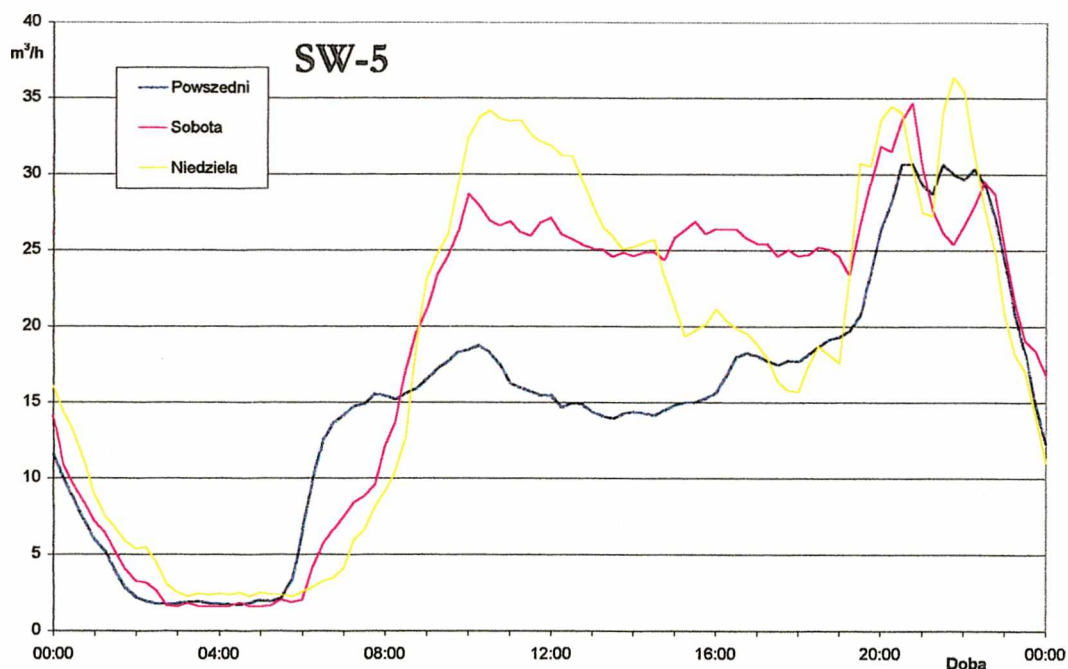
Rys. 5.18. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – sezon 1994/95.



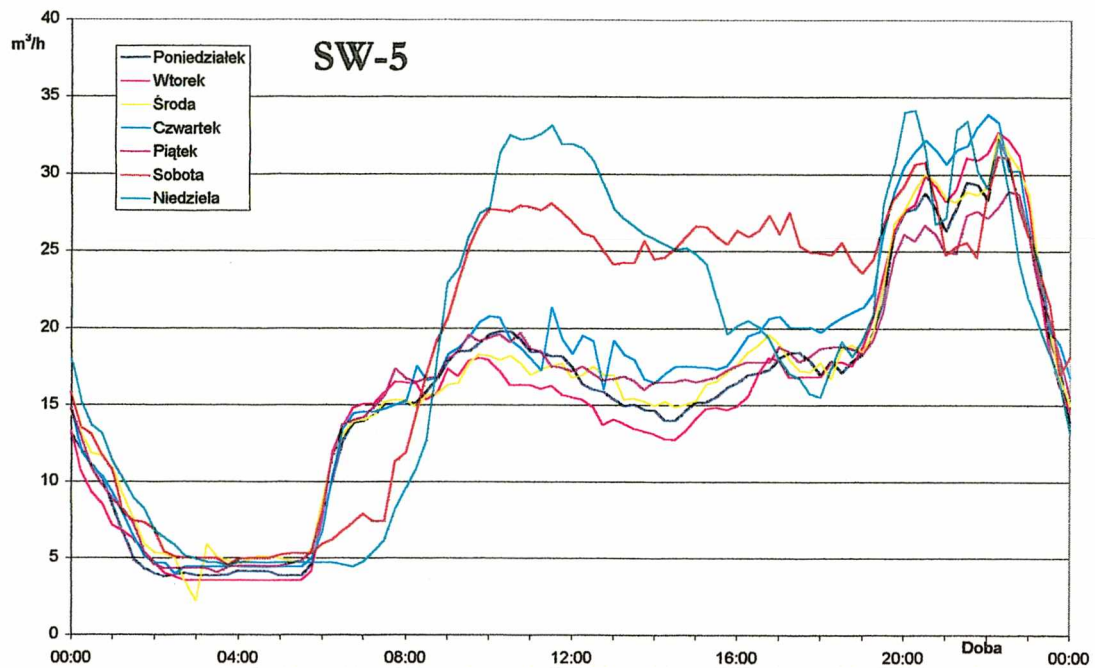
Rys. 5.19 Uśredniony pobór wody ciepłej dla dni charakterystycznych – sezon 1994/95.



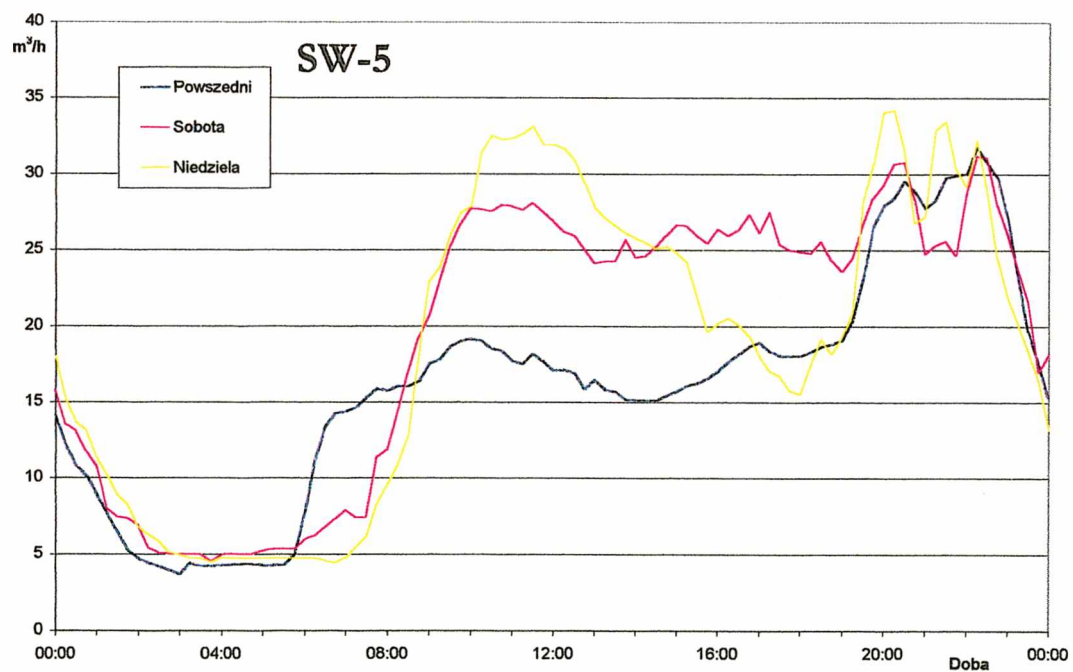
Rys. 5.20. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – sezon 1995/96.



Rys. 5.21 Uśredniony pobór wody ciepłej dla dni charakterystycznych – sezon 1995/96.



Rys. 5.22. Uśrednione charakterystyki poboru wody ciepłej – sezon 1996/97.



Rys. 5.23 Uśredniony pobór wody ciepłej dla dni charakterystycznych – sezon 1996/97.

Uzyskane wyniki potwierdzają przypuszczenia, że nierównomierność poboru ciepłej wody użytkowej zmienia swój charakter w poszczególne dni tygodnia. Rozkład dobowego zużycia wody ciepłej jest odmienny w dni robocze, soboty oraz niedziele. Dni robocze cechują się podobieństwem w charakterze i w wielkości poboru wody ciepłej. Pozwala to na wprowadzenie dnia powszedniego, jako pojęcia zastępczego, charakteryzującego zużycie wody ciepłej w dniach roboczych.

Największą zmiennością poboru charakteryzują się dni powszednie (największe wartości współczynników K_h), a najmniejszą soboty. Charakter poboru wody w niedziele, choć znacząco odmienny od poboru w dni powszednie cechuje się nierównomiernością tylko nieznacznie odbiegającą od wartości współczynników nierównomierności godzinowej otrzymywanych dla dni powszednich. Wartości współczynników godzinowej nierównomierności poboru ciepłej wody użytkowej dla badanych obiektów przedstawiono w tabeli 5.2. Dla porównania zamieszczono także obliczoną wartość tego współczynnika według Polskiej Normy [34] w zależności od liczby mieszkańców n .

$$K_h = 9,32 \cdot n^{-0,244} \quad / 5.43/$$

W przebiegach zużycia wody ciepłej w budynkach mieszkalnych obserwuje się wyraźne przesunięcia rozpoczęcia cyklu poboru wody między dniem powszednim, a sobotą i niedzielą. W dni wolne od pracy i w dni świąteczne pobór wody rozpoczyna się o około $1,5 \div 2$ godzin później niż w dni robocze.

W dniu powszednim występują dwa szczyty poboru wody: poranny i wieczorny. Przy czym szczyt wieczorny jest o około 40% większy niż ranny. Podobnie w przypadku niedzieli obserwuje się istnienie dwu szczytów zużycia wody ciepłej, z tym że, szczyt pierwszy pojawia się dopiero w godzinach około południowych (10÷14) i jest wielkościowo równy szczytowi wieczornemu. Są to największe dzienne pobory wody ciepłej. Charakter zużycia wody w soboty cechuje się praktycznie występowaniem jednego szczytu poboru wody ciepłej. Pojawia się

on w godzinach przedpołudniowych i trwa z nieznacznymi zmianami do godzin wieczornych.

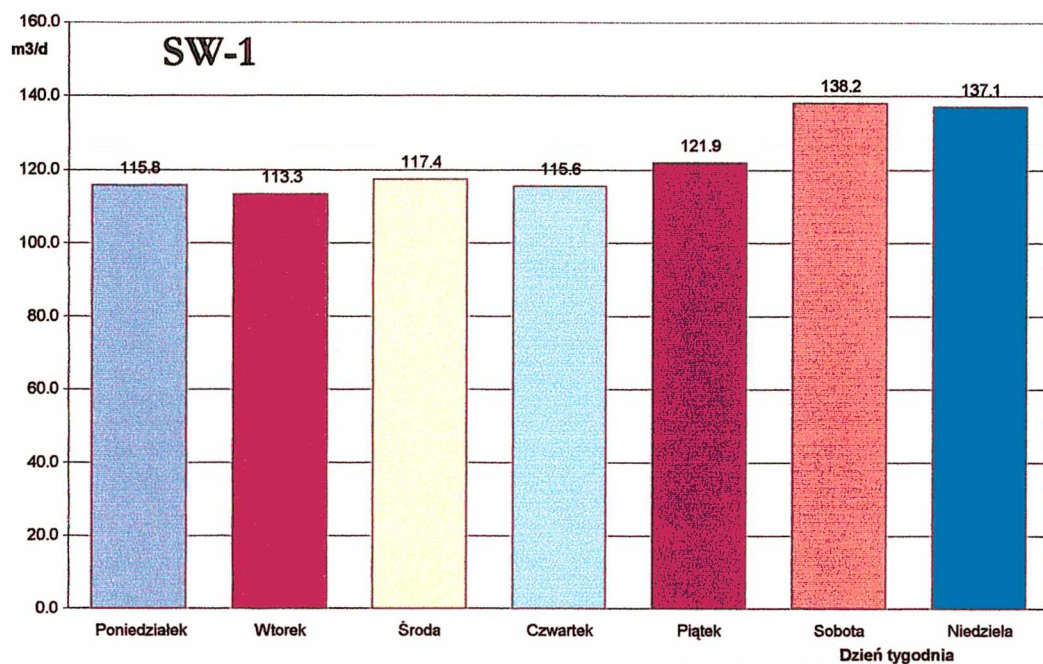
Tabela 5.2. Wartości charakteryzujące pobór ciepłej wody w latach 1994÷1998.

		SW-1			SW-3			SW-5		
		$G_h^{\text{śr}}$	G_h^{max}	K_h	$G_h^{\text{śr}}$	G_h^{max}	K_h	$G_h^{\text{śr}}$	G_h^{max}	K_h
		m ³ /h	m ³ /h	-	m ³ /h	m ³ /h		m ³ /h	m ³ /h	-
1994/95	Powszedni	4.81	8.93	1.86	7.79	13.82	1.77	16.55	33.99	2.05
	Sobota	5.70	8.85	1.55	8.77	13.31	1.52	20.30	35.36	1.74
	Niedziela	5.65	10.44	1.85	8.95	15.29	1.71	19.64	37.89	1.93
1995/96	Powszedni	4.24	7.48	1.76	6.50	11.58	1.78	14.71	30.00	2.04
	Sobota	4.99	7.58	1.52	7.51	11.19	1.49	18.50	30.34	1.64
	Niedziela	4.87	8.81	1.81	7.28	12.26	1.68	18.31	34.11	1.86
1996/97	Powszedni	3.99	7.08	1.77	6.60	11.65	1.76	15.99	29.73	1.86
	Sobota	4.69	7.47	1.59	7.95	12.04	1.51	19.35	29.25	1.51
	Niedziela	4.73	8.62	1.82	7.09	12.59	1.78	18.79	32.87	1.75
1997/98	Powszedni	4.11	6.62	1.61	5.27	11.03	2.09			
	Sobota	4.78	7.51	1.57	6.68	11.08	1.66			
	Niedziela	4.89	8.49	1.74	6.30	12.36	1.96			
Wartość K_h wg PN-92/B-01706 dla n=		1961	1.47		1933	1.47		6000		1.12

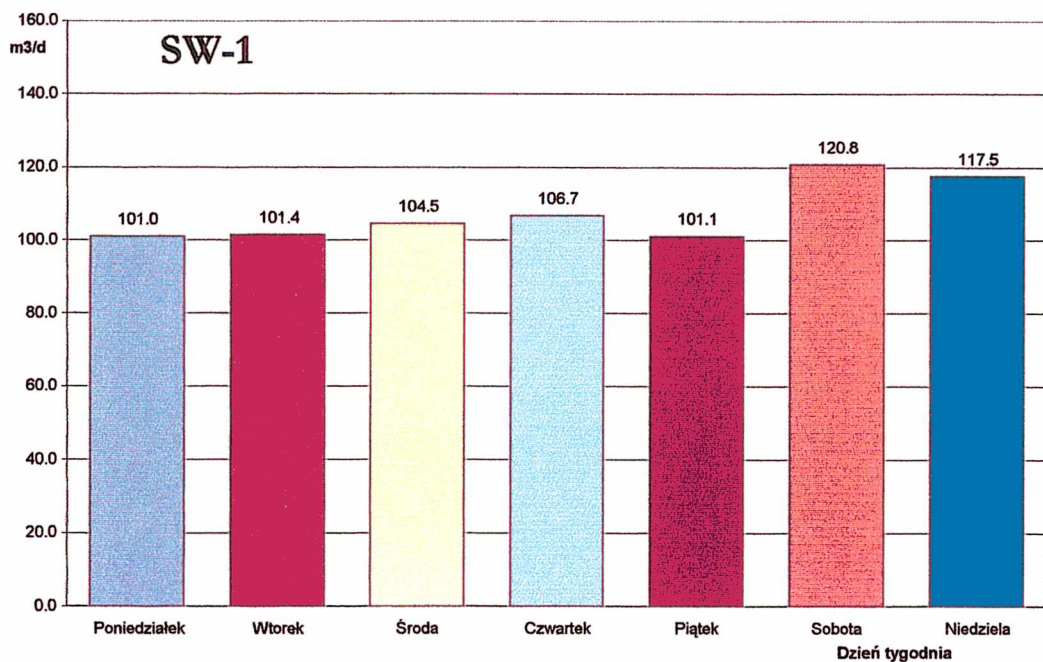
5.4.3. Dobowy pobór ciepłej wody użytkowej

Dobowy rozkład poboru wody ciepłej w zależności od dnia tygodnia (rys. 5.2.÷5.23.) informuje również o wielkości jej zużycia. Dokładne określenie różnic w wartości dobowego poboru ciepłej wody, wymaga przedstawienia jej zużycia w postaci histogramów dla poszczególnych dni tygodnia. Na rysunkach 5.24.÷5.34. zamieszczono wykresy słupkowe zużycia ciepłej wody użytkowej w miesiącach od września do maja. Z serii danych pomiarowych wyeliminowano pomiary z okresu wakacyjnego ze względu na spodziewaną zwiększoną absencję mieszkańców – odbiorców wody.

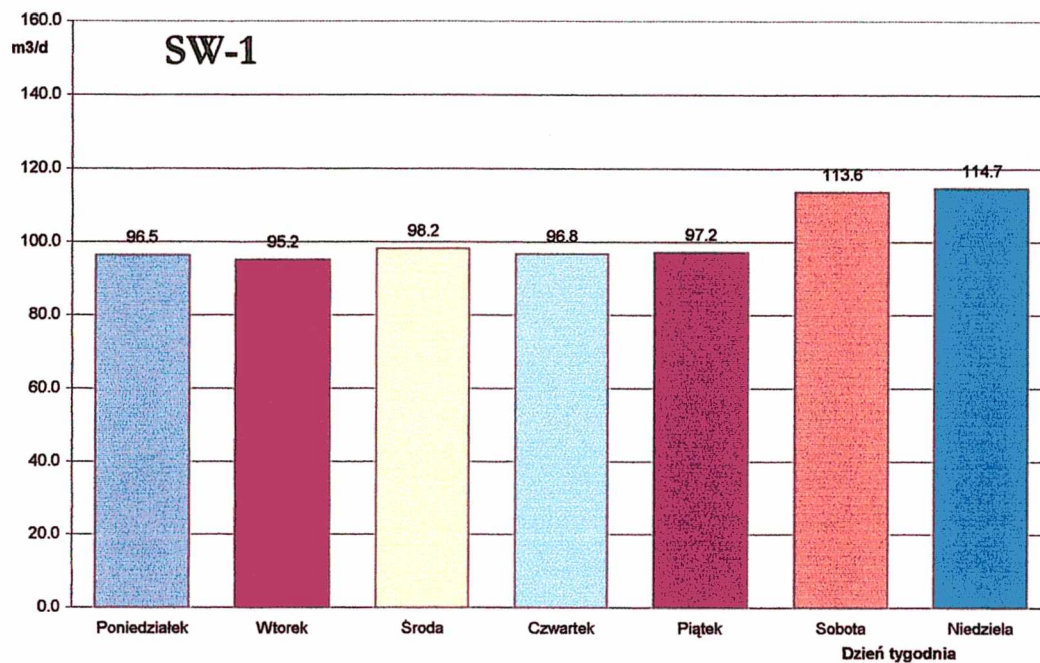
5.4.3.1. Histogramy dobowego poboru wody ciepłej – węzeł SW-1.



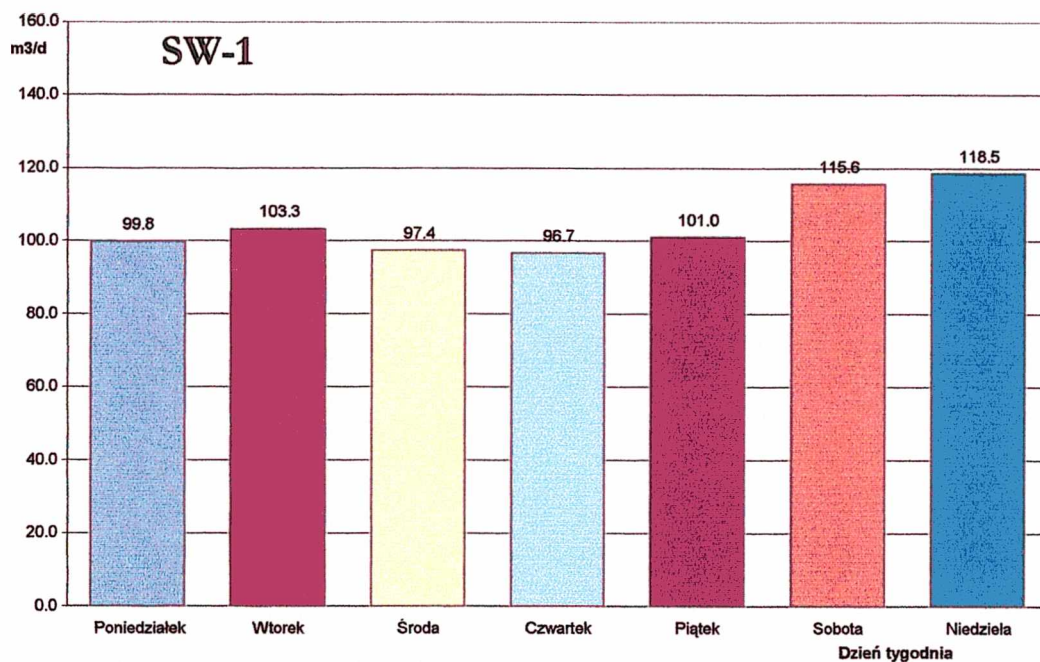
Rys. 5.24. Pobór wody ciepłej dla poszczególnych dni w sezonie 1994/95.



Rys. 5.25. Pobór wody ciepłej dla poszczególnych dni w sezonie 1995/96.

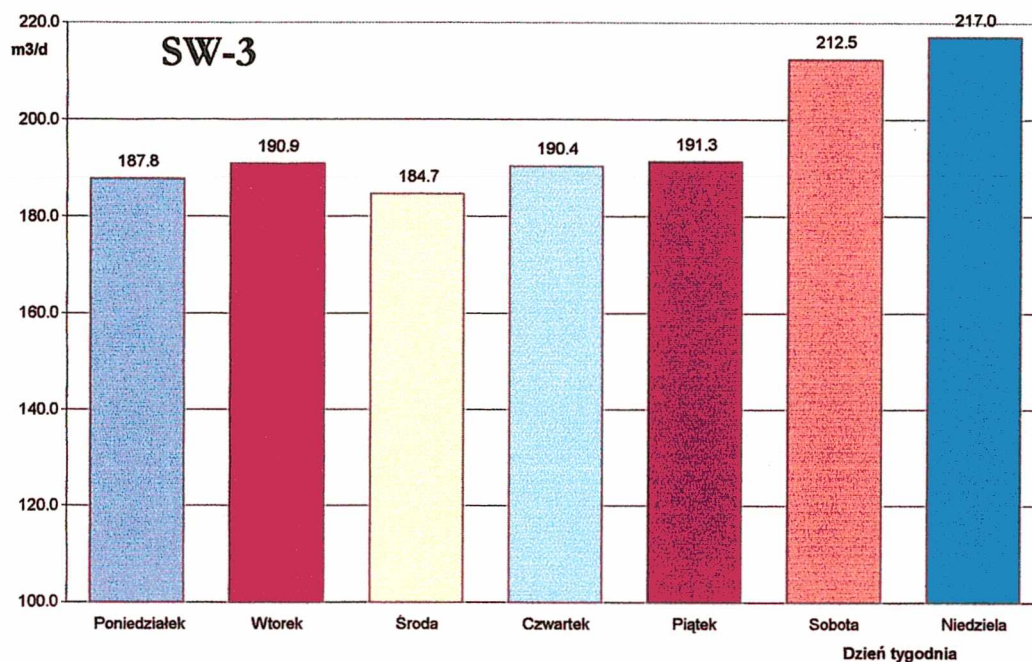


Rys. 5.26. Pobór wody ciepłej dla poszczególnych dni w sezonie 1996/97.

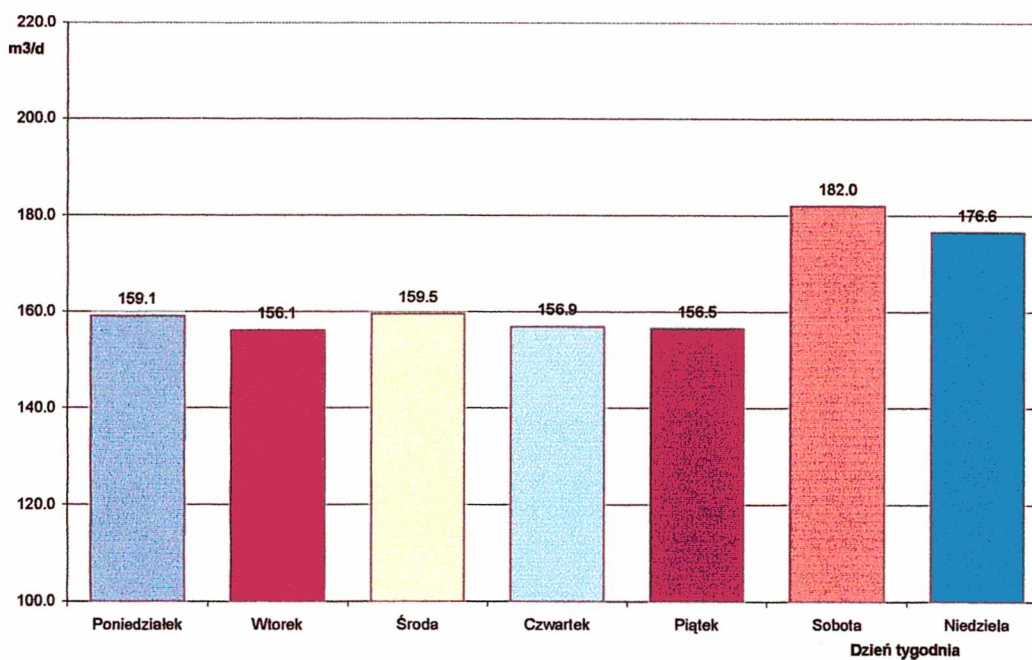


Rys. 5.27. Pobór wody ciepłej dla poszczególnych dni w sezonie 1997/98.

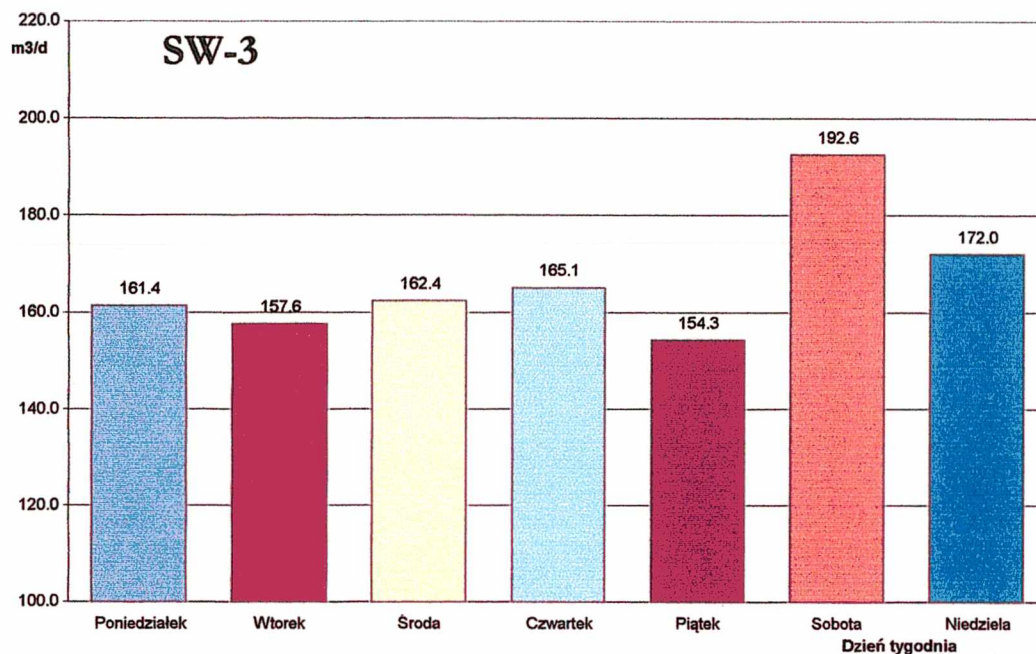
5.4.3.2. Histogramy dobowego poboru wody ciepłej– węzeł SW-3.



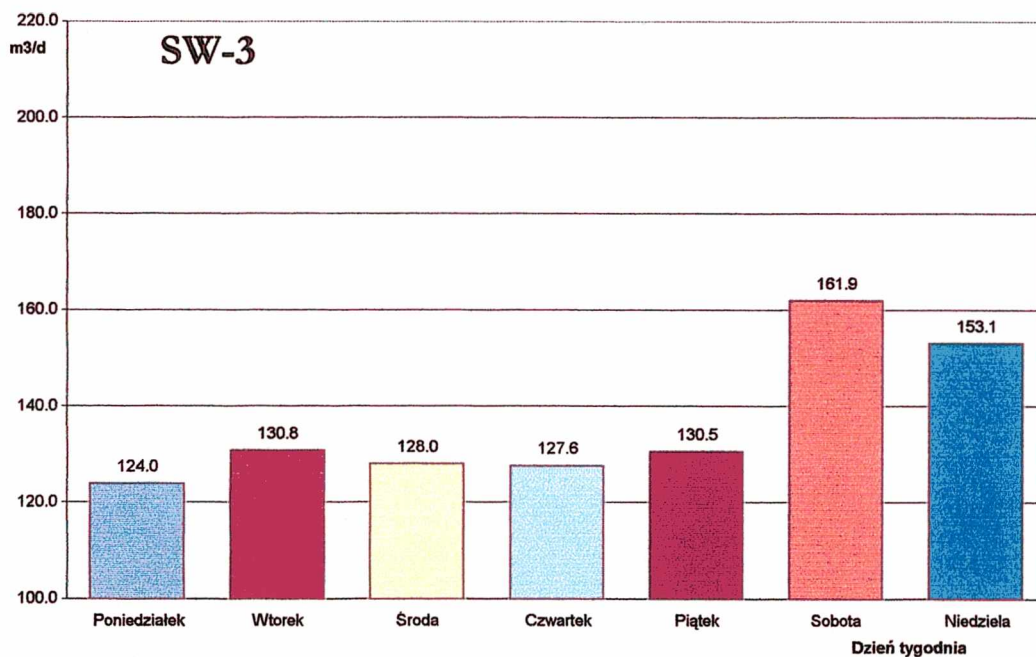
Rys. 5.28. Pobór wody ciepłej dla poszczególnych dni w sezonie 1994/95.



Rys. 5.29. Pobór wody ciepłej dla poszczególnych dni w sezonie 1995/96.

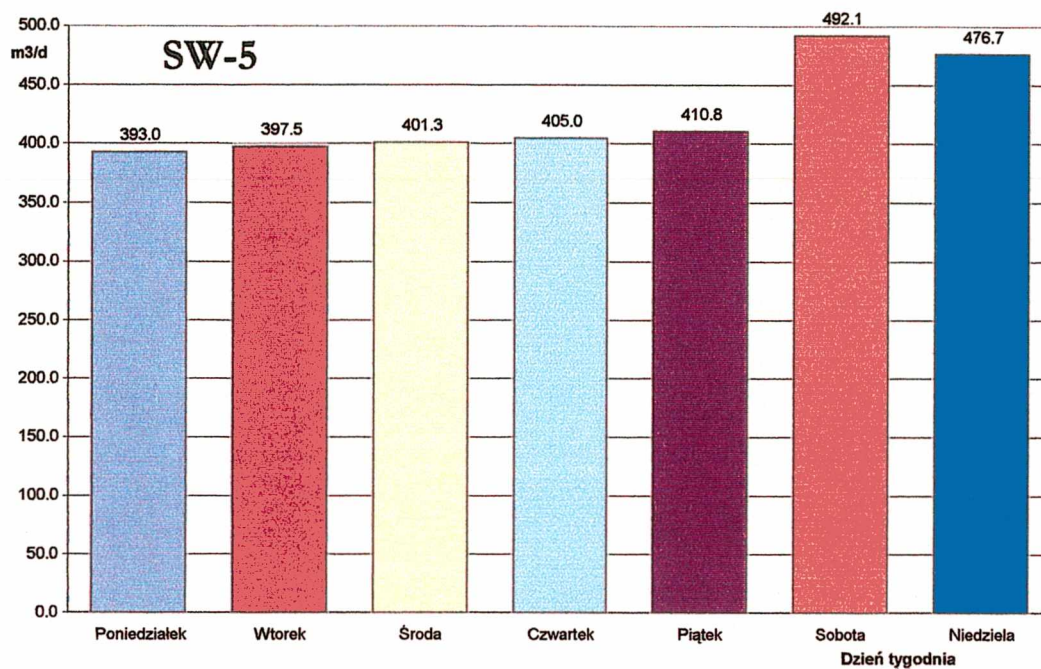


Rys. 5.30. Pobór wody ciepłej dla poszczególnych dni w sezonie 1996/97.

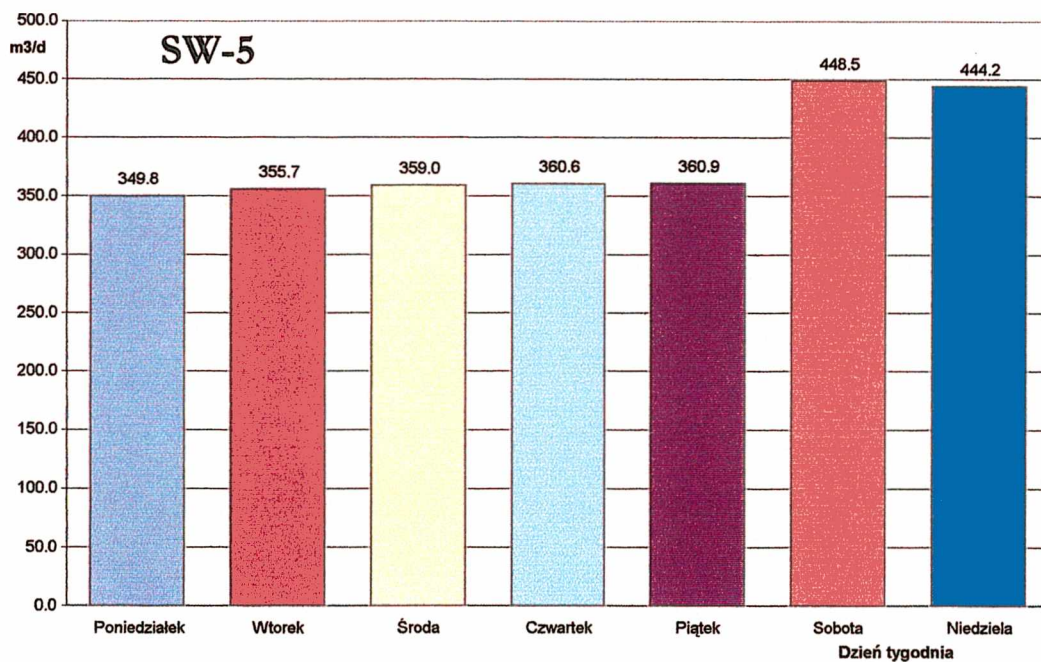


Rys. 5.31. Pobór wody ciepłej dla poszczególnych dni w sezonie 1997/98.

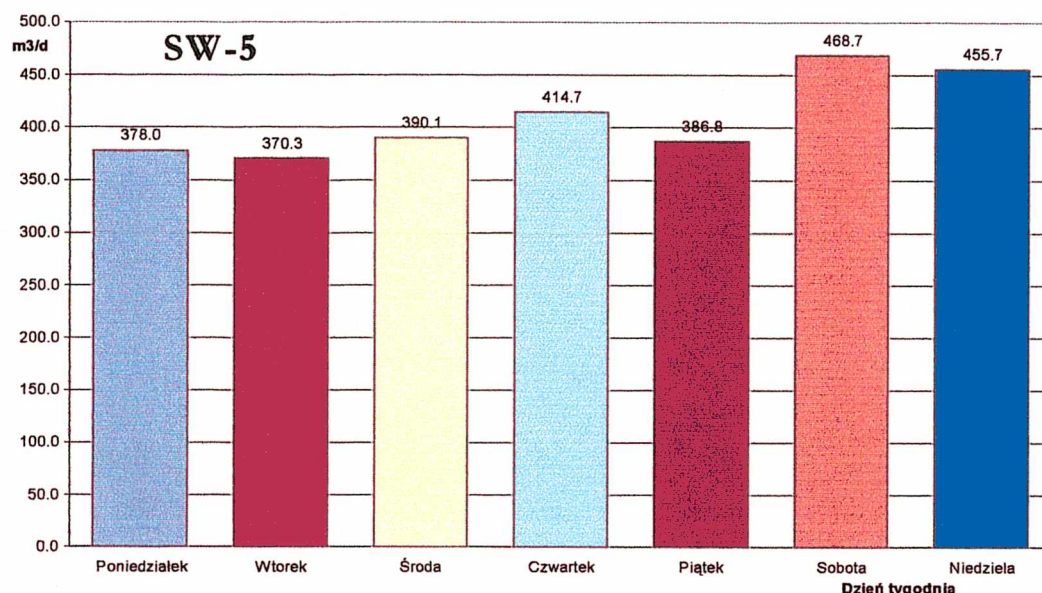
5.4.3.3. Histogramy dobowego poboru wody ciepłej– węzeł SW-5.



Rys. 5.32. Pobór wody ciepłej dla poszczególnych dni w sezonie 1994/95.



Rys. 5.33. Pobór wody ciepłej dla poszczególnych dni w sezonie 1995/96.



Rys. 5.34. Pobór wody ciepłej dla poszczególnych dni w sezonie 1996/97.

5.4.4. Ocena wielkości dobowego zużycia ciepłej wody użytkowej.

Przedstawione na histogramach (rys. 5.24.÷5.34.) wielkości zużycia ciepłej wody użytkowej w sposób wyraźny uwidaczniają, iż największą dobową konsumpcją wody charakteryzują się dni wolne od pracy – soboty i niedziele. Zużycie wody w tych dniach jest o 15÷20% większe, niż w dniu powszednim. Różnice w zużyciu wody w poszczególnych dniach roboczych są bardzo nieznaczne i sięgają maksimum $\pm 3\%$. Potwierdza to możliwość wprowadzenia dnia powszedniego jako pojęcia zastępczego, charakteryzującego pobór wody w dniach roboczych.

Histogramy zużycia wody sporządzone dla czterech kolejnych lat przedstawiają, poza zmiennością dobową w wielkości pobranej wody, zmienność jej zużycia w cyklu rocznym. Lata, w których prowadzone były badania pracy dwufunkcyjnych węzłów ciepłowniczych, były okresem, w którym spółdzielnie mieszkaniowe wprowadzały wodomierze mieszkaniowe, jako podstawę rozliczeń z końcowym odbiorcą za pobraną ciepłą wodę użytkową. Pojawienie się urządzenia mierzącego ilość zużywanej wody, według wskazań, którego będzie trzeba uiścić opłatę, powoduje u odbiorcy zmianę sposobu korzystania z instalacji wodociągowej. Ciepła

woda użytkowa jest teraz zużywana racjonalnie, co do faktycznych potrzeb. Ogranicza się do minimum jej marnotrawstwo, usuwa się wszelkiego rodzaju przecieki wody i awarie instalacji. Dochodzi także, w skrajnych przypadkach, do sytuacji przekraczających pojęcie oszczędności w zużyciu wody.

Budynki mieszkalne zasilane z badanych węzłów ciepłowniczych wyposażone zostały w 90% w wodomierze mieszkaniowe. Proces ich montażu odbywał się sukcesywnie, i tak dla węzła:

- SW-1 – obejmował lata 1994÷1995,
- SW-3 – obejmował lata 1995÷1997,
- SW-5 – obejmował lata 1994÷1995.

W tabeli 5.3. przedstawiono wartości dobowego zużycia wody ciepłej przez budynki mieszkalne zasilane z badanych węzłów ciepłowniczych dla dni charakterystycznych. Wyliczono na podstawie liczby mieszkańców jednostkowe dobowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę przez jednego mieszkańca q_c . Wykazano również wielkość zmian w ilości zużytej wody w cyklu rocznym.

Tabela 5.3. Zestawienie średniodobowego zużycia wody ciepłej [m^3/d] wraz z jednostkowym dobowym zapotrzebowaniem na ciepłą wodę q_c .

Węzeł	SW-1				SW-3				SW-5		
Sezon	94/95	95/96	96/97	97/98	94/95	95/96	96/97	97/98	94/95	95/96	96/97
Powszedni	116.8	103.3	96.8	99.6	189.0	158.8	160.2	128.2	401.5	357.2	388.4
q_c [l/d.j.n.]	59.6	52.7	49.4	50.8	97.8	82.2	82.9	66.3	66.9	59.5	64.7
*Zmiana [%]	-	-11.6	-6.3	+2.9	-	-16.0	+0.9	-20.0	-	-11.0	+8.7
Sobota	138.2	120.8	113.6	115.6	212.5	182.0	192.6	161.9	492.1	448.5	468.7
q_c [l/d.j.n.]	70.5	61.6	57.9	58.9	109.9	94.2	99.6	83.8	82.0	74.8	78.1
*Zmiana [%]	-	-12.6	-6.0	+1.8	-	-14.4	+5.8	-15.9	-	-8.9	+4.5
Niedziela	137.1	117.5	114.7	118.5	217.0	176.6	172.0	153.1	476.7	444.2	455.7
q_c [l/d.j.n.]	69.9	59.9	58.5	60.4	112.3	91.4	89.0	79.2	79.5	74.0	76.0
*Zmiana [%]	-	-14.3	-2.4	+3.3	-	-18.6	-2.6	-11.0	-	-6.8	+2.6

*Zmiana do poprzedniego sezonu pomiarowego.

Potwierdzają się badania [41],[6], że wprowadzenie wodomierzy mieszkaniowych znacznie ogranicza wielkość zużycia wody ciepłej oraz zmniejsza wartości charakterystyczne poboru wody decydujące o wielkości układu przygotowania ciepłej wody użytkowej. Zgromadzony materiał badawczy i uzyskane

w jego oparciu wyniki wykazują ponadto charakter przebiegu tego zjawiska. W początkowym okresie po wprowadzeniu rozliczenia według wskazań wodomierza, wielkość zużycia wody znacznie maleje. Następnie, po osiągnięciu minimum, następuje niewielki wzrost jej spożycia. Wielkość tego zjawiska w skali globalnej jest ściśle związana z tempem montowania wodomierzy mieszkaniowych. Im czas ten będzie krótszy, tym wielkość zmian, szczególnie w pierwszej fazie po wprowadzeniu rozliczenia według wskazań wodomierza będzie większa. Należy jednak zauważyć, że gwałtowne obniżenie zużycia ciepłej wody przez mieszkańców na charakter krótkotrwały i przemijający. Po pewnym czasie (okres około roku) następuje wzrost konsumpcji wody o około 3% w stosunku do zaobserwowanego minimum. Dopiero tak ustabilizowana wartość wielkości zużycia wody wydaje się być wielkością reprezentatywną.

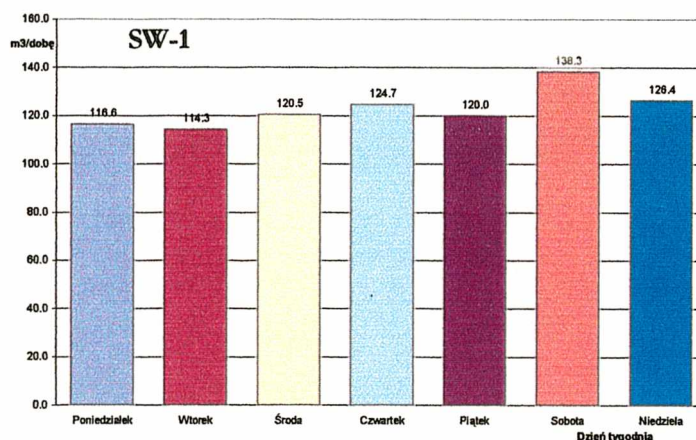
Wraz ze zmniejszającą się wielkością dobowego zużycia wody ciepłej następuje zmniejszenie jednostkowego zapotrzebowania na wodę przez jednego mieszkańca – jako wartości wskaźnikowej. Obliczone wielkości wskaźnika q_c (tabela 5.3.) wykazują w przeciągu okresu badawczego w przypadku węzłów SW-1 i SW-5, od początku, wartości niskie, oscylujące w granicach 50% wielkości podawanej przez normę [34]. Związane jest to z rozpoczęciem badań pracy węzłów ciepłowniczych w okresie, gdy część wodomierzy mieszkaniowych była już zamontowana. Ponadto należy zauważyć, że węzły te dostarczają wodę ciepłą zarówno do budynków wielorodzinnych (w których realizowany był montaż wodomierzy) oraz domów jednorodzinnych (wyposażonych w wodomierze). Obiekty jednorodzinne zasilane przez węzeł SW-1 skupiają około $\frac{1}{4}$ odbiorców wody. Tam też, wskaźnik jednostkowego zużycia wody na jednego mieszkańca jest najmniejszy (50÷60 l/d.j.n.). Może to wynikać z przyzwyczajień tej grupy do bardziej oszczędnego korzystania z c.w.u. Dane o zużyciu ciepłej wody, uzyskane w oparciu o pracę węzła ciepłowniczego SW-3, w sposób szkolny, świadczą o jakości wpływu montowanych wodomierzy mieszkaniowych na wielkość zużycia ciepłej wody użytkowej i wartość jednostkowego zapotrzebowania na wodę przez mieszkańca. Wielkość tego wskaźnika zmienia się od wartości bliskich normatywnym, do tych jakie występują w

obiektach zasilanych z węzłów SW-1 i SW-5. W okresie czterech lat badawczych, w wyniku wprowadzenia wodomierzy mieszkaniowych, wielkość zużycia wody w budynkach zasilanych z węzła SW-3 zmalała o 30%.

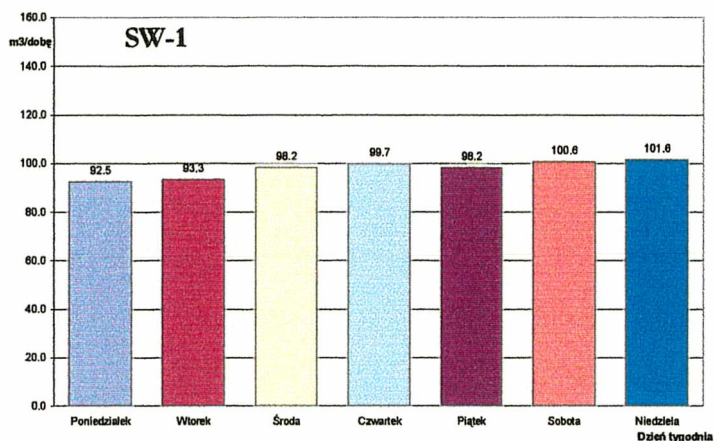
5.4.5. Zużycie ciepłej wody użytkowej w cyklu rocznym.

Przedstawione powyżej dane i wykresy (rys 5.24.÷5.34.) obejmują pomiary zarejestrowane w okresach od września do maja. Nie uwzględniono pomiarów archiwizowanych w okresach wakacyjnych (czerwiec÷sierpień) ze względu na zwiększoną absencję liczby mieszkańców i możliwy jej wpływ na wielkość zużycia wody [26]. W celu weryfikacji wyniki z tych okresów zostały opracowane i przedstawione na osobnych histogramach (rys. 5.35.÷5.43.).

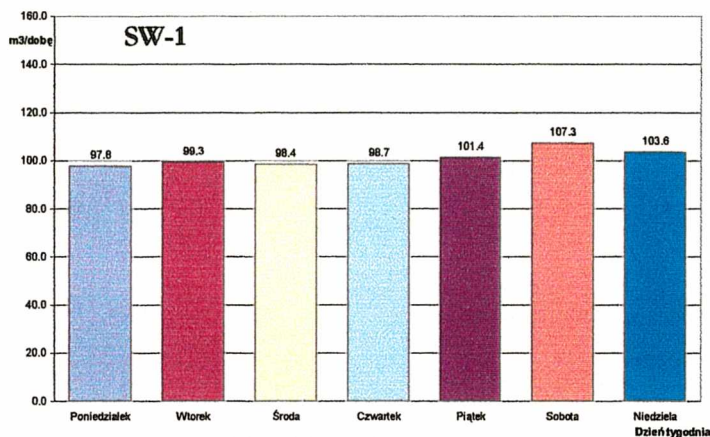
5.4.5.1. Histogramy zużycia ciepłej wody użytkowej w okresach wakacyjnych.



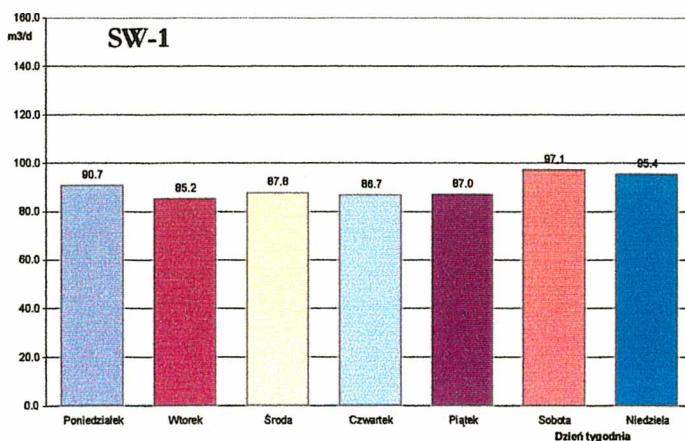
Rys. 5.35. Dobowe zużycie ciepłej wody w okresie wakacyjnym w roku 1994.



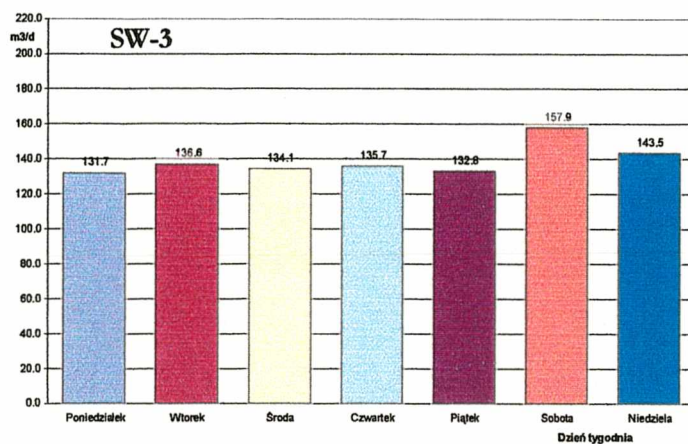
Rys. 5.36. Dobowe zużycie ciepłej wody w okresie wakacyjnym w roku 1995.



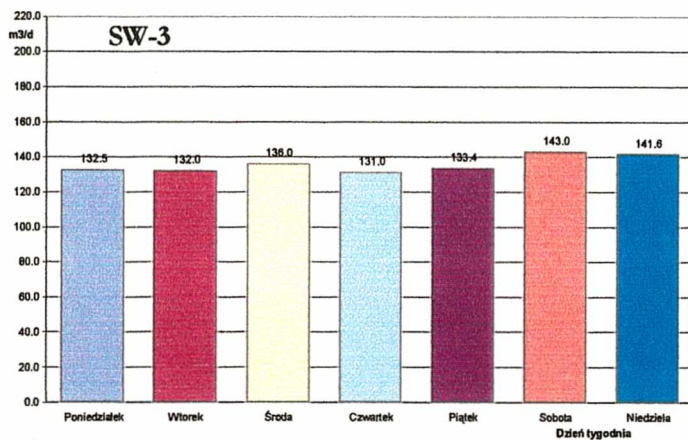
Rys. 5.37. Dobowe zużycie ciepłej wody w okresie wakacyjnym w roku 1996.



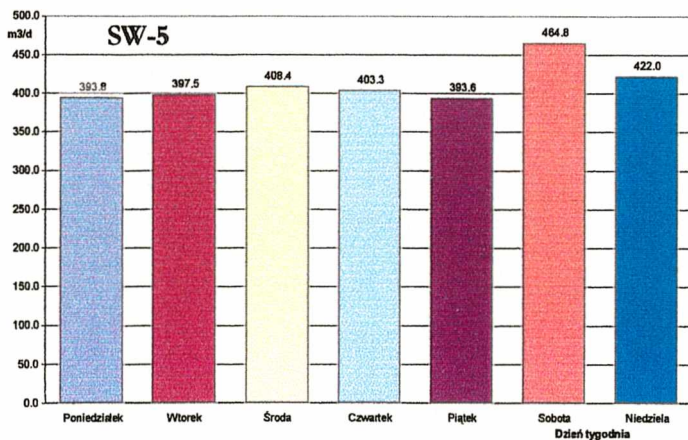
Rys. 5.38. Dobowe zużycie ciepłej wody w okresie wakacyjnym w roku 1998.



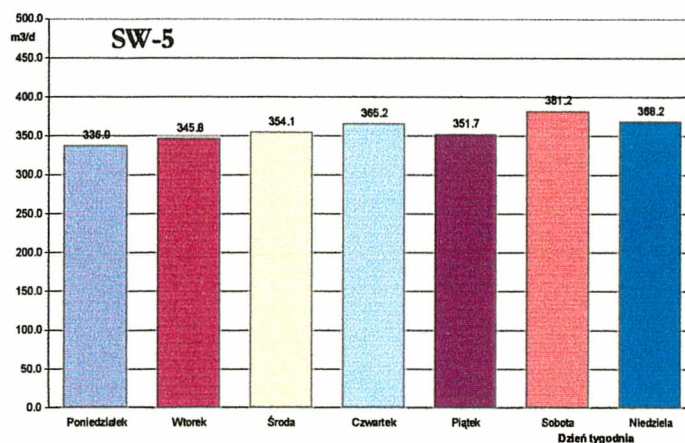
Rys. 5.39. Dobowe zużycie ciepłej wody w okresie wakacyjnym w roku 1994.



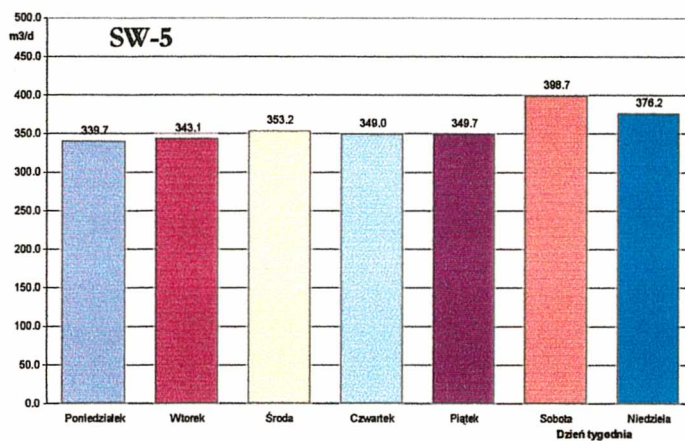
Rys. 5.40. Dobowe zużycie ciepłej wody w okresie wakacyjnym w roku 1996.



Rys. 5.41. Dobowe zużycie ciepłej wody w okresie wakacyjnym w roku 1994.



Rys. 5.42. Dobowe zużycie ciepłej wody w okresie wakacyjnym w roku 1995.



Rys. 5.43. Dobowe zużycie ciepłej wody w okresie wakacyjnym w roku 1996.

5.4.6. Ocena dobowego zużycia wody ciepłej w okresie wakacyjnym.

Podobnie, jak w przypadku wyników pomiarów prowadzonych w okresie sezonów ogrzewczych, w kolejnych okresach wakacyjnych następuje stopniowe zmniejszenie wielkości zużycia wody w ciągu doby. Zmiany te, wywołane są wprowadzeniem wodomierzy mieszkaniowych, jako miernika zużycia wody.

Obserwuje się również różnice w wielkości poboru wody ciepłej w okresie wakacyjnym, a pozostałą częścią roku. W miesiącach czerwcu, lipcu i sierpniu występuje mniejsze zużycie wody niż w pozostałych miesiącach roku. Jest to zjawisko zgodne z wynikami badań [26], powstające w wyniku wyjazdu pewnej

grupy mieszkańców na wakacje poza miejsce zamieszkania. Wielkość obniżenia zużycia wody w okresach wakacyjnych zawiera się w granicach 10÷25% i jest ona zależna od tego, czy rozliczenie za pobraną wodę realizowane jest w oparciu o ryczałt, czy wodomierz. Dla obiektów całkowicie wyposażonych w wodomierze mieszkaniowe wielkość letniego obniżenia zużycia ciepłej wody użytkowej wynosi około 10÷15% w stosunku do ilości wody pobieranej w pozostałej części roku.

Tabela 5.4. Zestawienie średniodobowego zużycia wody ciepłej [m^3/d] w okresie wakacyjnym.

Węzeł	SW-1				SW-3		SW-5		
Sezon	1994	1995	1996	1998	1994	1996	1994	1995	1996
Powszedni	119.2	96.4	99.1	87.5	134.2	133.0	399.3	350.7	346.9
**Zmiana [%]	-	-17.5	-4.1	-12.1	-	-16.2	-	-12.7	-2.9
Sobota	138.3	100.6	107.3	97.1	157.9	143.0	464.8	381.2	398.7
**Zmiana [%]	-	-27.2	-11.2	-16.0	-	-21.4	-	-22.5	-11.1
Niedziela	126.4	101.6	103.6	95.4	143.5	141.6	422.0	368.2	376.2
**Zmiana [%]	-	-25.9	-11.8	-19.5	-	-19.8	-	-22.8	-15.3

***Zmiana w stosunku do poprzedzającego sezonu niewakacyjnego.*

5.4.7. Tygodniowy pobór ciepłej wody użytkowej.

Występujące znaczne różnice, zarówno w charakterze poboru c.w.u. jak i wielkości pobieranej wody ciepłej, między dniami roboczymi, a dniami wolnymi od pracy (soboty i niedziele), zwracają uwagę na konieczność uwzględnienia zmiennego poboru ciepłej wody użytkowej w cyklu dobowym przy określaniu wartości miarodajnych do obliczania urządzeń przygotowania c.w.u. Ważnym aspektem wydaje się być również właściwe wyznaczenie wielkości strumienia wody sieciowej dopływającej do dwufunkcyjnego węzła ciepłowniczego.

Przy analizie zmiennego charakteru zużycia ciepłej wody użytkowej proponuje się wprowadzenie, jako okresu podstawowego, tygodnia średniego. Pod pojęciem tym rozumieć należy ciąg kolejnych dni tygodnia, dla których określono średnie, ze wszystkich pomiarów dla tego samego typu dnia, charakterystyki przebiegu poboru wody ciepłej przez odbiorców. Tak przyjęty okres badawczy uwzględniać będzie dobową zmienność konsumpcji ciepłej wody użytkowej, co

pozwole na wyznaczenie wartości mogących być podstawą obliczeń układów przygotowania c.w.u.

Na rysunkach (rys. 5.44÷5.54.) przedstawiono charakterystyki poboru ciepłej wody użytkowej w tygodniu średnim dla węzłów ciepłowniczych SW-1, SW-3 i SW-5 w sezonach 1994÷1998. Naniesiono na ich również uporządkowane przebiegi (wykresy) poboru wody w średnim tygodniu. Zaznaczono także charakterystyczne wielkości poboru wody ciepłej przez odbiorców – maksymalny dzienny $G_{\text{doba}}^{\text{max}}$ oraz średniotygodniowy pobór wody $G_{\text{tyg}}^{\text{sr}}$. Są one zależne od dobowej dynamiki zmian zużycia wody w okresie tygodnia. Pozwalają także na wyznaczenie współczynnika dobowej nierównomierności poboru ciepłej wody użytkowej K_d , jako wskaźnika zmian konsumpcji wody.

Dokładne określenie wartości średniotygodniowego poboru wody $G_{\text{tyg}}^{\text{sr}}$ wymaga, według definicji opisanej wzorem /5.44/, znajomości postaci funkcji opisującej krzywą uporządkowanego poboru wody. Autorowi nie jest znana postać matematycznego równania opisującego powyższą krzywą w sposób dokładny i wielokrotnie powtarzalny. Z tego też powodu wyznaczenie wartości średniotygodniowego poboru wody przeprowadzono w sposób przybliżony, obliczając pole zawarte pod krzywą (wartość całki oznaczonej z funkcji $G(\tau)$) metodą trapezów według zależności /5.45/ i /5.46/. W metodzie tej przedział całkowania $[a, b]$ dzieli się na n podprzedziałów o szerokości $\frac{b-a}{n}$ i w każdym z nich funkcję podcałkową $f(x)$ przybliża się wielomianem stopnia pierwszego. Inaczej mówiąc wykres funkcji $f(x)$ przybliżany jest linią łamaną.

$$G_{\text{tyg}}^{\text{sr}} = \frac{1}{\tau_1} \int_0^{\tau_1} G(\tau) d\tau \quad / 5.44/$$

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{n} \cdot \left(\frac{y_0 + y_n}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} y_i \right) \quad / 5.45/$$

gdzie:

$$y_0 = f(a), \quad y_n = f(b), \quad y_i = f\left(a + i \cdot \frac{b-a}{n}\right) \quad / 5.46/$$

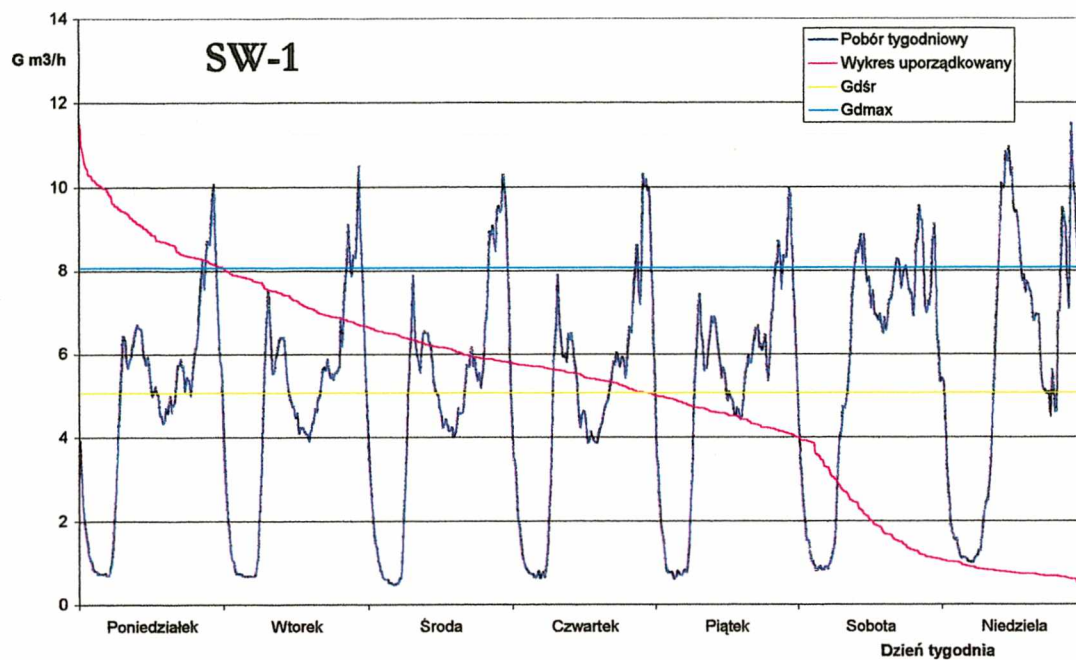
Ze względu na to, że pomiary strumienia ciepłej wody użytkowej dokonywane były w równych odstępach czasu (co 15 minut) można przyjąć, że szerokość podprzedziału $\frac{b-a}{n} = 1$. Wartości y_0 , y_i , y_n są wielkościami strumienia wody ciepłej w poszczególnych momentach pomiarowych badanego okresu. Stąd po uwzględnieniu równań /5.44/, /5.45/ i /5.46/ wartość średniotygodniowego poboru wody $G_{\text{tyg}}^{\text{sr}}$ przedstawia się następującym wzorem /5.47/:

$$G_{\text{tyg}}^{\text{sr}} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{y_0 + y_n}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} y_i \right) \quad / 5.47/$$

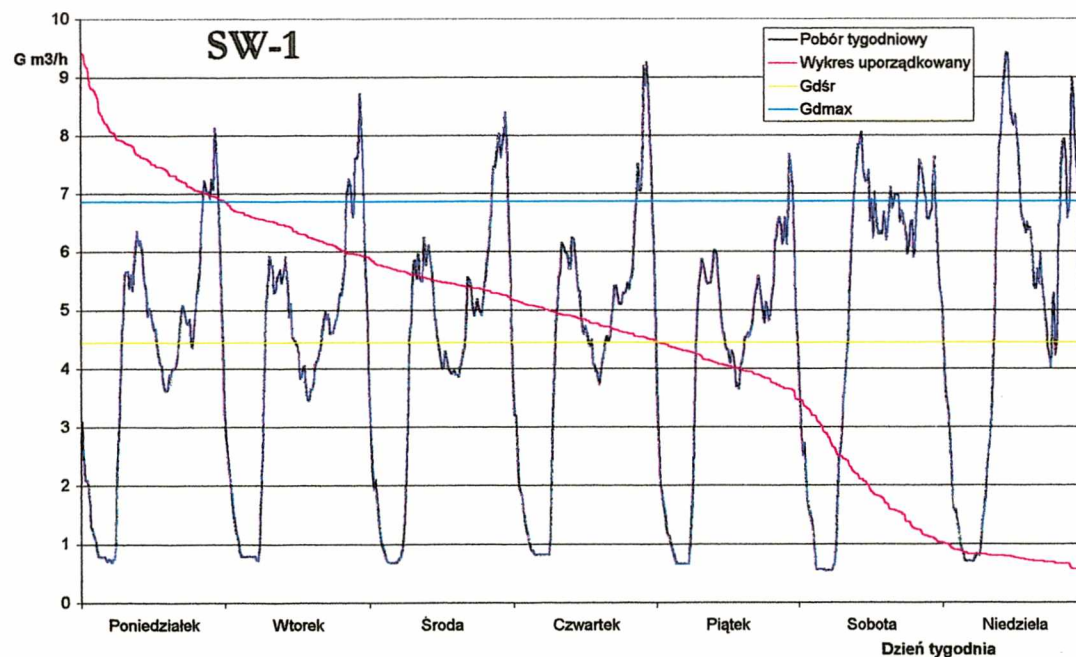
gdzie n jest ilością dokonanych pomiarów.

Błąd przybliżenia w tej metodzie jest błędem instrumentalnym pomiarów przepływów ciepłej wody użytkowej W_3 .

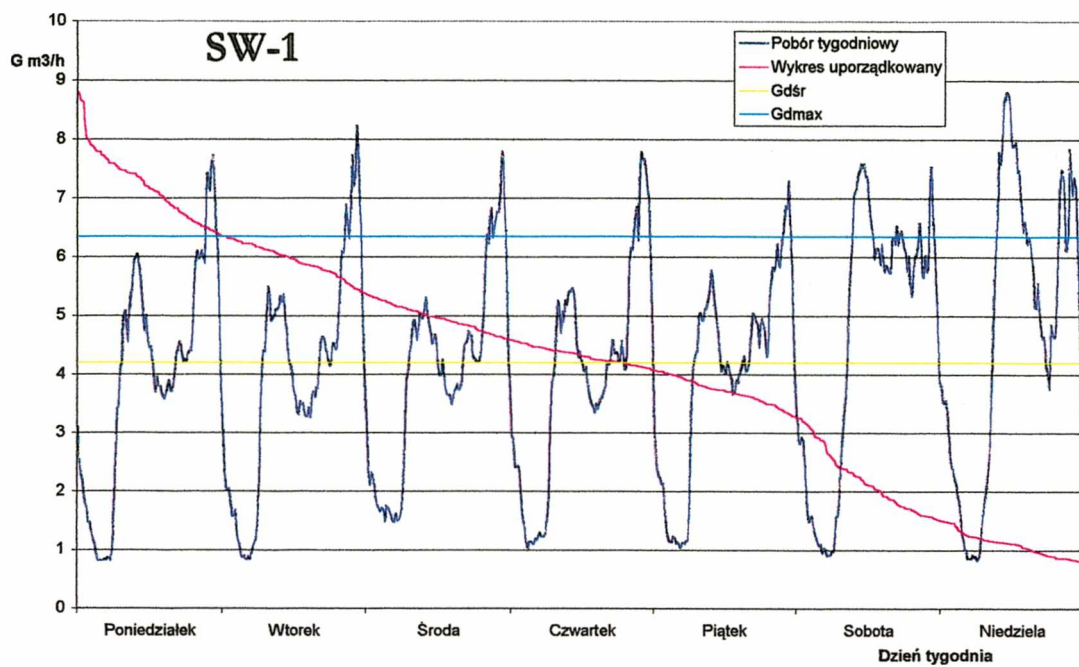
5.4.7.1. Wykresy poboru ciepłej wody użytkowej w tygodniu średnim.



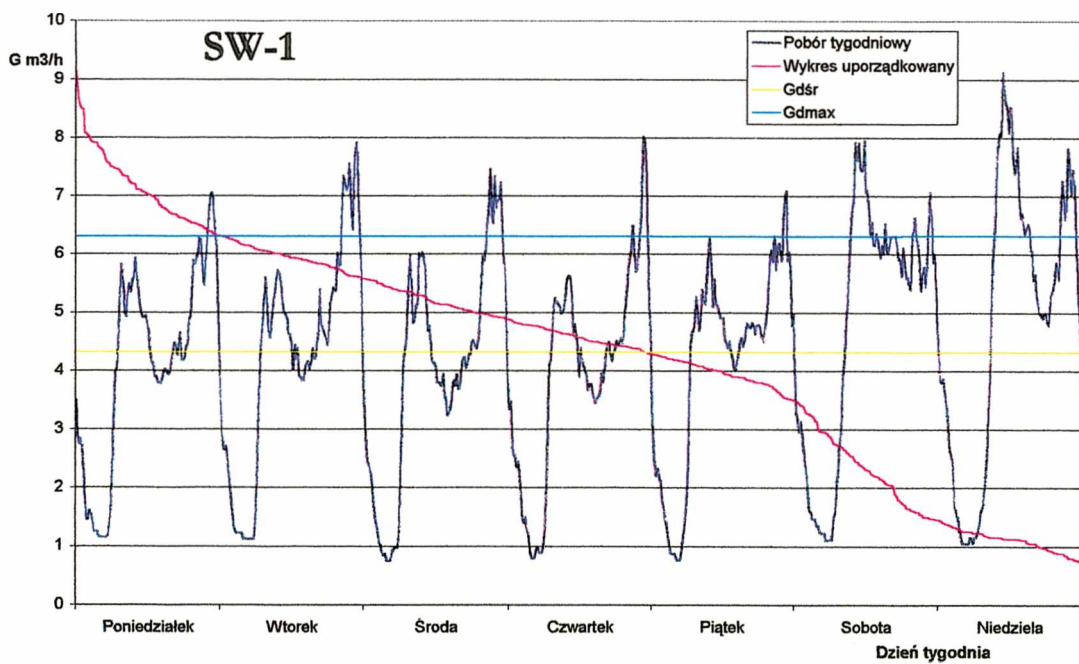
Rys. 5.44. Pobór wody ciepłej w tygodniu średnim – sezon 1994/95.



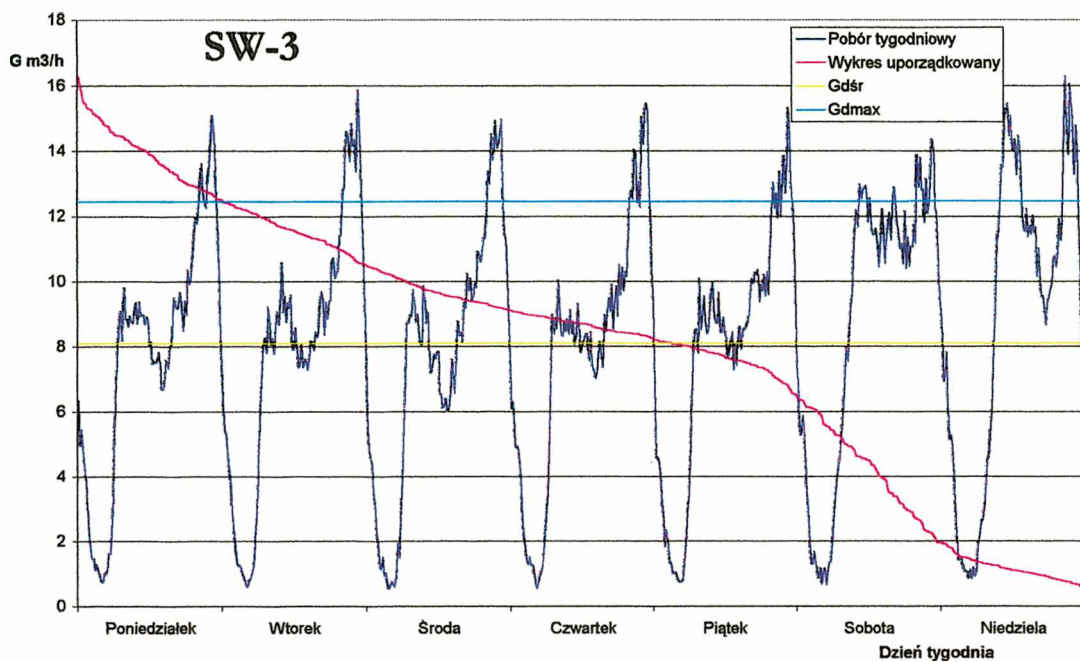
Rys. 5.45. Pobór wody ciepłej w tygodniu średnim – sezon 1995/96.



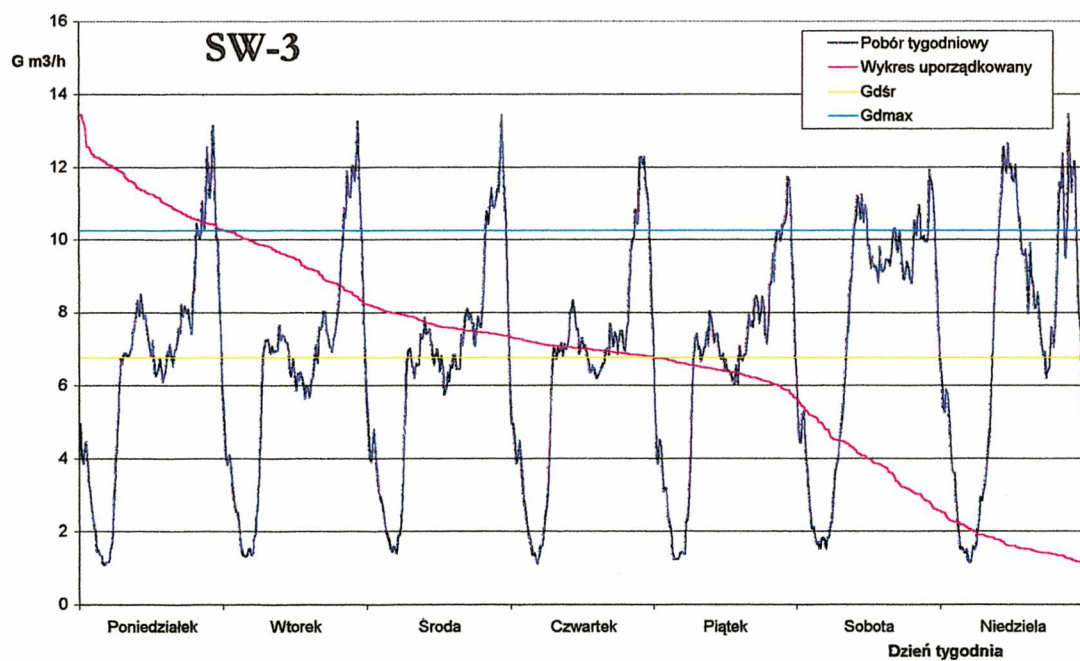
Rys. 5.46. Pobór wody ciepłej w tygodniu średnim – sezon 1996/97.



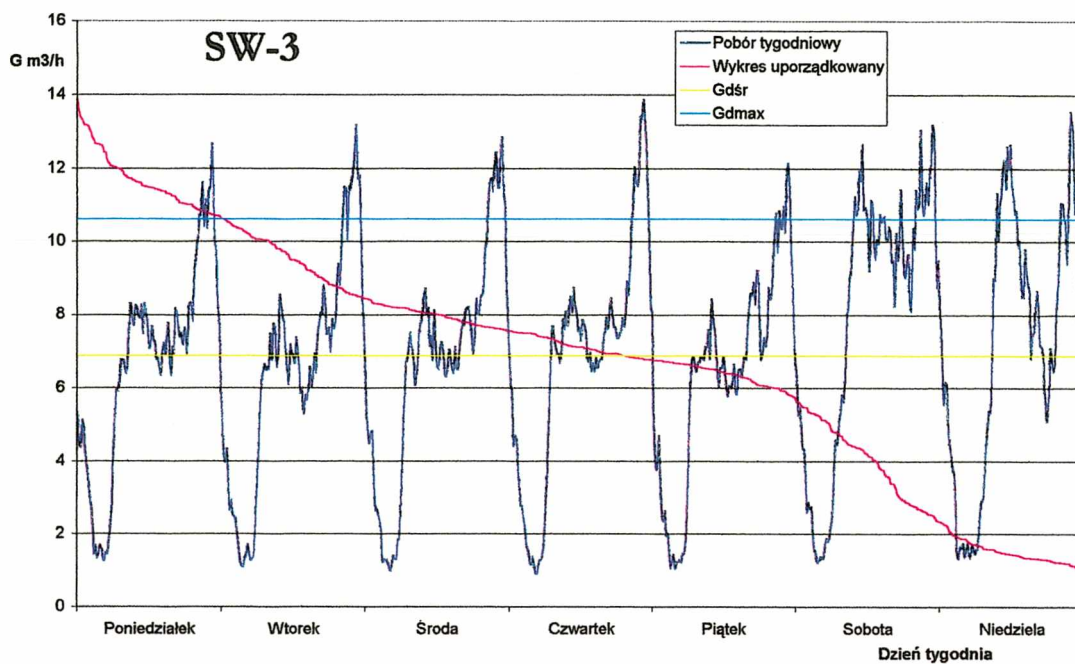
Rys. 5.47. Pobór wody ciepłej w tygodniu średnim – sezon 1997/98.



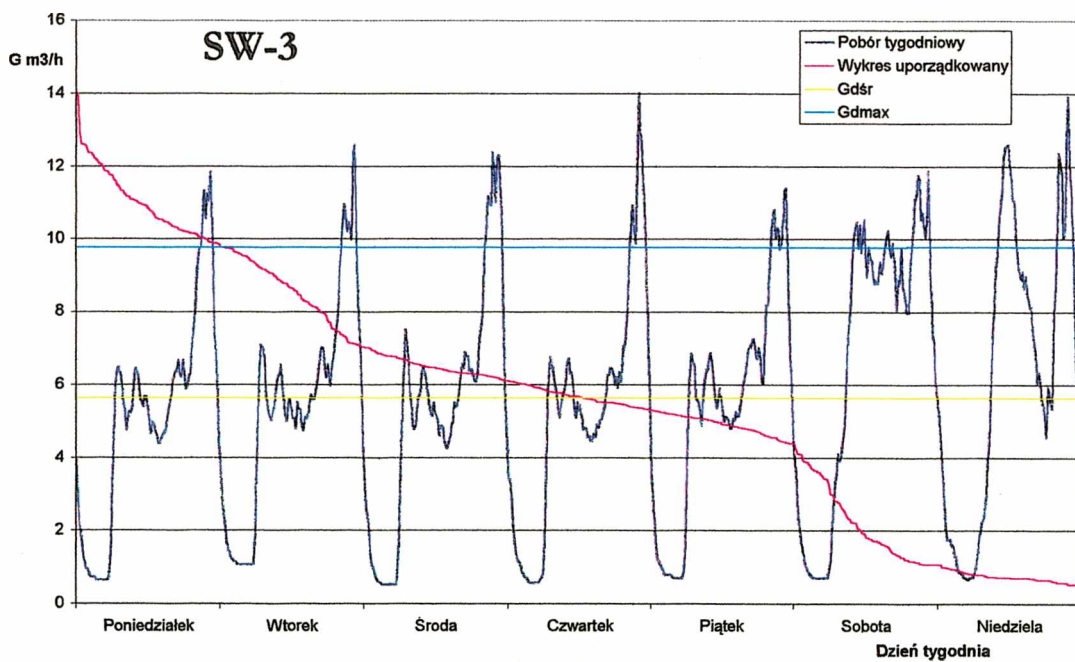
Rys. 5.48. Pobór wody ciepłej w tygodniu średnim – sezon 1994/95.



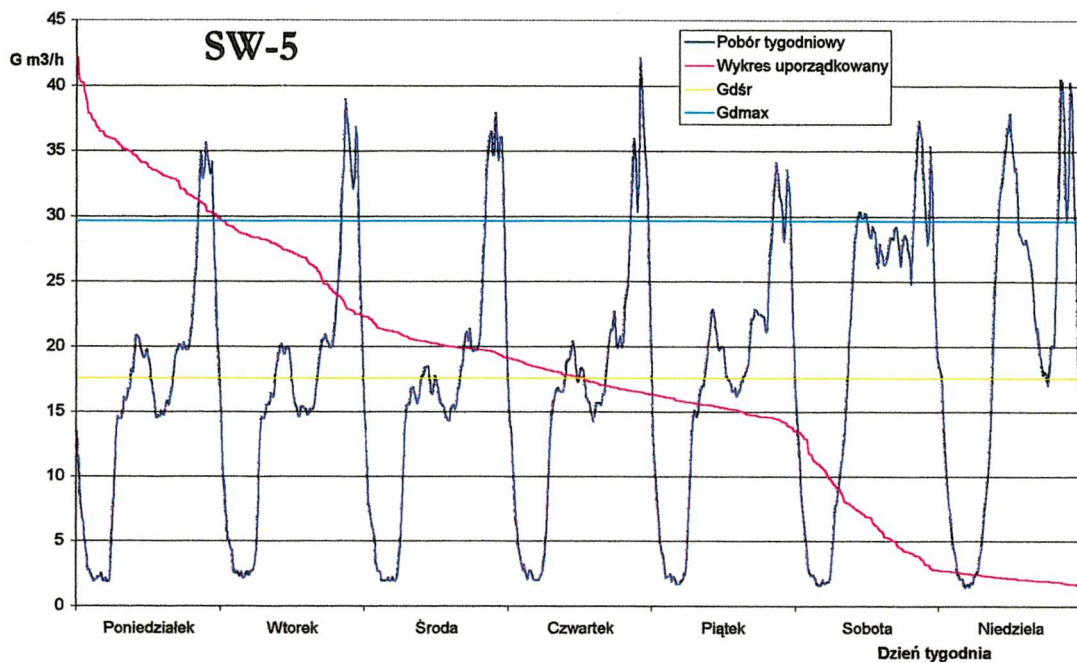
Rys. 5.49. Pobór wody ciepłej w tygodniu średnim – sezon 1995/96.



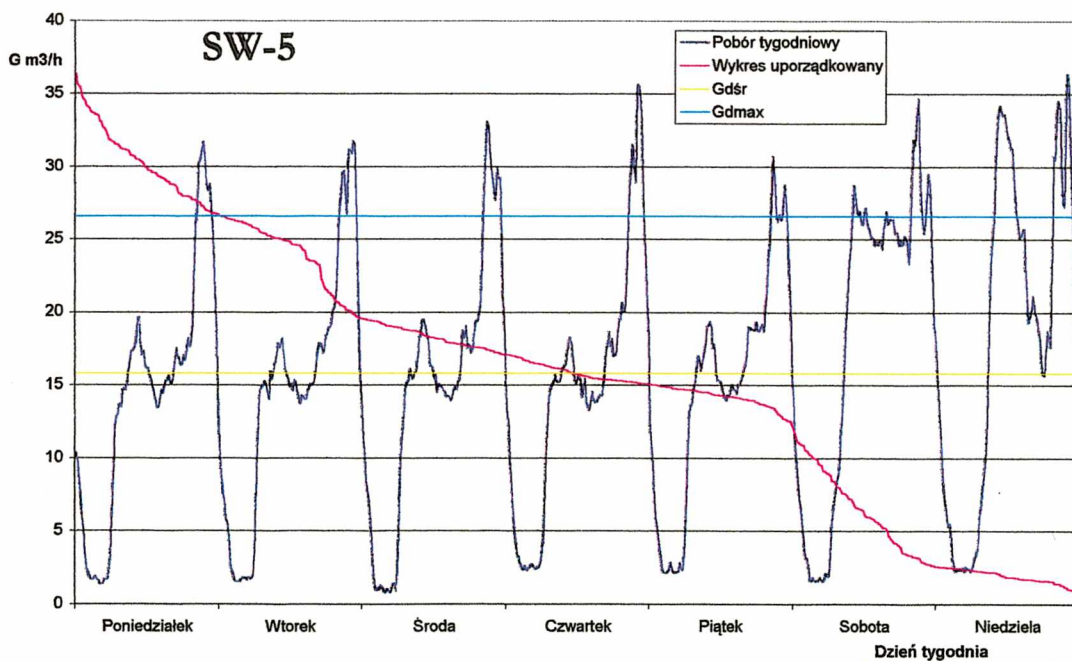
Rys. 5.50. Pobór wody ciepłej w tygodniu średnim – sezon 1996/97.



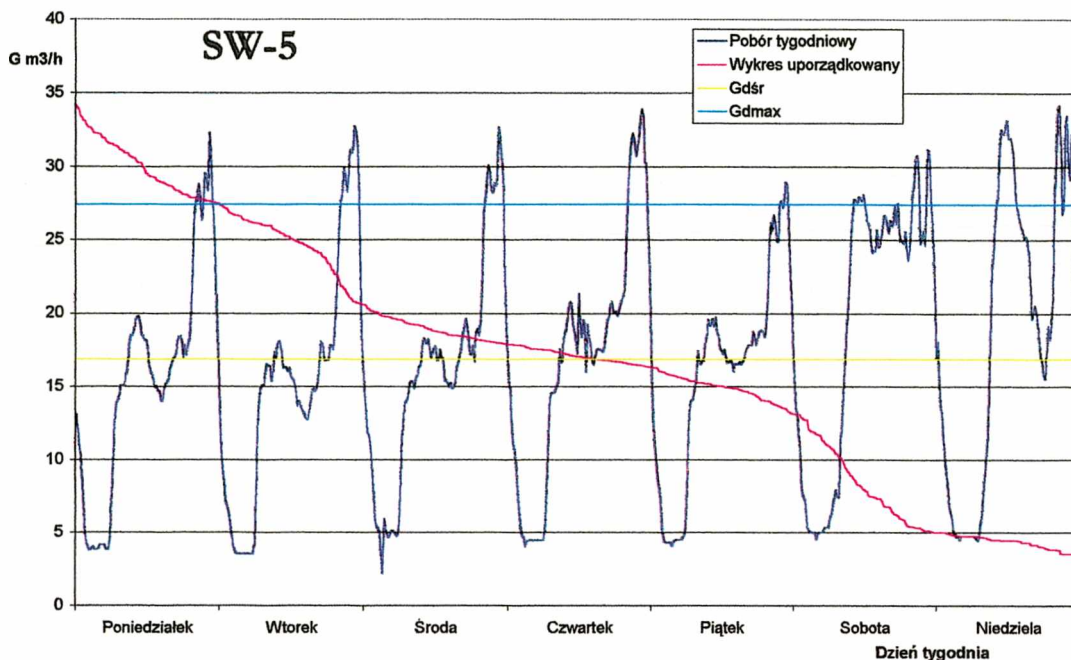
Rys. 5.51. Pobór wody ciepłej w tygodniu średnim – sezon 1997/98.



Rys. 5.52. Pobór wody ciepłej w tygodniu średnim – sezon 1994/95.



Rys. 5.53. Pobór wody ciepłej w tygodniu średnim – sezon 1995/96.



Rys. 5.54. Pobór wody ciepłej w tygodniu średnim – sezon 1996/97.

5.4.8. Podsumowanie badań zużycia ciepłej wody użytkowej przez odbiorców zasilanych z dwufunkcyjnych węzłów ciepłowniczych SW-1, SW-3 i SW-5.

Zaproponowany sposób analizowania zużycia wody ciepłej przez odbiorców mieszkalnych pozwala na uwzględnienie zmian w poborze wody w cyklu dobowym. Zwiększone zapotrzebowanie na ciepłą wodę w dniach wolnych od pracy i w święta powinno być rozpatrzone i uwzględnione przy określaniu wartości miarodajnych do obliczania urządzeń przygotowania c.w.u. W oparciu o przeprowadzoną analizę poboru wody ciepłej wyliczono i przedstawiono w tabeli 5.5. wielkości charakteryzujące pobór ciepłej wody użytkowej przez budynki mieszkalne zasilane z badanych węzłów ciepłowniczych. Obliczeń tych wielkości dokonano dla trzech wariantów opisu charakteru poboru wody:

- Wariant 1 – uśredniony pobór wody w dniach powszedni, sobota i niedziela,
- Wariant 2 - uśredniony pobór wody w dniach od poniedziałku do niedzieli,
- Wariant 3 – pobór wody w tygodniu średnim.

W tabeli 5.5. przedstawiono również wielkości współczynnika godzinowej nierównomierności poboru wody ciepłej wyznaczone w oparciu o obowiązującą normę i wzór /5.43/ oraz według normatywu [27].

Tabela 5.5. Wielkości charakterystyczne poboru c.w.u.

Węzeł	SW-1				SW-3				SW-5		
Sezon	94/95	95/96	96/97	97/98	94/95	95/96	96/97	97/98	94/95	95/96	96/97
Wariant 1											
G_h^{sr}	5.39	4.70	4.47	4.59	8.50	7.10	7.21	6.08	18.83	17.17	18.04
G_h^{max}	9.41	7.96	7.72	7.54	14.14	11.68	12.09	11.49	35.75	31.48	30.62
K_h	1.75	1.69	1.73	1.64	1.66	1.64	1.68	1.89	1.90	1.83	1.70
Wariant 2											
G_h^{sr}	5.06	4.44	4.20	4.32	8.10	6.76	6.86	5.62	17.53	15.77	16.87
G_h^{max}	9.13	7.68	7.36	7.01	13.96	11.62	11.84	11.23	34.74	30.64	30.11
K_h	1.81	1.73	1.75	1.62	1.72	1.72	1.73	2.00	1.98	1.94	1.78
Wariant 3											
G_h^{sr}	5.07	4.45	4.20	4.32	8.11	6.76	6.87	5.64	17.57	15.80	16.89
G_d^{max}	8.07	6.86	6.35	6.31	12.46	10.25	10.62	9.78	29.64	26.58	27.41
G_h^{max}	10.50	9.16	8.62	8.49	15.45	12.63	13.21	12.59	40.18	34.77	33.35
K_d	1.59	1.54	1.51	1.46	1.54	1.52	1.55	1.73	1.69	1.68	1.62
K_h	2.07	2.06	2.05	1.97	1.91	1.87	1.92	2.23	2.29	2.20	1.97
Wartość K_h wg PN-92/B-01706 [34]											
K_h	1.47				1.47				1.12		
Wartość K_h wg normatywu [27]											
K_h	2.20				2.20				2.00		

Tabela 5.6. Dobowe zużycie c.w.u. w badanych obiektach.

Węzeł	SW-1				SW-3				SW-5		
Sezon	94/95	95/96	96/97	97/98	94/95	95/96	96/97	97/98	94/95	95/96	96/97
Wariant 1											
$G_d [m^3/d]$	130.7	113.9	108.4	111.2	206.2	172.5	174.9	147.7	456.8	416.6	437.6
$q_c [l/d.j.n.]$	66.6	58.1	55.3	56.7	106.7	89.2	90.5	76.4	76.1	69.4	72.9
Wariant 2											
$G_d [m^3/d]$	122.8	107.8	101.8	104.6	196.4	164.7	166.5	136.6	425.2	382.7	409.5
$q_c [l/d.j.n.]$	62.6	55.0	51.9	53.3	101.6	85.2	86.1	70.7	70.9	63.8	68.3
Wariant 3											
$G_d [m^3/d]$	121.7	106.7	100.8	103.7	194.6	162.4	167.4	135.4	421.6	379.2	405.3
$q_c [l/d.j.n.]$	62.1	54.4	54.4	52.9	100.7	84.0	86.6	70.0	70.3	63.2	67.6

Ze względu na pracę systemu ciepłowniczego, zwiększony pobór ciepłej wody użytkowej w dni wolne od pracy i święta, wymaga dostarczenia do węzłów przygotowania c.w.u. większych ilości energii cieplnej w postaci zwiększonego strumienia przepływu wody sieciowej. Oznaczać to może, konieczność obliczeń

całego systemu ciepłowniczego uwzględniających zwiększone zapotrzebowanie na ciepłą wodę w tych dniach. Należy jednak pamiętać, że system ciepłowniczy w dni wolne od pracy jest odciążony ze względu na mniejsze zapotrzebowanie mocy cieplnej od strony przemysłu i obiektów użyteczności publicznej. Wówczas strumień wody sieciowej krążącej w systemie może być mniejszy. Z kolei większe zapotrzebowanie mocy ze strony urządzeń przygotowania c.w.u. niejako wymusza większą ilość wody sieciowej jako nośnika energii. Można więc założyć, że praca układów c.w.u. działa łagodząco na wielkość zmian strumienia wody sieciowej wywoływanych przerwami w pracy zakładów przemysłowych.

5.5. Badania zmienności strumienia wody sieciowej

5.5.1. Wartości wskaźnikowe ciepłej wody użytkowej

Dynamika zmian poboru ciepłej wody jest podstawowym czynnikiem zakłócającym pracę węzła, a także całego systemu ciepłowniczego. Określenie jej zakresu zmian dla badanych węzłów ciepłowniczych w całym okresie badawczym, było celem przeprowadzonych w rozdziale 5.4. badań. Pozwoliły one na ustalenie rzeczywistych wartości udziału c.w.u. i współczynników jej godzinowej nierównomierności poboru. Są to parametry, które znacząco oddziałują na chwilową moc cieplną węzła, a tym samym, na zmiany dopływającego do niego strumienia wody sieciowej.

Udział ciepłej wody A_{cw} , rozumiany jako stosunek zapotrzebowania ciepła na przygotowanie c.w.u. do obliczeniowego zapotrzebowania ciepła do c.o., decyduje o poziomie zapotrzebowania na moc cieplną przez węzeł ciepłowniczy, zaś współczynnik nierównomierności o możliwych jego zmianach. Są to więc, rzeczywiste warunki brzegowe (od strony przygotowania ciepłej wody użytkowej) pracy badanych węzłów ciepłowniczych. Tabela 5.7 przedstawia zebrane rzeczywiste wielkości udziałów c.w.u., współczynników akumulacyjności węzła φ i nierównomierności poboru c.w.u. K_h w badanych węzłach i sezonach ogrzewczych.

Tabela 5.7. Wielkości wskaźnikowe ciepłej wody użytkowej.

Węzeł	Grunwaldzka 45	SW-0	SW-1	SW-2	SW-3	SW-4	SW-5
Sezon 1994/95							
q_c [l/d.j.n.]	116.6	116.5	62.1	-	100.7	82.4	70.3
$A_{cw.}$	0.205	0.186	0.098	-	0.157	0.178	0.165
K_h	2.21	2.10	2.07	-	1.91	2.07	2.29
φ	0.11	0.68	0.49	-	0.58	0.84	0.42
Sezon 1995/96							
q_c [l/d.j.n.]	82.5	112.1	54.4	86.4	84.0	-	63.2
$A_{cw.}$	0.145	0.179	0.086	0.155	0.131	-	0.148
K_h	2.01	2.06	2.06	2.05	1.87	-	2.20
φ	0.18	0.73	0.56	0.58	0.72	-	0.50
Sezon 1996/97							
q_c [l/d.j.n.]	-	-	54.4	83.0	86.6	75.9	67.6
$A_{cw.}$	-	-	0.081	0.149	0.133	0.164	0.159
K_h	-	-	2.05	2.03	1.92	2.04	1.97
φ	-	-	0.50	0.61	0.68	0.93	0.54
Sezon 1997/98							
q_c [l/d.j.n.]	-	-	52.9	-	70.0	-	-
$A_{cw.}$	-	-	0.084	-	0.109	-	-
K_h	-	-	1.97	-	2.23	-	-
φ	-	-	0.61	-	0.68	-	-

Wartości te stanowią podstawę do dalszych badań eksploatacyjnych opisanych węzłów ciepłowniczych. Pozwolą one na dokładne określenie wpływu zmiennego charakteru poboru ciepłej wody użytkowej na chwilową moc cieplną węzła, a więc na zmianę dopływającego do niego strumienia wody sieciowej.

5.5.2. Określenie pojęcia współczynnika nierównomierności strumienia wody sieciowej K_{ws}

Rozporządzenie Ministra Gospodarki [35] ustala standardy jakościowe obsługi odbiorców, które m.in. obejmują dopuszczalne odchylenie od obliczeniowego natężenia przepływu nośnika ciepła. Wartość ta dla wody gorącej nie powinna przekraczać $\pm 5\%$.

W przypadku pracy sieci ciepłowniczej z dwufunkcyjnymi węzłami, zachowanie dopuszczalnej odchyłki strumienia wody sieciowej dopływającej do węzła, bez dodatkowych konsekwencji, jest praktycznie niemożliwe. Zastosowanie

np. regulatorów stałego przepływu wywołuje odchyłkę temperatury wody powrotnej ponad wartość dopuszczalną ($\pm 7\%$ [35]). Problemem, okazuje się też tu, przyjęcie właściwej wartości obliczeniowego strumienia wody sieciowej jaki dopływa do węzła dwufunkcyjnego. Z kolei, projektowanie układów przygotowania c.w.u. o wysokim współczynniku akumulacyjności Φ , w celu łagodzenia skutków zmiennego poboru ciepłej wody i mniejszego oddziaływania na sieć ciepłowniczą, wymaga stosowania bardzo dużych zasobników i pomieszczeń.

Konieczność dużych wahań strumienia wody sieciowej w dwufunkcyjnym węźle ciepłowniczym jest też uwarunkowana rodzajem przyjętego wykresu regulacyjnego. W przypadku sieci ciepłowniczej, pracującej według wykresu regulacyjnego z jednym punktem załamania, występują znaczne różnice między wymaganym przez węzeł minimalnym a maksymalnym strumieniem wody sieciowej. Wprowadzenie wykresu regulacyjnego z dwoma punktami załamania (rys.2.2) w istotny sposób zmniejsza różnice pomiędzy skrajnymi wartościami strumienia wody sieciowej, jaki dopływa do węzła.

Wykres (rys. 5.55.), sporządzony dla danych rzeczywistych dla węzła ciepłowniczego w Ustce (ul. Grunwaldzka 45), przedstawia zmiany strumienia wody sieciowej w wartościach bezwzględnych (rzeczywistych) przy prowadzeniu systemu ciepłowniczego w oparciu o powyższe wykresy regulacyjne. Naniesiono na nim przebiegi strumienia wody sieciowej wynikające:

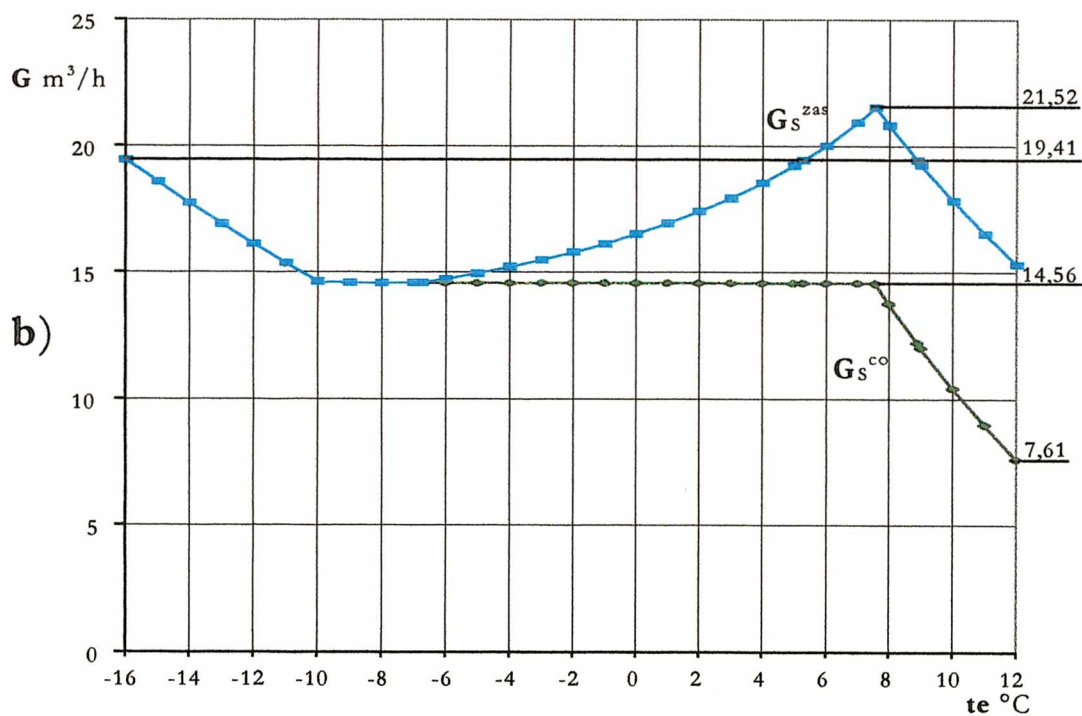
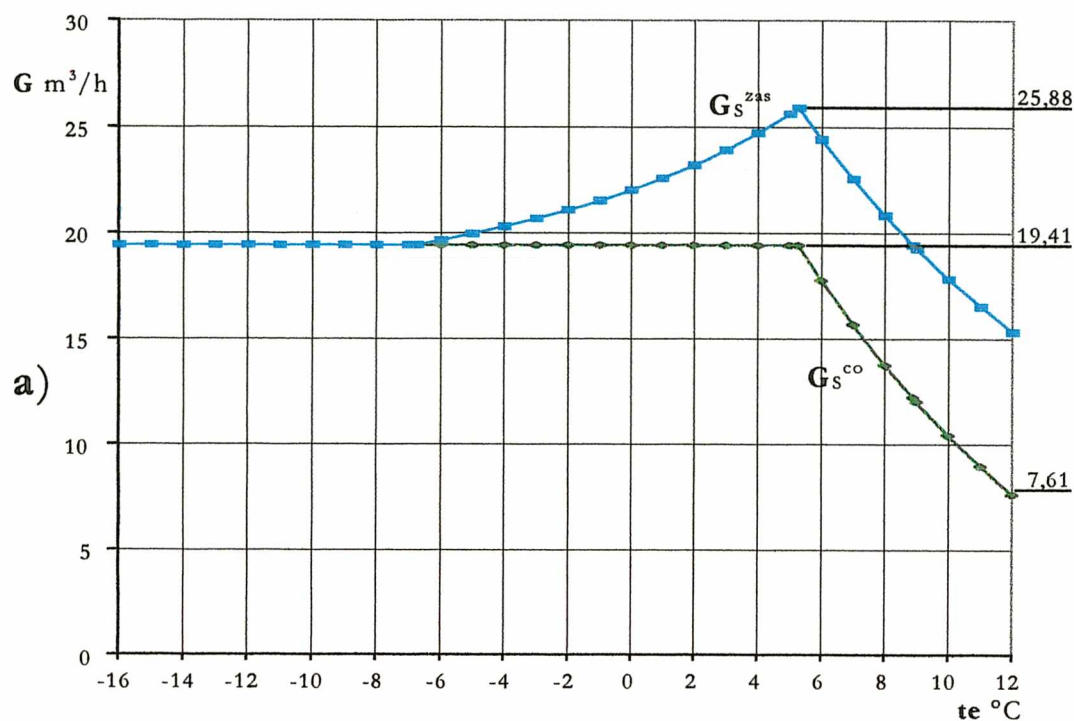
- tylko z potrzeb ogrzewania budynków G_s^{co} ,
- z potrzeb c.o. i c.w.u. przy obniżonym zapotrzebowaniu na ciepło od strony układu c.w.u. przez obecność zasobników G_s^{zas} .

Zaznaczono także charakterystyczne wartości strumienia jakie teoretycznie mogą wystąpić w okresie całego sezonu ogrzewczego przy skrajnych poborach ciepłej wody użytkowej. Wielkości tych zmian należy bezwarunkowo transponować na pracę całego systemu ciepłowniczego – sieci ciepłej, pompowni, źródła ciepła.

Na tym przykładzie obserwuje się możliwości łagodzenia wahań strumienia wody sieciowej już na etapie organizacji pracy systemu ciepłowniczego. Wystarczy

zauważyć, że w przypadku wykresu regulacyjnego z jednym punktem załamania (rys. 5.55a), zmiana strumienia wody sieciowej w węźle sięga 70%, gdy przy wykresie z dwoma punktami załamania (rys. 5.55b) zmiana ta wynosi już 65%. Ponadto należy uwzględnić fakt znacznego zmniejszenia ilości wody sieciowej krążącej w całym systemie, a więc i mniejszego zużycia energii. Biorąc pod uwagę także to, że niskie temperatury zewnętrzne w sezonie ogrzewczym występują raptem kilka godzin, praca tak prowadzonego systemu staje się jeszcze bardziej ekonomiczna.

Kolejnym zabiegiem zmniejszającym wielkość wahań strumienia wody sieciowej przez obniżenie jego wartości maksymalnej, jest praca węzła ciepłowniczego z priorytetem c.w.u. Wyposażenie węzła w urządzenia regulacyjne ograniczające dopływ wody sieciowej ponad wartość zadaną umożliwia, w przypadkach zawyżonego poboru ciepłej wody użytkowej, wykorzystanie zdolności akumulacyjnych ogrzewanych budynków. Węzeł pracuje wtedy przy deficycie ciepła (ograniczony strumień wody sieciowej). Przyjęcie więc, dla wykresu z dwoma punktami załamania, jako poziomu maksymalnego, wielkość strumienia wody sieciowej przy obliczeniowej temperaturze zewnętrznej t_e , $G_s^{\max} = 19,41 \text{ m}^3/\text{h}$, ograniczy jego zakres zmian do 60%. Ponadto, w przypadku małego poboru wody ciepłej lub jego braku, w wyniku ładowania zasobników i zawyżenia dostawy ciepła do c.o. (gdy był realizowany priorytet c.w.u.) nastąpi podniesienie minimalnej wartości strumienia wody sieciowej dopływającej do węzła. Wystąpi więc kolejny proces łagodzenia wahań strumienia wody sieciowej dopływającej do dwufunkcyjnego węzła ciepłowniczego. Określenie wielkości tego zjawiska nie jest możliwe do przeprowadzenia w oparciu o analizę teoretyczną, wymaga więc badań eksploatacyjnych, które będą podstawą do oceny jakości pracy węzła ciepłowniczego o określonej konstrukcji.



Rys. 5.55. Wykres zmian strumieni wody sieciowej w węźle przy wykresie regulacyjnym
 a) z jednym punktem załamania, b) z dwoma punktami załamania.

W celu jednoznacznego opisania zakresu zmian strumienia wody sieciowej w obrębie węzła ciepłowniczego proponuje się wprowadzenie pojęcia, opisującego wielkość wahań strumienia wody sieciowej dopływającego do węzła, w postaci współczynnika nierównomierności strumienia wody sieciowej K_{ws} . Wielkość tą należy określać jako stosunek maksymalnej do minimalnej wartości strumienia wody sieciowej w rozpatrywanym okresie czasu.

$$K_{ws} = \frac{G_s^{\max}}{G_s^{\min}} \quad / 5.48/$$

Dla podawanego wyżej przykładu węzła ciepłowniczego w Ustce wielkości współczynnika K_{ws} będą wynosiły:

- dla wykresu regulacyjnego z jednym punktem załamania – $K_{ws}=3.40$,
- dla wykresu regulacyjnego z dwoma punktami załamania – $K_{ws}=2.83$,
- dla wykresu regulacyjnego z dwoma punktami załamania i priorytetem ciepłej wody użytkowej – $K_{ws}=2.55$.

Podana w Rozporządzeniu [35], wielkość dopuszczalnej odchyłki od obliczeniowego natężenia przepływu wody sieciowej, zapewniająca standardy jakościowe obsługi odbiorców, przyjmuje wartość współczynnika nierównomierności strumienia wody sieciowej $K_{ws}=1.11$.

Wprowadzona nowa wielkość może być stosowana do określania zmienności strumienia wody sieciowej w węzłach ciepłownicznych, sieciach ciepłych, w różnych czasowych okresach odniesienia. Można więc mówić np. o godzinowym (K_{wsH}) lub dobowym (K_{wsd}) współczynniku nierównomierności. Będzie on odzwierciedlał wielkość wahań przepływu wody zgodnie z przyjętą dokładnością pomiaru lub rejestracji.

W dalszej części pracy, zarejestrowane zmiany strumienia wody sieciowej w badanych węzłach ciepłownicznych, wywołane zmiennym obciążeniem ciepłym, będą opisywane przy pomocy wprowadzonego nowego pojęcia współczynnika K_{ws} , zarówno w jego postaci godzinowej jak i dobowej.

5.5.3. Badanie dobowej nierównomierności strumienia wody sieciowej

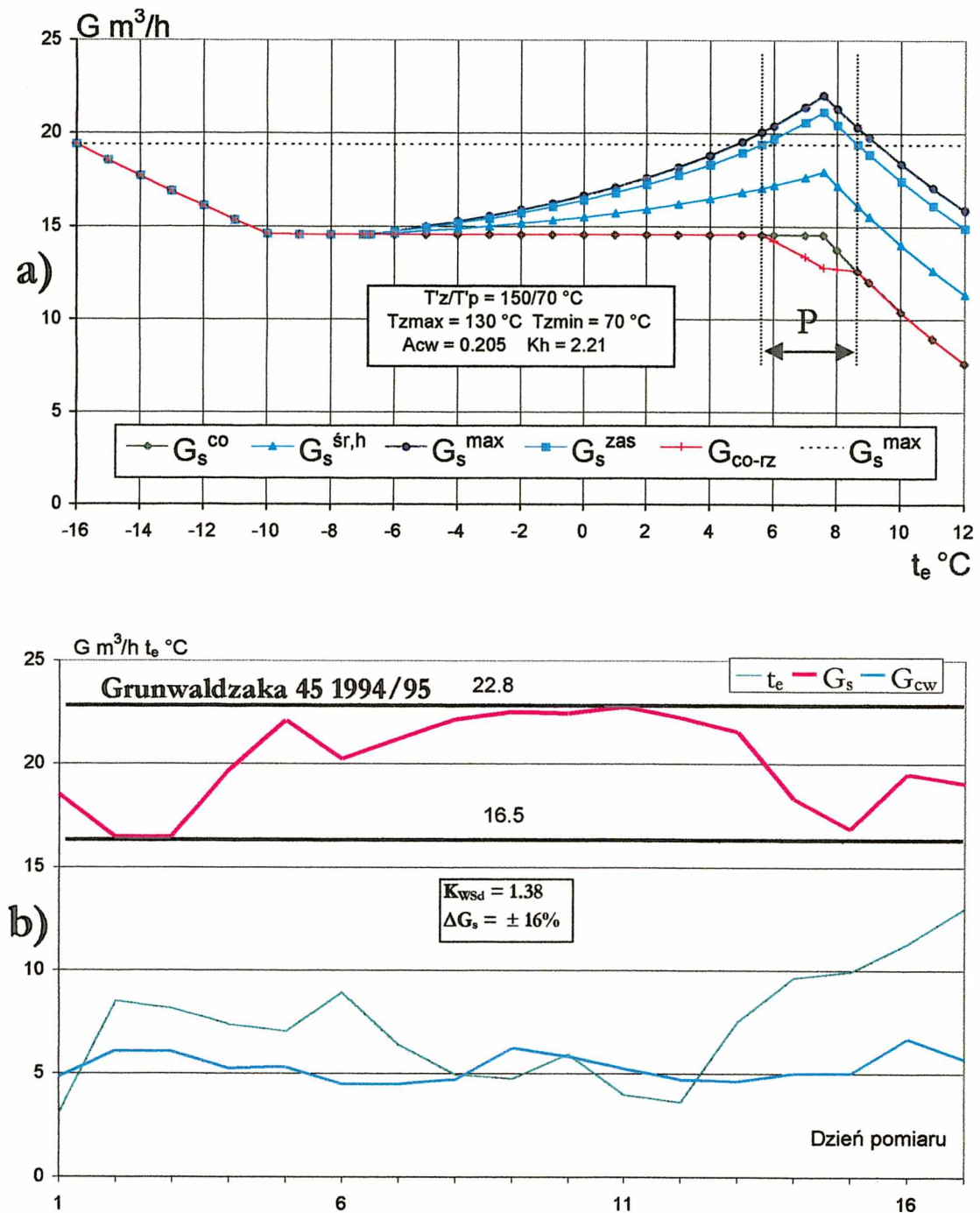
Jakość pracy pełnoszeregowego węzła cieplowniczego okresowo pracującego jako szeregowo-równoległy może być oceniona na podstawie kilku czynników. Dwa podstawowe, to zapewnienie właściwego przygotowania c.w.u. oraz dostarczenie wymaganej ilości ciepła do c.o. Pierwszy z nich wiąże się z utrzymaniem zadanej temperatury wody ciepłej niezależnie od jej poboru. Drugi natomiast to zagwarantowanie wymaganego bilansu cieplnego ogrzewanych budynków. Obydwa warunki, w przypadkach bezawaryjnej pracy węzła, muszą być koniecznie spełnione. W badanych węzłach, wyposażonych w nadrzędny, komputerowy system sterowania, spełnienie tych wymogów gwarantują urządzenia automatycznej regulacji. Jednak praca układów regulacyjnych, których nadrzędnym celem jest utrzymanie wartości zadanych przy zmiennych potrzebach cieplnych węzła, oddziałuje na wielkość wahań dopływającego do niego strumienia wody sieciowej, jako nośnika energii. Będzie to więc kolejny czynnik świadczący o jakości pracy dwufunkcyjnego węzła cieplowniczego. Obowiązuje bowiem zasada: im większa stabilność strumienia wody sieciowej w dwufunkcyjnym węźle cieplowniczym, tym większa stabilność pracy całego systemu cieplowniczego. Wynika ona z proporcji udziału ciepłej wody użytkowej, jako głównego czynnika zakłócającego stabilność przepływu wody sieciowej (rys 5.55.), w pojedynczym węźle i w całym systemie cieplowniczym.

Analiza pracy badanych węzłów pod kątem dobowej nierównomierności przepływu strumienia wody sieciowej w całym sezonie ogrzewczym, będzie wyznacznikiem do oceny ich pracy. Uzyskane wyniki, w postaci określonych dobowych współczynników nierównomierności strumienia wody sieciowej K_{wsd} , mogą świadczyć o standardzie jakościowym obsługi odbiorców i być porównywane z obowiązującymi wytycznymi. Stanowią one również podstawę do prowadzenia rozmów (zawieranie umów i ich realizacja) pomiędzy dostawcą ciepła a jego odbiorcą.

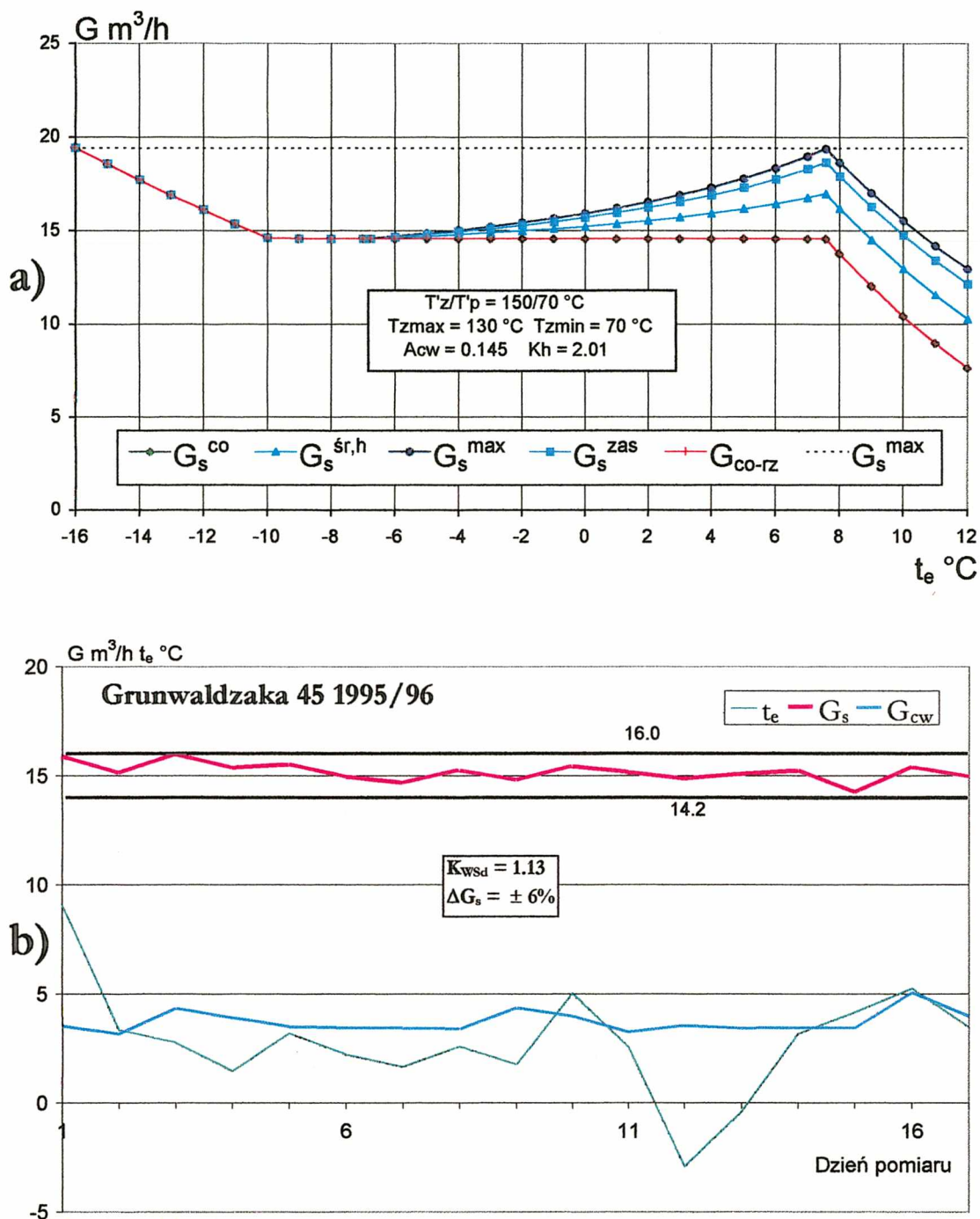
5.5.3.1. Eksploatacyjne wykresy dobowej zmienności strumienia wody sieciowej

Prezentowane na rys 5.56.÷5.65. wykresy przedstawiają teoretyczne (rys. a) i rzeczywiste (rys. b) wahania strumienia wody sieciowej, dopływającej do badanych węzłów ciepłowniczych w poszczególnych sezonach ogrzewczych, wywołane zmianą temperatury zewnętrznej i poborem c.w.u. Eksploatacyjne przebiegi sporządzono w oparciu o dobowe uśrednienie zarejestrowanych piętnastominutowych wartości mierzonych przez wodomierze W1, W3 i czujnik temperatury t_e (rys. 5.1.). Zaznaczono na nich także granice zmian strumienia wody sieciowej oraz przedstawiono wartość dobowego współczynnika nierównomierności wody sieciowej K_{wsd} i procentowej odchyłki.

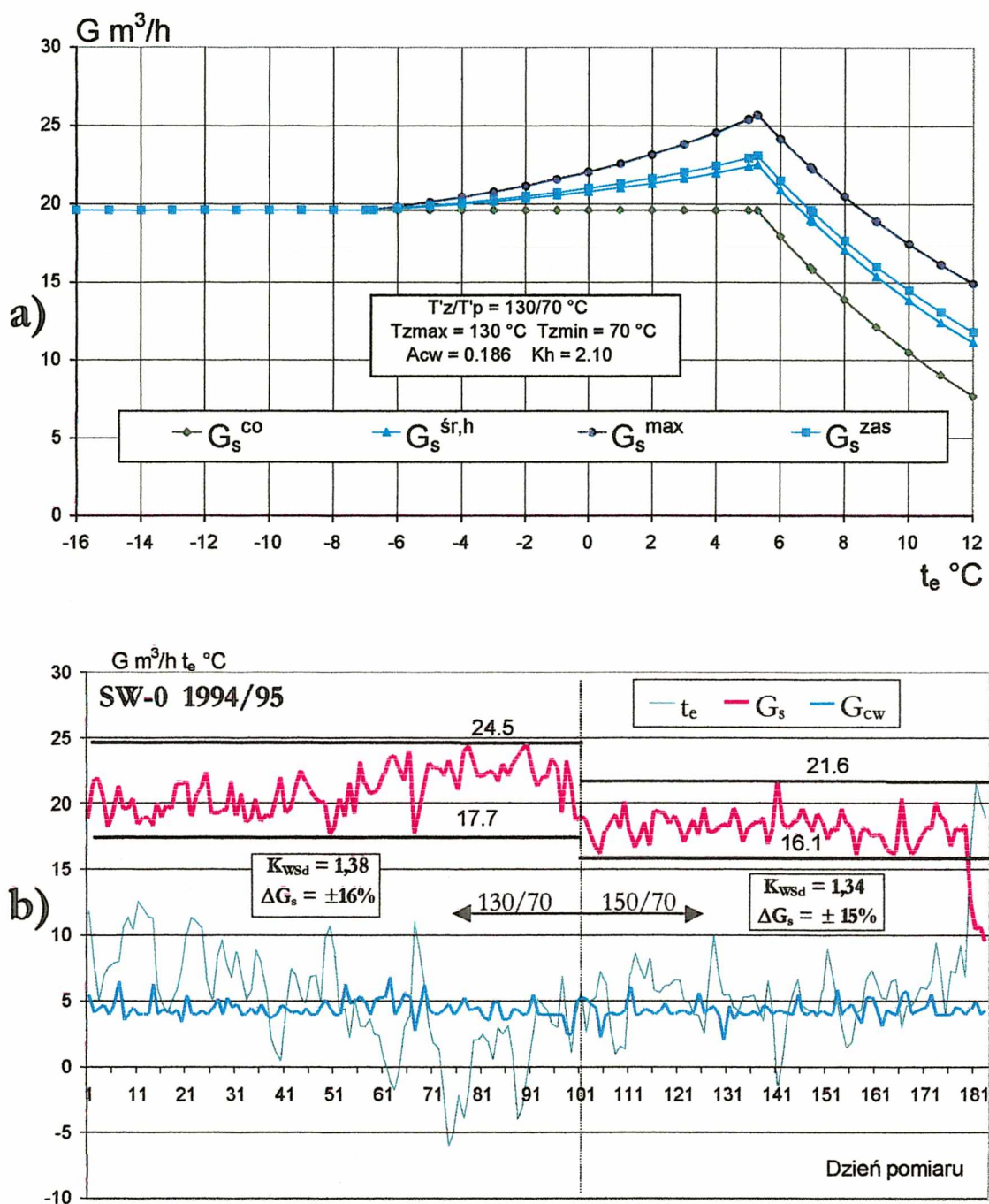
Na wykresach obliczeniowych, sporządzonych w oparciu o obowiązujący w danym sezonie wykres regulacyjny, zaznaczono możliwe do wystąpienia (teoretyczne) zmiany strumienia wody sieciowej w funkcji temperatury zewnętrznej t_e i poboru ciepłej wody G_{cw} . W przypadku, gdy w danym sezonie ogrzewczym obowiązywał wykres regulacyjny z dwoma punktami załamania zaznaczono na nich także, maksymalny strumień wody sieciowej jaki może dopłynąć do węzła oraz obszar (jeżeli taki występuje), w którym możliwa jest praca węzła z priorytetem ciepłej wody użytkowej przy jej poborze większym lub równym od wartości G_s^{zas} .



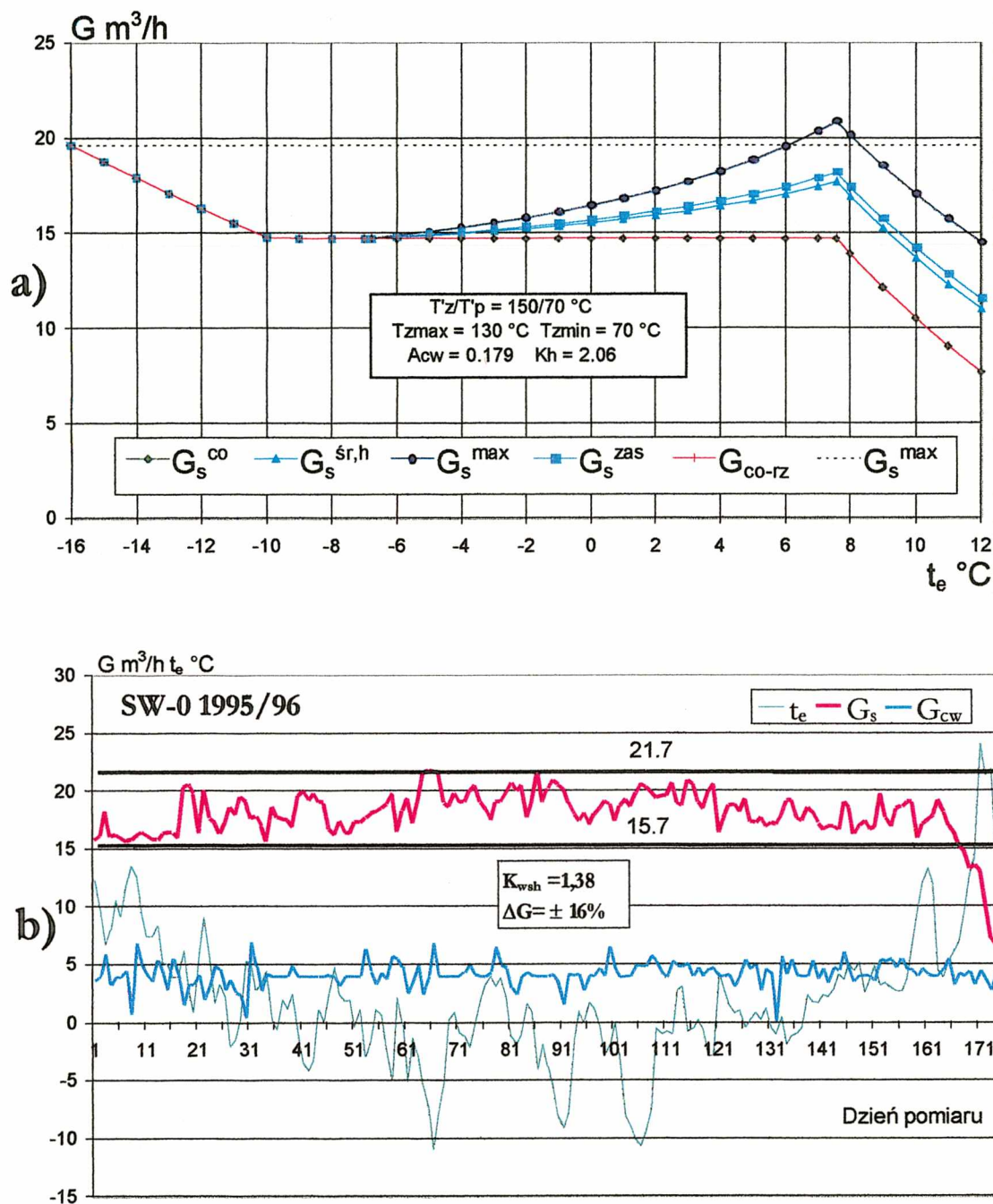
Rys. 5.56. Zmiany strumienia wody sieciowej w węźle Grunwaldzka 45 w sezonie 1994/95
 wywołane zmianą temperatury zewnętrznej t_e i poboru c.w.u. G_{cw}
 a) wykres teoretyczny, b) wykres eksploatacyjny.



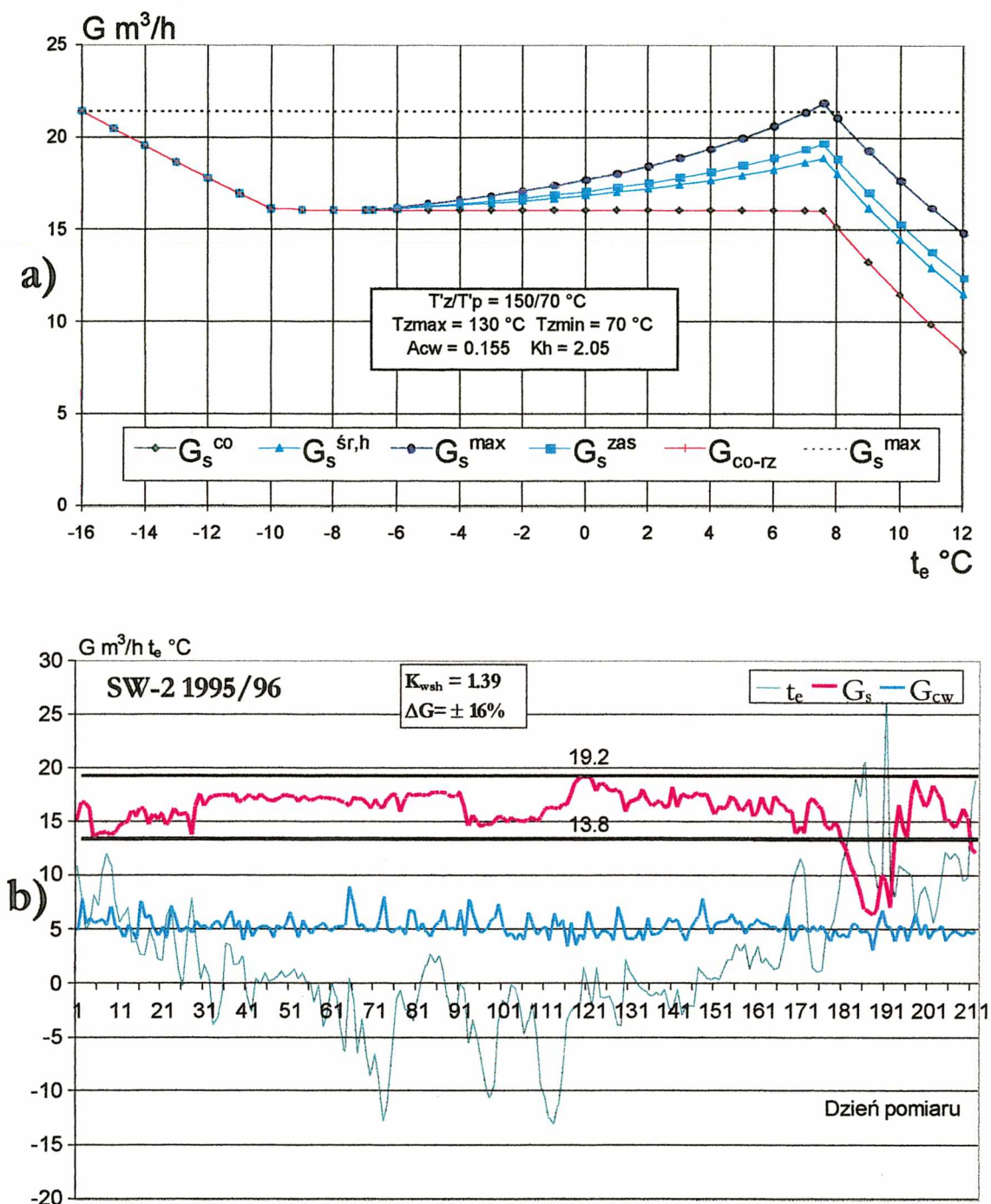
Rys. 5.57. Zmiany strumienia wody sieciowej w węźle Grunwaldzka 45 w sezonie 1995/96
 wywołane zmianą temperatury zewnętrznej t_e i poboru c.w.u. G_{cw}
 a) wykres teoretyczny, b) wykres eksploatacyjny.



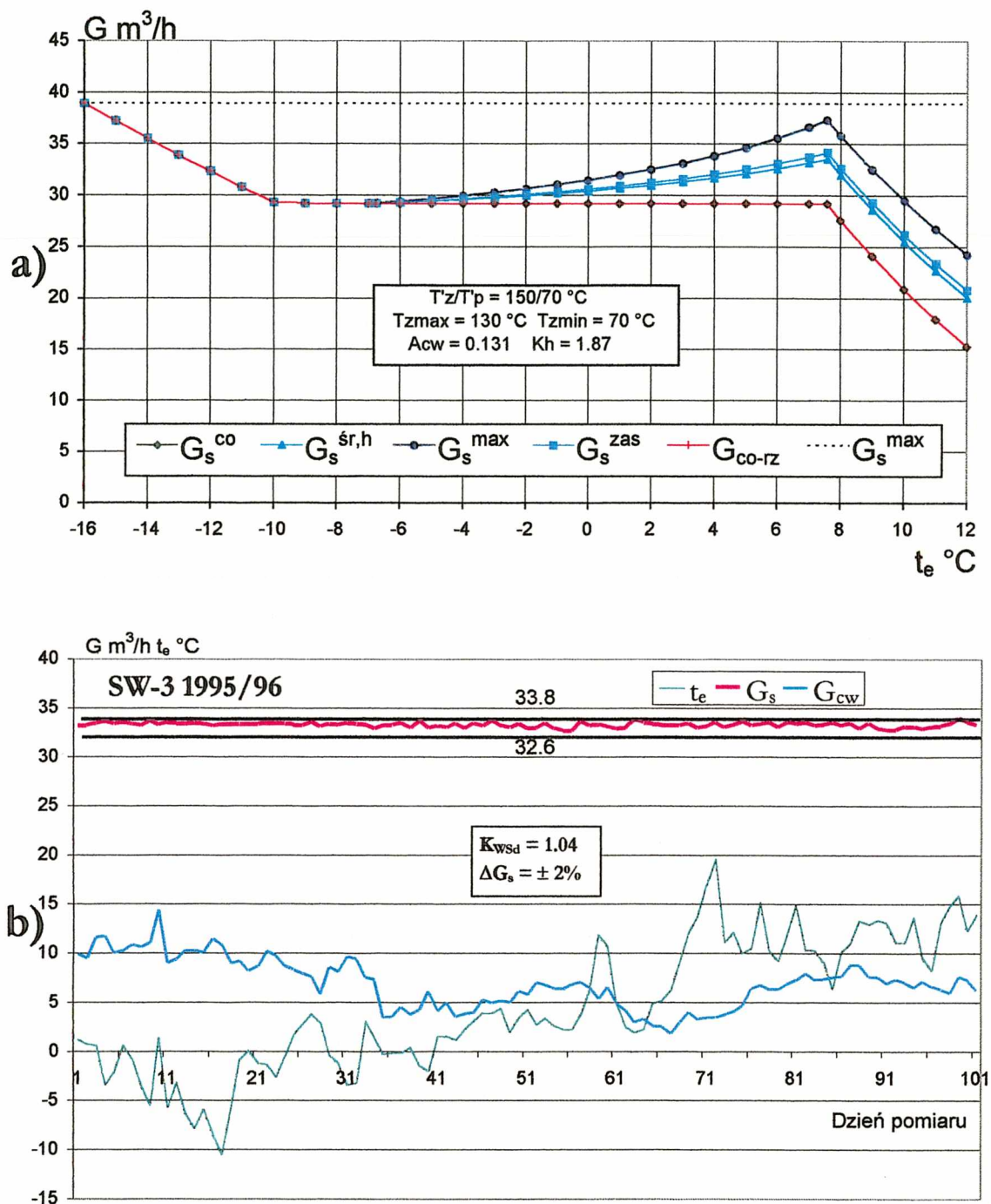
Rys. 5.58. Zmiany strumienia wody sieciowej w węźle SW-0 w sezonie 1994/95
 wywołane zmianą temperatury zewnętrznej t_e i poboru c.w.u. G_{cw}
 a) wykres teoretyczny, b) wykres eksploatacyjny.



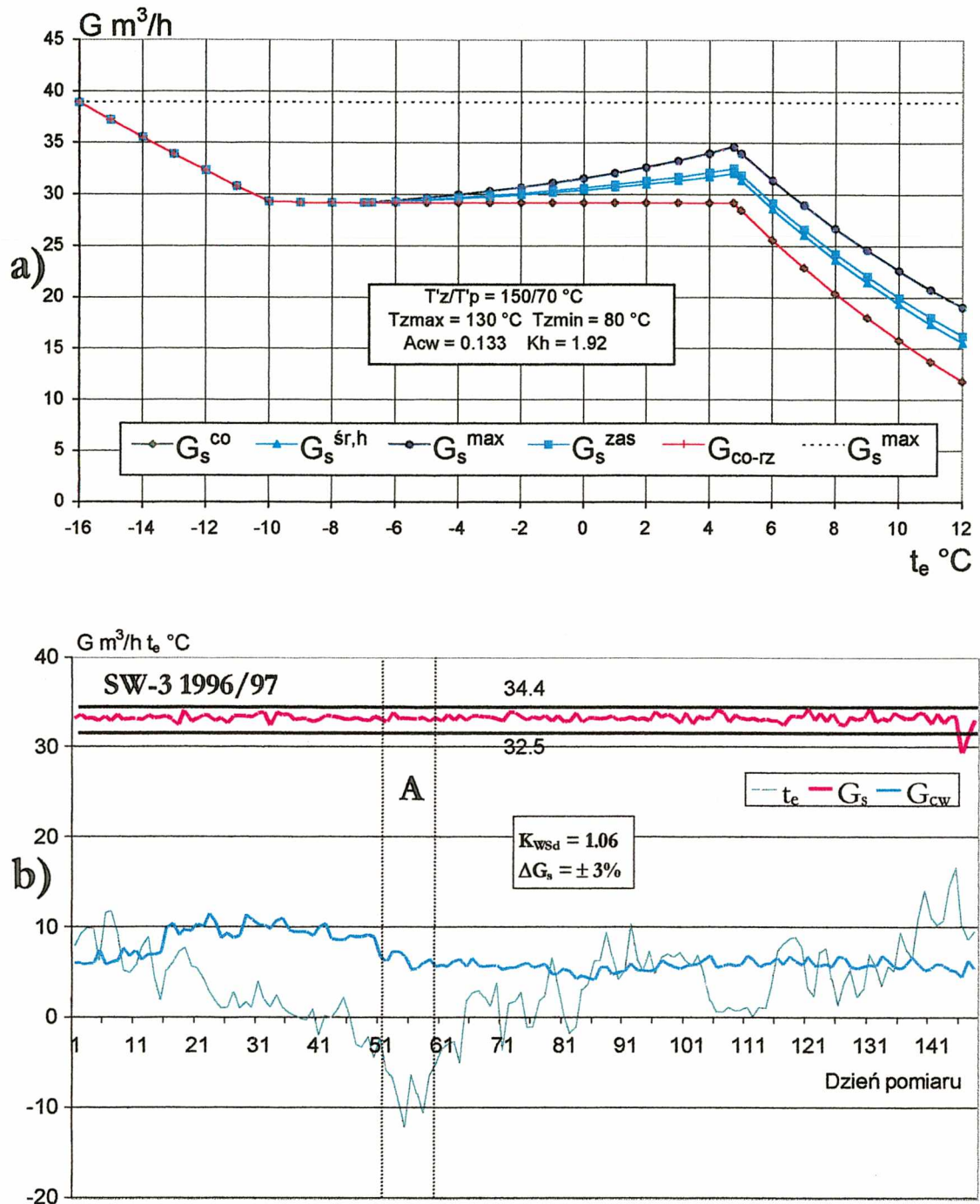
Rys. 5.59. Zmiany strumienia wody sieciowej w węźle SW-0 w sezonie 1995/96
 wywołane zmianą temperatury zewnętrznej t_e i poboru c.w.u. G_{cw}
 a) wykres teoretyczny, b) wykres eksploatacyjny.



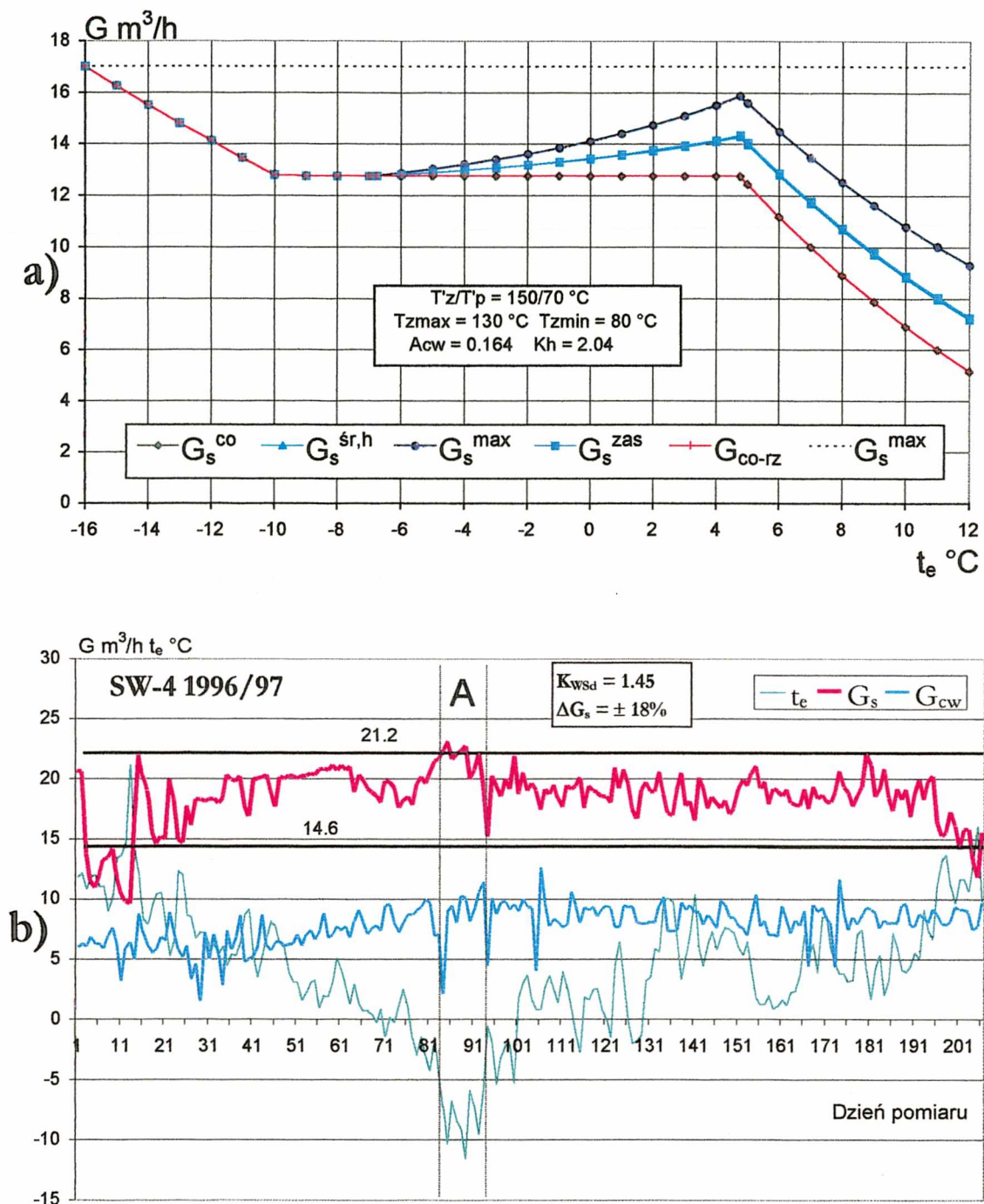
Rys. 5.60. Zmiany strumienia wody sieciowej w węźle SW-2 w sezonie 1995/96
 wywołane zmianą temperatury zewnętrznej t_e i poboru c.w.u. G_{cw}
 a) wykres teoretyczny, b) wykres eksploatacyjny.



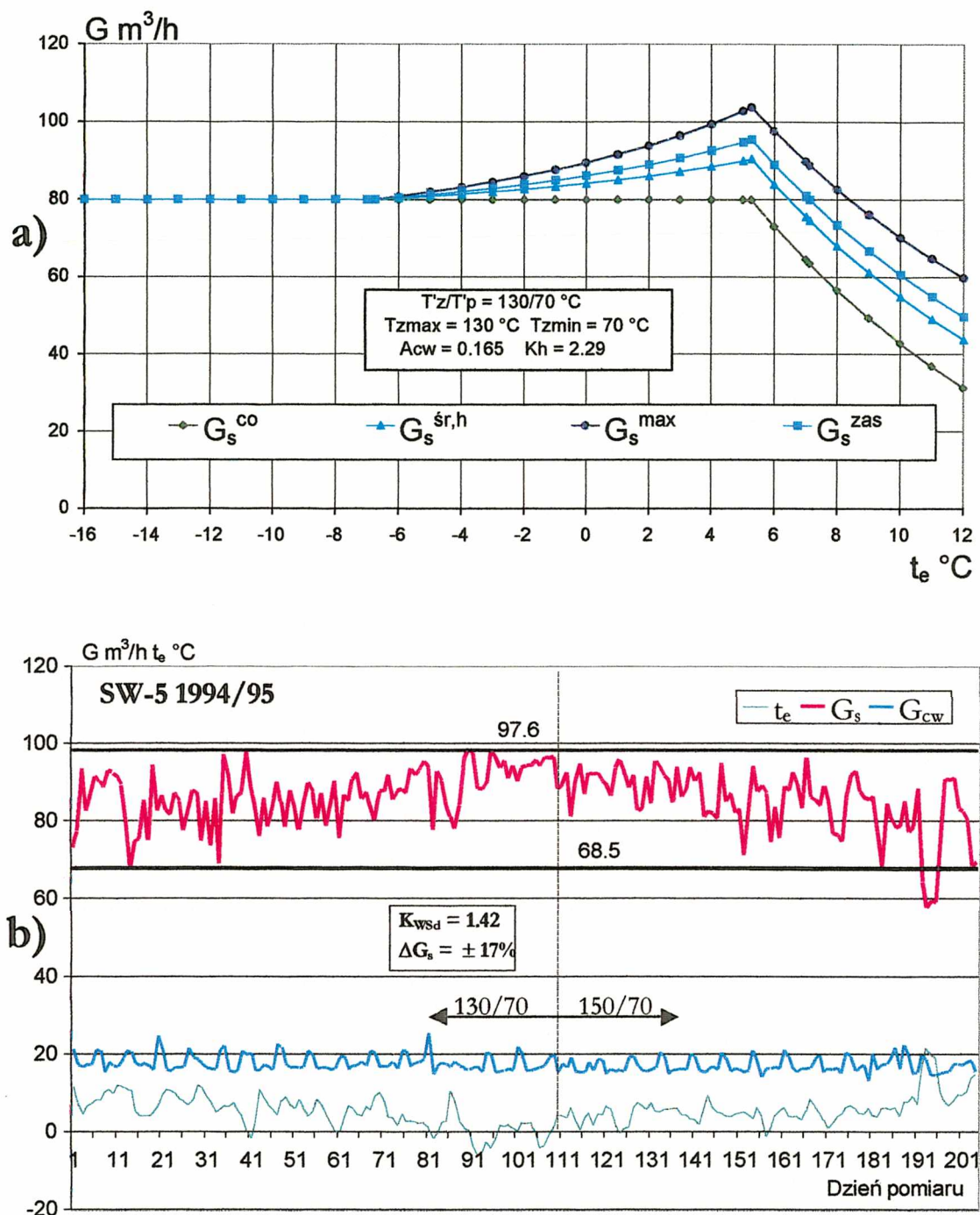
Rys. 5.61. Zmiany strumienia wody sieciowej w węźle SW-3 w sezonie 1995/96
 wywołane zmianą temperatury zewnętrznej t_e i poboru c.w.u. G_{cw}
 a) wykres teoretyczny, b) wykres eksploatacyjny.



Rys. 5.62. Zmiany strumienia wody sieciowej w węźle SW-3 w sezonie 1996/97
 wywołane zmianą temperatury zewnętrznej t_e i poboru c.w.u. G_{cw}
 a) wykres teoretyczny, b) wykres eksploatacyjny.



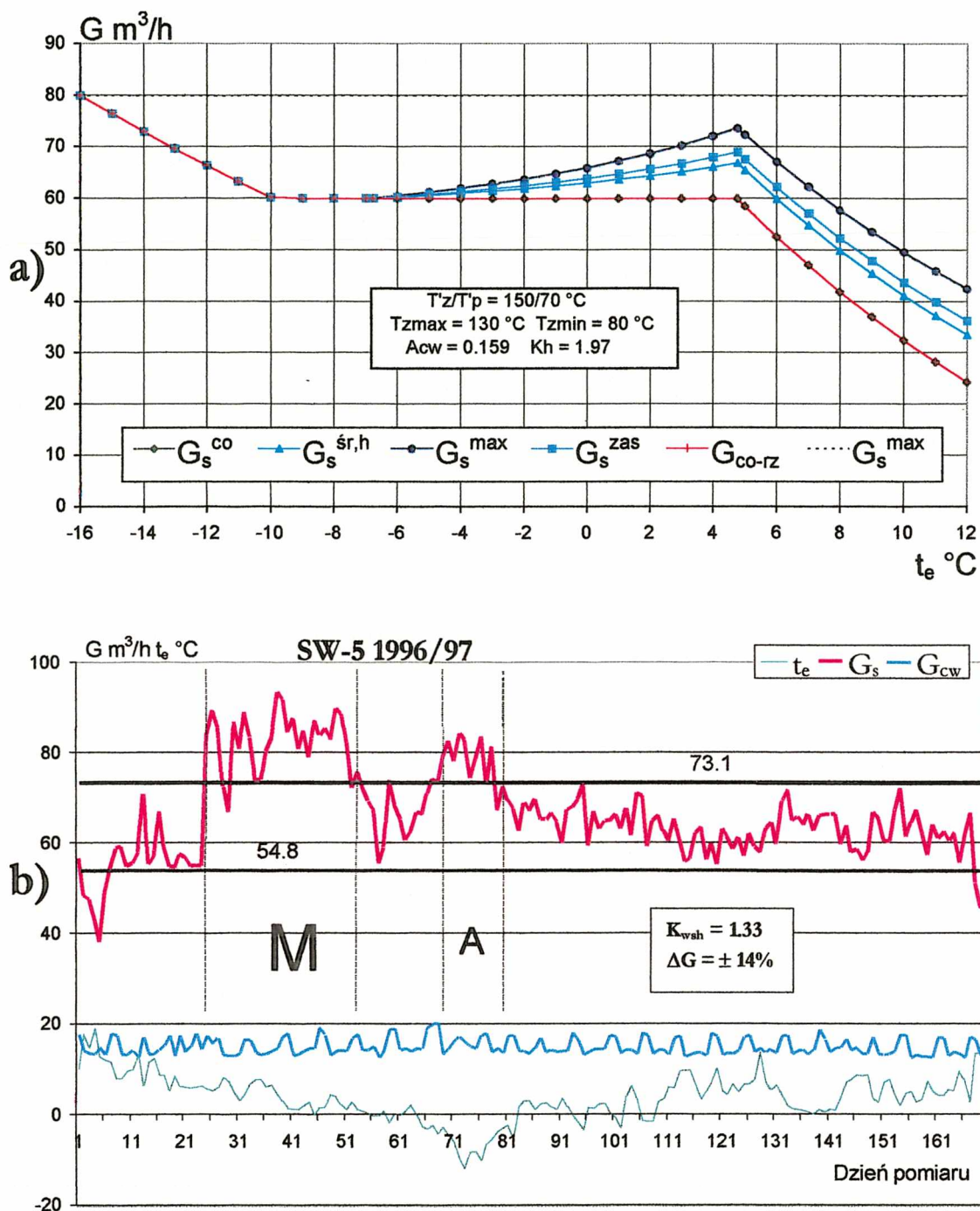
Rys. 5.63. Zmiany strumienia wody sieciowej w węźle SW-4 w sezonie 1996/97
 wywołane zmianą temperatury zewnętrznej t_e i poboru c.w.u. G_{cw}
 a) wykres teoretyczny, b) wykres eksploatacyjny.



Rys. 5.64. Zmiany strumienia wody sieciowej w węźle SW-5 w sezonie 1994/95

wywołane zmianą temperatury zewnętrznej t_e i poboru c.w.u. G_{cw}

a) wykres teoretyczny, b) wykres eksploatacyjny.



Rys. 5.65. Zmiany strumienia wody sieciowej w węźle SW-5 w sezonie 1996/97
 wywołane zmianą temperatury zewnętrznej t_e i poboru c.w.u. G_{cw}
 a) wykres teoretyczny, b) wykres eksploatacyjny.

Analizując przedstawione wykresy zauważa się zgodność założeń teoretycznych, dotyczących przewidywanych zmian strumienia wody sieciowej (wykresy a), z wynikami badań eksploatacyjnych pracy węzłów ciepłowniczych (wykresy b). Rozbieżności te nie przekraczają 10%. Jedynie w przypadku węzła SW-4 przyjęte obliczeniowe wartości strumienia wody sieciowej dopływającej do węzła są zaniżone w stosunku do wielkości rzeczywistych o ok. 40%. Prawdopodobnie spowodowane jest to większym rzeczywistym zapotrzebowaniem na ciepło do ogrzewania budynków niż przejęta wartość obliczeniowa będąca podstawą do sporządzenia wykresu teoretycznego (rys. 5.63.).

Obserwowane wykresy zmian strumienia wody sieciowej w poszczególnych węzłach i sezonach ogrzewczych, wykazują, w większości przypadków, nieznaczną amplitudę wahań wynoszącą $\pm 14 \div 18\%$. Odpowiada to zdefiniowanemu współczynnikowi dobowej nierównomierności strumienia wody sieciowej K_{wsd} : $1,33 \div 1,45$. Węzeł ciepłowniczy SW-3 (rys. 5.61., 5.62.) charakteryzuje się najmniejszymi wartościami K_{wsd} ($1,04 \div 1,06$), co można tłumaczyć niewielkim udziałem ciepłej wody A_{cw} w potrzebach cieplnych węzła, lub też błędnie działającym impulsatorem wodomierza W1. Poprawność jego pracy zostanie sprawdzona na przykładzie badań godzinowej nierównomierności strumienia wody sieciowej. Dla porównania, wielkość współczynnika dobowej nierównomierności strumienia wody sieciowej K_{wsd} w węzłach szeregowo-równoległych rzadko spada poniżej 2,5.

Przy określaniu na prezentowanych wykresach eksploatacyjnych, granic zmian strumienia wody sieciowej, nie uwzględniono zmniejszonego jej przepływu, gdy węzeł pracował jako jednofunkcyjny na potrzeby c.w.u. (przy wysokich temperaturach zewnętrznych t_e).

Z prezentowanych węzłów ciepłowniczych, według ustaleń teoretycznych, wynika, że jedynie węzeł w Ustce (Grunwaldzka 45) w sezonie ogrzewczym 1994/95 (rys. 5.56.) będzie pracował z priorytetem ciepłej wody użytkowej. Przy wysokim udziale c.w.u. i niskiej akumulacyjności węzła taka praca zapewnia

stabilizację wahań strumienia wody sieciowej w granicach $\pm 16\%$. W przypadku pracy węzłów z systemem ciepłowniczym prowadzonym w oparciu o wykres regulacyjny z jednym punktem załamania (rys. 5.58., 5.64.), na podstawie prezentowanych wykresów nie można stwierdzić, czy zjawisko priorytetu ciepłej wody występowało i ewentualnie jaka była jego głębokość. Jest to dopiero możliwe po przeprowadzeniu badania bilansu cieplnego układów centralnego ogrzewania.

W wyniku wykazanego w punkcie 5.4, znacznego ograniczenia zużycia ciepłej wody użytkowej, wielkość jej udziału A_{cw} w potrzebach cieplnych węzła maleje z każdym sezonem ogrzewczym. Rośnie natomiast współczynnik akumulacyjności ϕ (tabela 5.7.). Tak więc, prawdopodobieństwo występowania zjawiska priorytetu c.w.u. znacznie w badanych węzłach maleje. Wysokie współczynniki akumulacyjności wynikają także z faktu, iż zmodyfikowane węzły ciepłownicze powstały w systemach cieplnych Słupska w wyniku modernizacji obiektów istniejących (wykorzystanie pomieszczeń i eksploatowanych wcześniej zasobników wody ciepłej), obliczanych na znacznie większe zużycie c.w.u.

W systemie ciepłowniczym Słupska w sezonie ogrzewczym 1996/97 w okresie niskich temperatur zewnętrznych (ok. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) wystąpiło wyraźne zniżenie temperatury wody sieciowej na zasilaniu w stosunku do obowiązującego wykresu regulacyjnego. Reakcją na zmniejszona ilość ciepła w wodzie sieciowej był zwiększony jej pobór przez węzły ciepłownicze – strefa A (rys. 5.62., 5.63., 5.65.).

Wyniki badań eksploatacyjnych pracy węzłów w słupskim systemie ciepłowniczym w sezonie 1994/95 (rys. 5.58., 5.64.) wykazują wpływ przyjętego wykresu regulacyjnego na wielkość strumienia wody sieciowej jaka musi dopłynąć do węzła. W połowie sezonu ogrzewczego nastąpiła zmiana obliczeniowych parametrów pracy systemu ciepłowniczego (przejście z wykresu regulacyjnego z jednym punktem załamania na wykres o dwu punktach załamania). Wywołało to zmniejszenie strumienia wody sieciowej dopływającej do poszczególnych węzłów ciepłowniczych – w przypadku SW-0: o 22%, SW-5: o 12%.

Zaznaczony obszar M na rysunku 5.65. przedstawia zaburzenia przepływu wody sieciowej do węzła wywołane przeprowadzanymi pracami modernizacyjnymi w obszarze węzła SW-5.

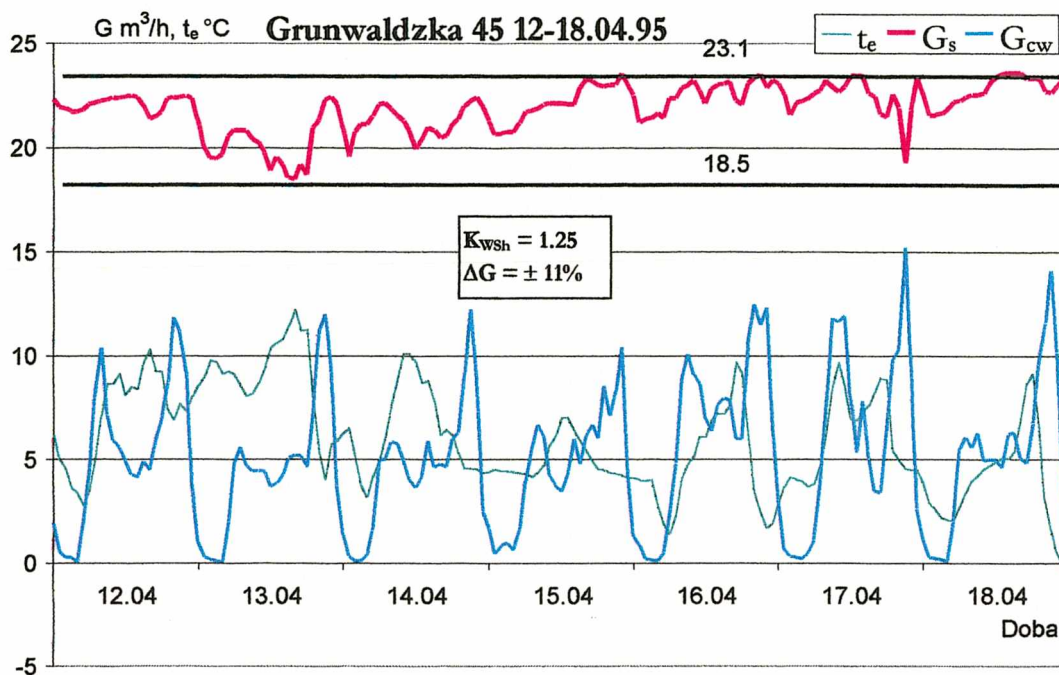
5.5.3.2. Eksploatacyjne wykresy godzinowej zmienności strumienia wody sieciowej

Na podstawie przedstawionych w punkcie 5.5.3.1 wyników badań pracy węzłów, można powiedzieć, że pełnoszeregowe węzły ciepłowniczych okresowo pracujące jako szeregowo-równoległe, ograniczają wielkość wahań dopływającego do nich strumienia wody sieciowej do ok. 20%. Powszechnie stosowane układy szeregowo-równoległe wywołują wahania ponad dwukrotnie większe.

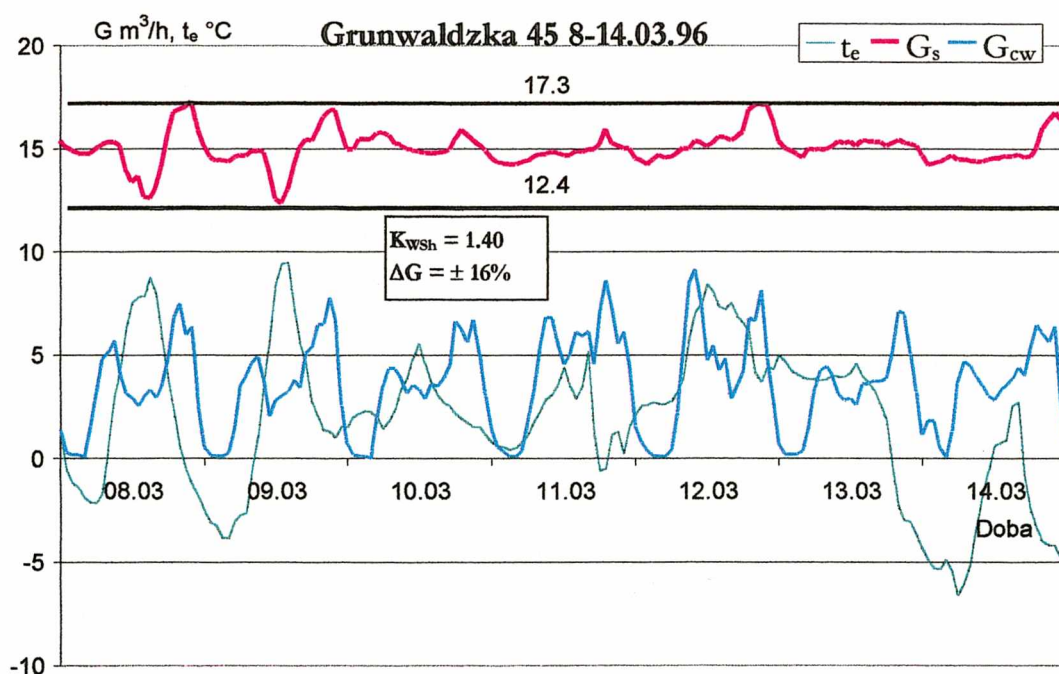
Obliczona wartość współczynnika dobowej nierównomierności strumienia wody sieciowej K_{Wsd} może być wskaźnikiem opisującym jakościowy standard dostawy ciepła do odbiorców. Decyduje ona również o jakościowej ocenie funkcjonowania węzła w całym sezonie ogrzewczym, a więc i o wpływie danego rozwiązania konstrukcyjnego na pracę całego systemu ciepłowniczego.

Jednak dokładna ocena charakteru pracy wymaga uwzględnienia wpływu chwilowego jego obciążenia cieplnego na dynamikę zmian strumienia wody sieciowej jaka do niego dopływa. Ocenę tą można przeprowadzić w postaci godzinowej nierównomierności przepływu wody sieciowej opisanej przez godzinowy współczynnik nierównomierności wody sieciowej K_{WSh} .

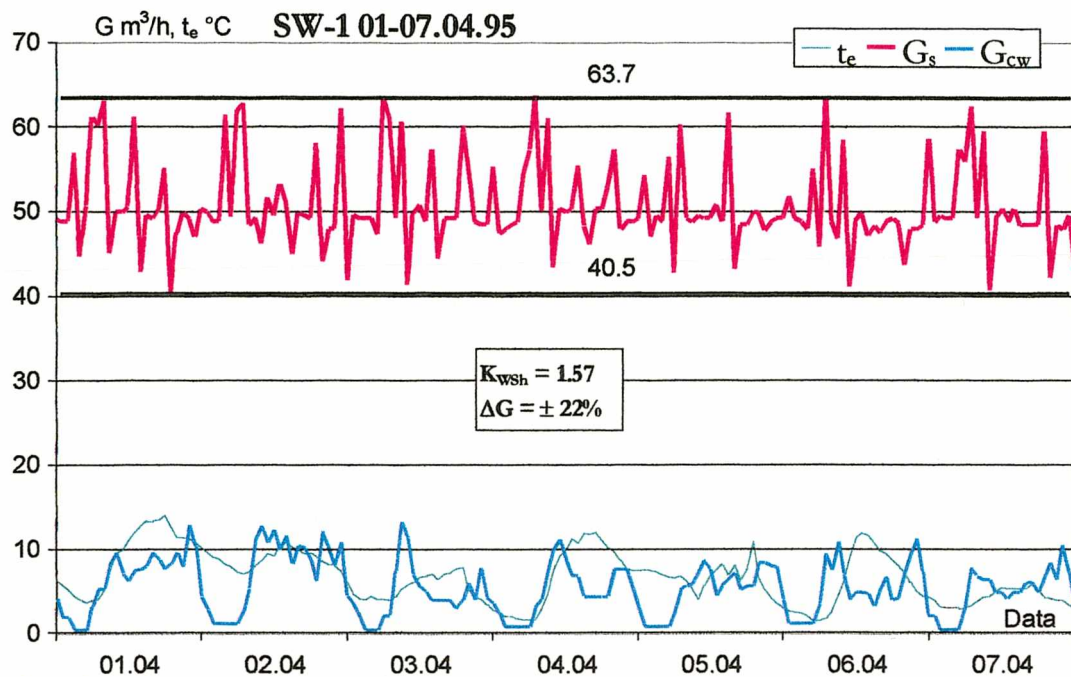
Zamieszczone na rysunkach 5.66.÷5.74. wykresy przedstawiają eksploatacyjne, godzinowe wahania strumienia wody sieciowej G_s wywołane zmianą temperatury zewnętrznej t_e i poboru c.w.u. G_{cw} , w wybranych tygodniowych okresach pracy poszczególnych węzłów ciepłowniczych. Zaznaczono na nich także granice zmian strumienia wody sieciowej i obliczono wielkość współczynników K_{WSh} .



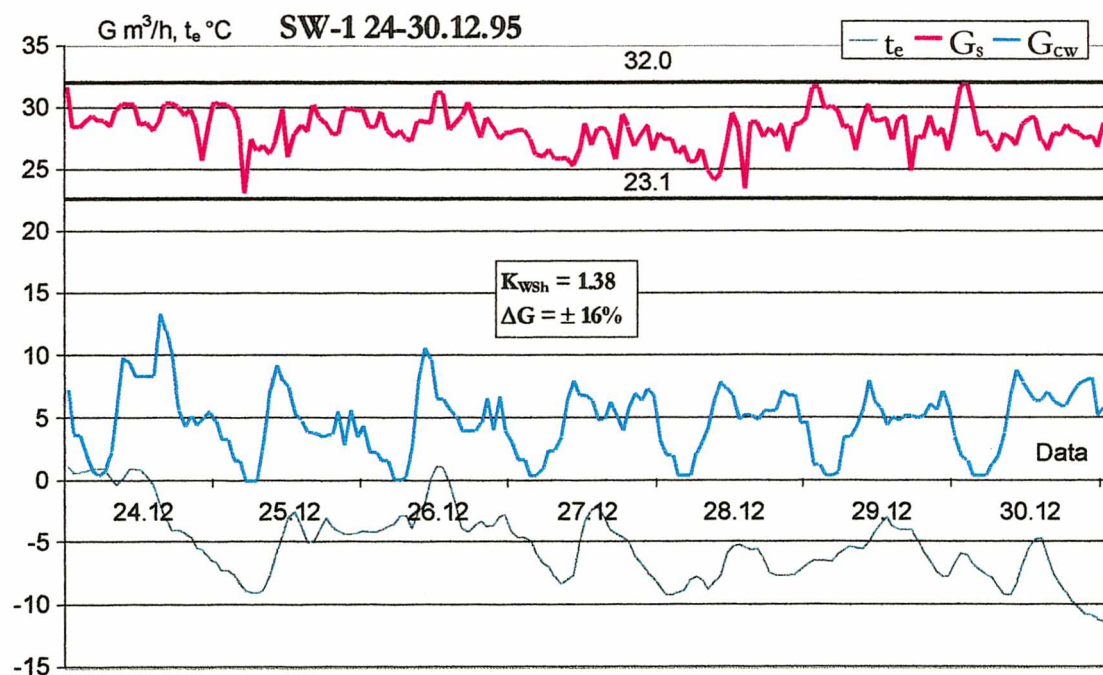
Rys. 5.66. Godzinowa nierównomierność strumienia wody sieciowej w dniach
 12÷18.04.1995 w węźle Grunwaldzka 45.



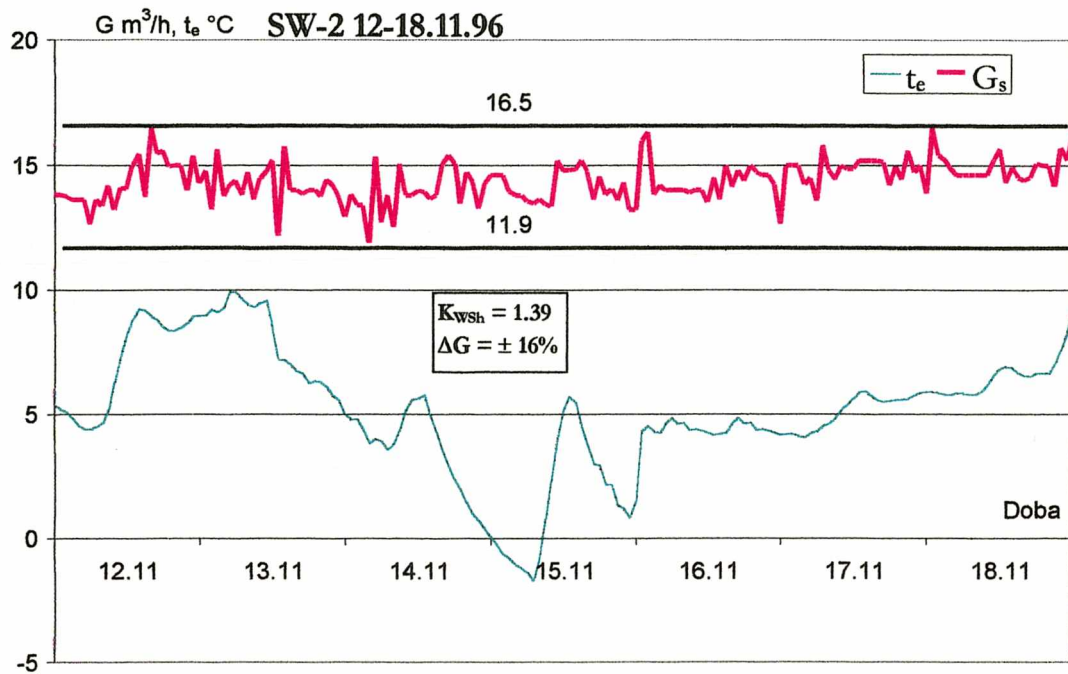
Rys. 5.67. Godzinowa nierównomierność strumienia wody sieciowej w dniach
 8÷14.03.1996 w węźle Grunwaldzka 45.



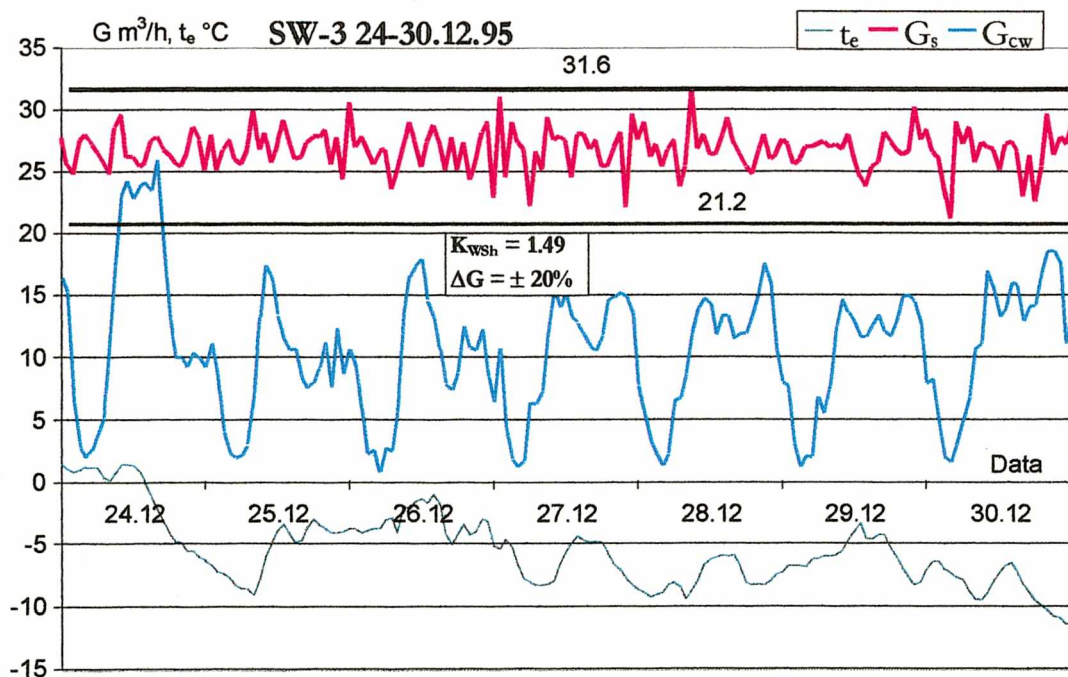
Rys. 5.68. Godzinowa nierównomierność strumienia wody sieciowej w dniach
 1÷7.04.1995 w węźle SW-1.



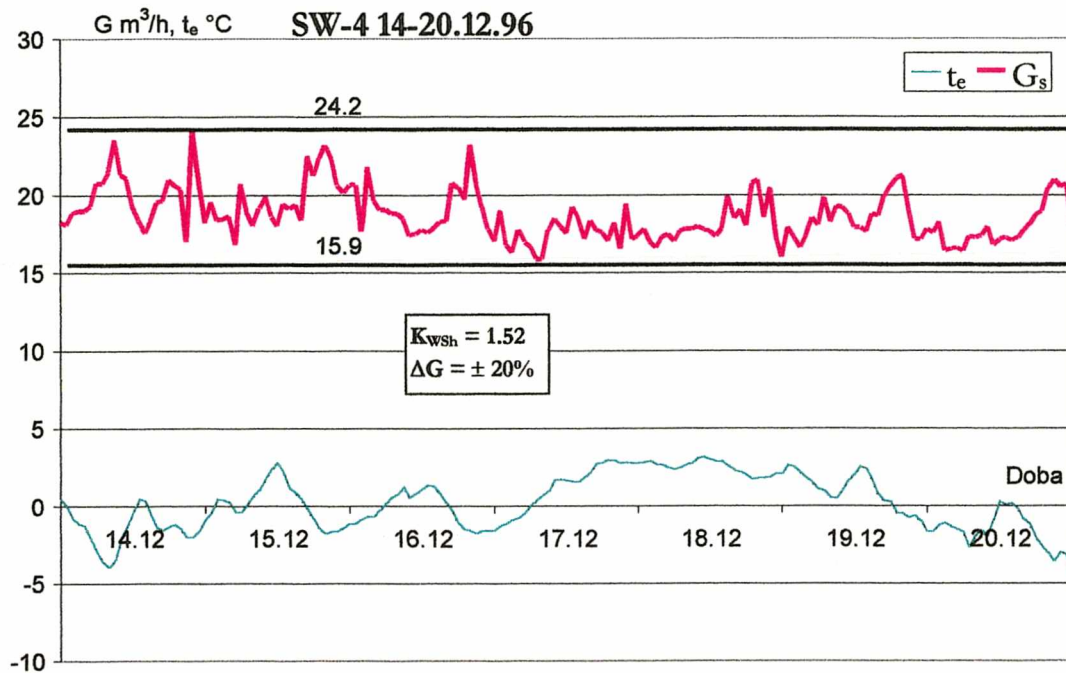
Rys. 5.69. Godzinowa nierównomierność strumienia wody sieciowej w dniach
 24÷30.12.1995 w węźle SW-1.



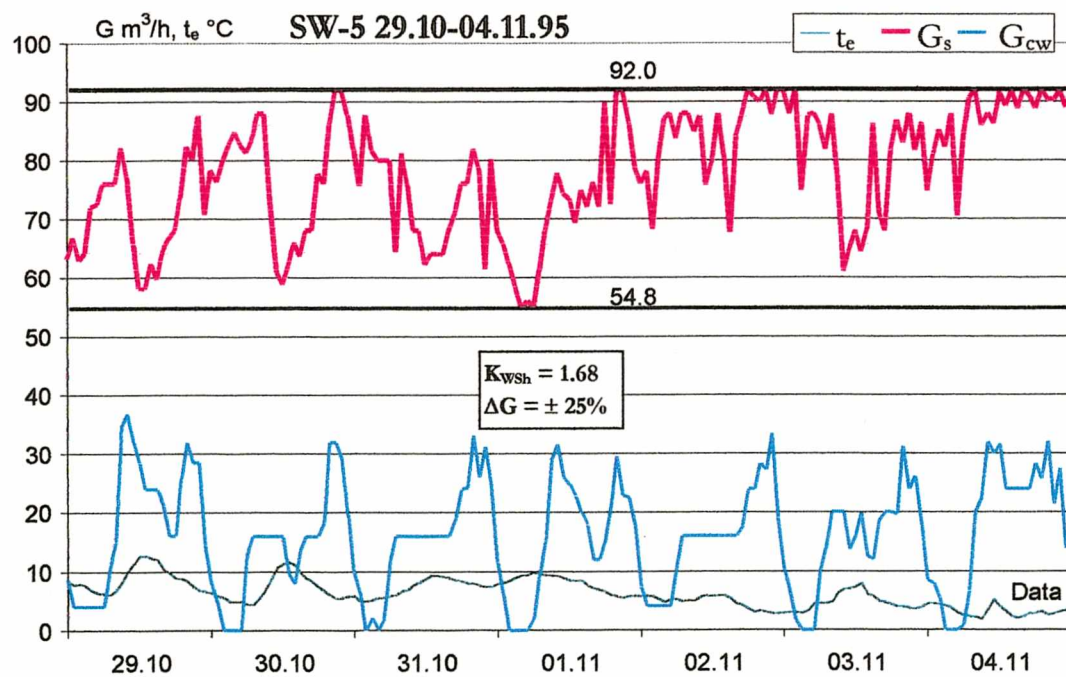
Rys. 5.70. Godzinowa nierównomierność strumienia wody sieciowej w dniach
 12÷18.11.1996 w węźle SW-2.



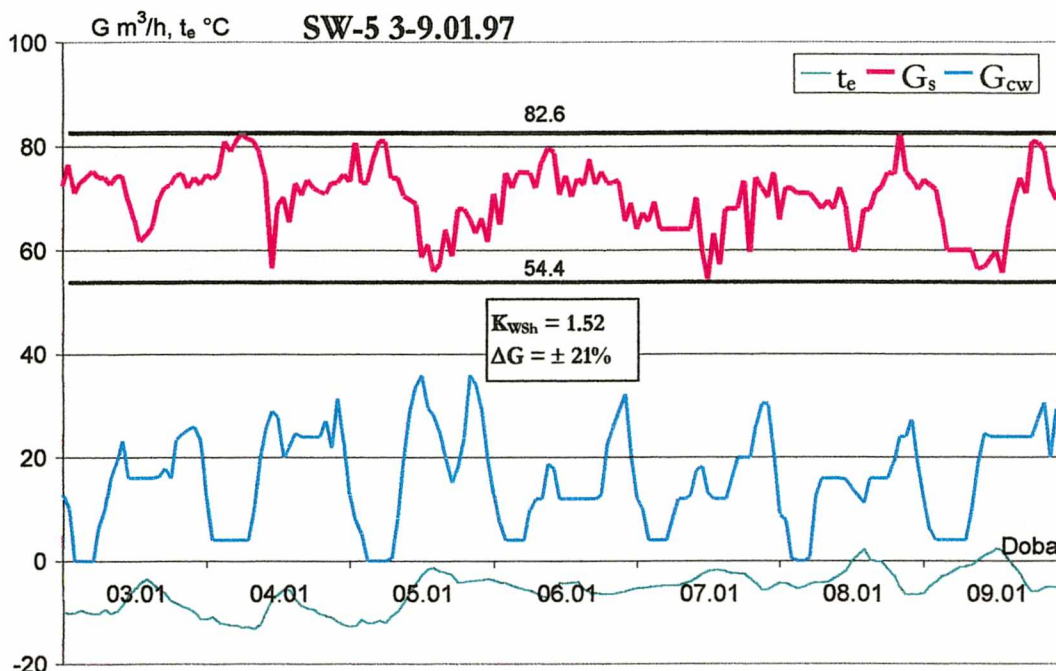
Rys. 5.71. Godzinowa nierównomierność strumienia wody sieciowej w dniach
 24÷30.12.1995 w węźle SW-3.



Rys. 5.72. Godzinowa nierównomierność strumienia wody sieciowej w dniach
 14÷20.12.1996 w węźle SW-4.



Rys. 5.73. Godzinowa nierównomierność strumienia wody sieciowej w dniach
 29.10÷4.11.1995 w węźle SW-5.



Rys. 5.74. Godzinowa nierównomierność strumienia wody sieciowej w dniach
3÷9.01.1997 w węźle SW-5.

Prezentowane wykresy zostały sporządzone w oparciu o uśrednienie pomiarów przepływów i temperatury, rejestrowanych z częstością piętnastominutową. Pozwoliło to na dokładne przedstawienie dynamiki zmian przepływu wody sieciowej wywołanej godzinową zmianą parametrów temperatury zewnętrznej i poboru ciepłej wody użytkowej. Jest to wyraźna odpowiedź układu automatycznej regulacji węzła na czynniki zakłócające stabilność jego pracy. Przedstawione w tej postaci wyniki badań eksploatacyjnych świadczą więc o charakterze procesów hydrauliczno-ciepłnych zachodzących w obrębie dwufunkcyjnych węzłów o zmodyfikowanej konstrukcji.

Prezentowane wykresy sporządzono dla zakresu występujących zmian temperatur zewnętrznych ($-12 \div +12^{\circ}\text{C}$), kładąc jednak główny nacisk na obszary, w których oscylowała ona w przedziale od $+5 \div +12^{\circ}\text{C}$. Zgodnie z przedstawionymi wykresami teoretycznymi (rys. 5.56÷5.65. – wykresy a) jest to strefa, w której dynamika zmian poboru c.w.u. ma największy wpływ na wielkość

wahania strumienia wody sieciowej dopływającej do węzła. Możliwe jest tu też wystąpienie priorytetu ciepłej wody użytkowej.

Na podstawie uzyskanych wyników badań, obserwuje się (zgodnie z przypuszczeniami) niewielkie zwiększenie wartości współczynnika nierównomierności strumienia wody sieciowej K_{WSH} w stosunku do jego dobowego odpowiednika. Wartość wahań strumienia wody sieciowej ΔG dla prezentowanych przykładów zmienia się w przedziale od 11 do 25%. Uwidacznia się też wyraźnie proces ograniczenia maksymalnego strumienia wody sieciowej $G_s^{\max}$ jaki dopływa do węzła w przypadkach zbieżności wysokiej temperatury zewnętrznej i dużego poboru ciepłej wody użytkowej.

W przypadkach występowania niskich temperatur zewnętrznych wielkość zmian strumienia wody sieciowej pozbawiona jest wyraźnych ekstremów (rys. 5.69., 5.71.). Obserwuje się tu jednak oscylację strumienia wody sieciowej wokół wartości obliczeniowej, jako wynik ciągłego działania zaworów automatycznej regulacji.

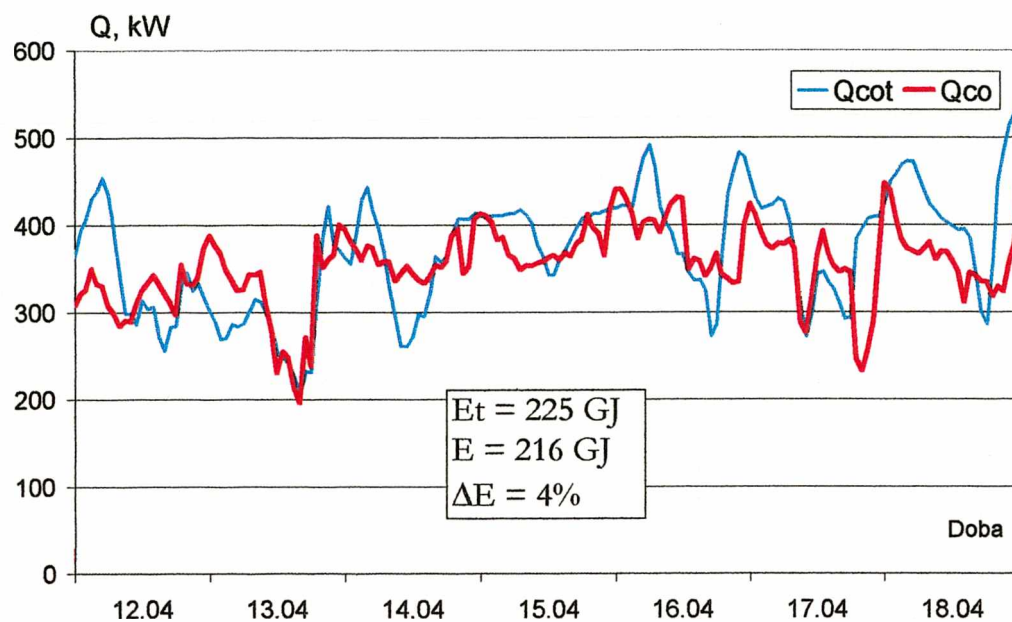
Godzinowe wykresy zmian strumienia wody sieciowej dopływającego do badanych zmodyfikowanych węzłów ciepłowniczych informują także o poprawności pracy urządzeń rejestrujących (wodomierz W1 z nadajnikiem impulsów). Wykluczają one w przypadku węzła SW-3 (rys. 5.71.) dopuszczone wcześniej ewentualne błędy rejestracji.

5.5.3.3. Bilans cieplny układu centralnego ogrzewania

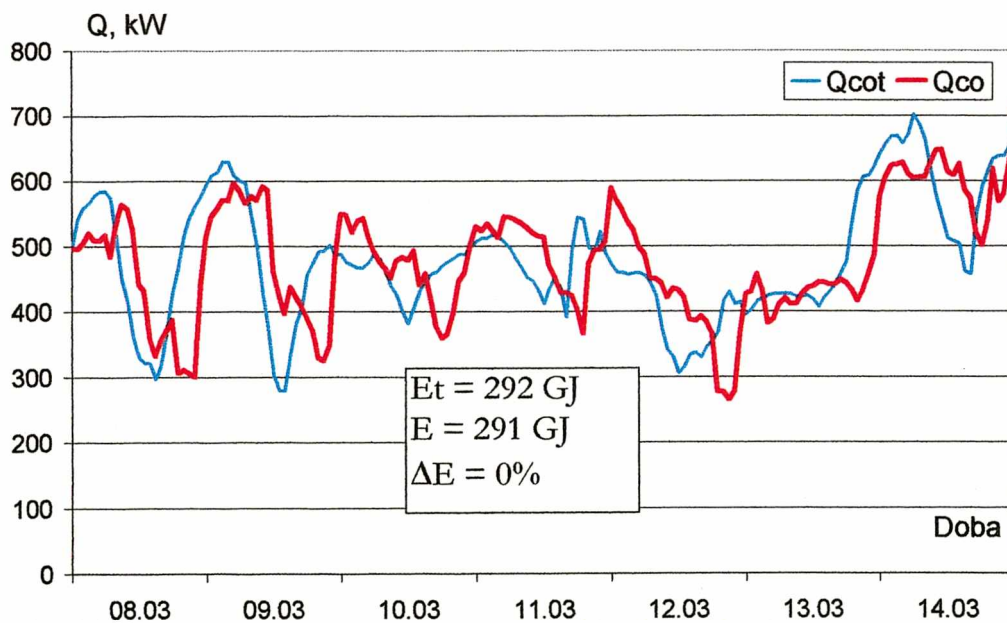
Zapewnienie bilansu cieplnego ogrzewanych budynków jest jednym z podstawowych warunków poprawności pracy węzła ciepłowniczego. Praca urządzeń automatycznej regulacji nastawionych na minimalizację wahań strumienia wody sieciowej może powodować niedotrzymywanie wymaganych parametrów pracy układu centralnego ogrzewania.

Na zamieszczonych wykresach (rys. 5.78.÷5.75.) przedstawiono porównanie teoretycznego zapotrzebowania ciepła do c.o. (odpowiadające określonej temperaturze zewnętrznej) z rzeczywistą mocą cieplną (wg pomiarów) pobieraną

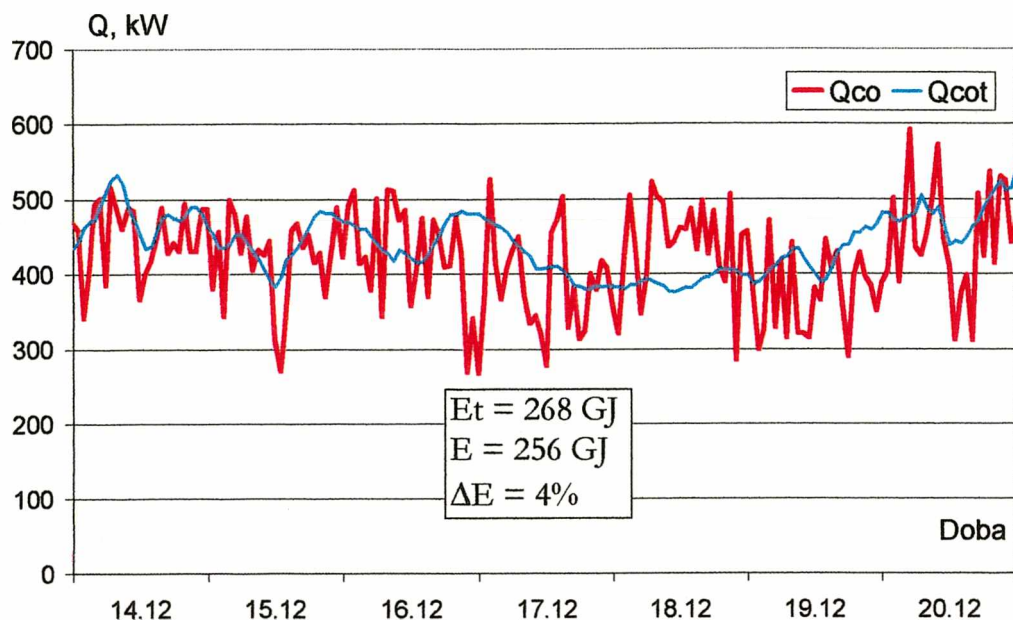
przez układ centralnego ogrzewania. Zaznaczono na nich również wielkość teoretyczną i rzeczywistą zużycia ciepła.



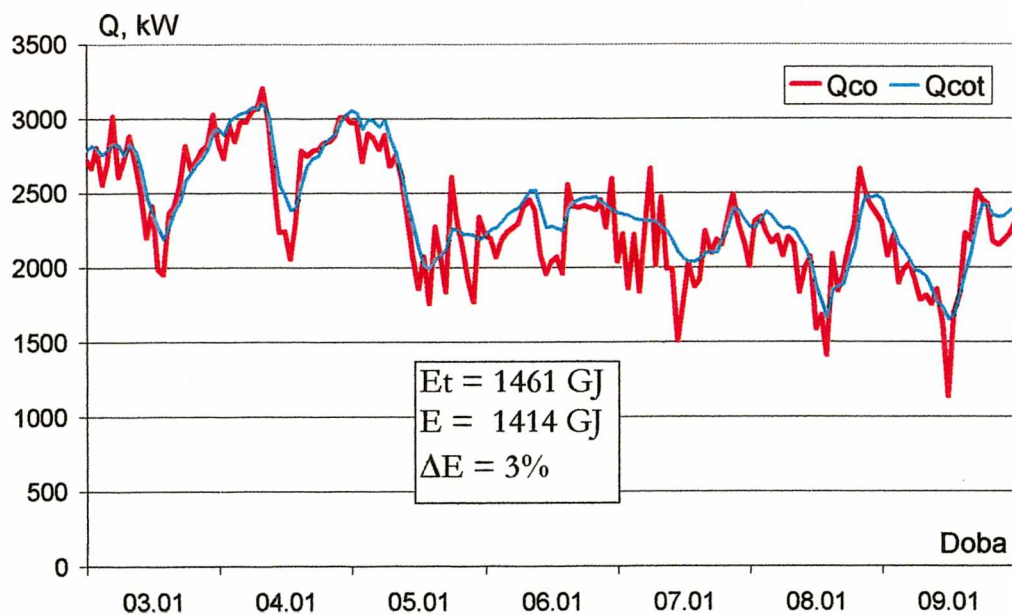
Rys. 5.75. Bilans cieplny układu c.o. węzła Grunwaldzka 45 w okresie 12-18.04.1995.



Rys. 5.76. Bilans cieplny układu c.o. węzła Grunwaldzka 45 w okresie 8-14.03.1996.



Rys. 5.77. Bilans cieplny układu c.o. węzła SW-4 w okresie 14-20.12.1996.



Rys. 5.78. Bilans cieplny układu c.o. węzła SW-5 w okresie 3-9.01.1997.

Uzyskane wyniki badania zapotrzebowania ciepła od strony układów centralnego ogrzewania w okresie jednego tygodnia wykazują, w przypadku przedstawionych węzłów i pomimo wzajemnego przesunięcia chwilowych potrzeb cieplnych, dokładne ich bilansowanie. Wykazana niewielka różnica jest rzędu klasy pomiarowej zastosowanych wodomierzy. Obserwowane przesunięcia pomiędzy wykresami teoretycznymi a rzeczywistymi wynikają ze skierowania części strumienia wody sieciowej z układu c.o. do układu c.w.u. w przypadkach zwiększonego poboru ciepłej wody.

6. Teoretyczny model zmodyfikowanego węzła ciepłowniczego

6.1. Problem matematycznego modelowania procesów w węźle ciepłowniczym

Praca nowoczesnego węzła ciepłowniczego oparta jest o tzw. algorytm sterowania. Urządzeniami wykonawczymi są głównie zawory automatycznej regulacji, a układami nadrzędnymi – regulatory elektroniczne i komputery. Analiza funkcjonowania tak wysoce zautomatyzowanego układu hydraulicznego wymaga przeprowadzania wielu długich i żmudnych badań na obiektach rzeczywistych. Prowadzi to, poza oceną jakościową ich pracy, do określenia pewnych podstawowych założeń projektowych, które mogłyby być przenoszone na inne układy. Należy jednak wyraźnie zaznaczyć fakt, iż w systemach ciepłowniczych ze względu na duże zróżnicowanie struktur i różnorodność warunków pracy każdy węzeł jest inny. W tej sytuacji niezbędnym wydaje się być stworzenie modelu teoretycznego umożliwiającego całościową analizę pracy węzła ciepłowniczego i pozwalającego na jego projektowanie.

Węzeł ciepłowniczy nie jest układem niezależnym. Należy rozpatrywać go jako system złożony z:

- układów automatycznej regulacji w obrębie węzła,
- wymienników i zasobników ciepłej wody użytkowej,
- instalacji centralnego ogrzewania,
- instalacji ciepłej wody użytkowej i cyrkulacyjnej,
- sieci ciepłowniczej,
- klimatycznych warunków zewnętrznych.

Opisanie zjawisk cieplno-hydraulicznych zachodzących w obrębie zautomatyzowanego dwufunkcyjnego węzła ciepłowniczego bez wprowadzenia uproszczeń byłoby niezwykle trudnym zadaniem. Oczywiście, przyjęty stopień uproszczenia decydować będzie o dokładności otrzymanego modelu.

Ze względu na różnorodność zjawisk wymiany ciepła i zachodzących procesów hydraulicznych wydaje się być możliwym podzielenie całościowego problemu ich modelowania. Powstaną podmodele symulujące poszczególne procesy zachodzące w systemie jakim jest dwufunkcyjny węzeł ciepłowniczy. Dotyczyć więc one mogą np.:

- obliczenia strumieni i temperatur wody sieciowej w charakterystycznych punktach węzła,
- działania zaworów automatycznej regulacji,
- zmian temperatury zewnętrznej,
- mocy cieplnej instalacji c.o.
- bezwładności cieplnej ogrzewanych budynków,
- poboru ciepłej wody użytkowej,
- wymiany ciepła w wymiennikach ciepłej wody użytkowej,
- ładowania zasobników wody ciepłej,
- działania instalacji cyrkulacyjnej.

Ważnym zagadnieniem staje się wtedy problem powiązań i zależności między poszczególnymi podmodelami.

Przyjęta modułowa budowa teoretycznego modelu dwufunkcyjnego węzła ciepłowniczego pozwala na jego niemal swobodne komplikowanie w miarę potrzeb i matematycznych zdolności opisujących zachodzące zjawisko. Jako moduł podstawowy, do którego dołączane byłyby pozostałe, proponuje się przyjąć podmodel opisujący zjawiska cieplno-hydrauliczne występujące w obrębie węzła wraz z częścią uwzględniającą funkcjonowanie zaworów automatycznej regulacji.

6.2. Model zjawisk cieplnych i hydraulicznych

Przed przystąpieniem do matematycznego opisu zależności zachodzących w obrębie zmodyfikowanego węzła ciepłowniczego proponuje się przyjęcie następujących założeń upraszczających:

- wszystkie procesy zachodzące w obszarze dwufunkcyjnego węzła ciepłowniczego z racji bardzo szybkich zmian mogą być uważane jako bezinercyjne,
- wymiana ciepła w wymiennikach c.w.u. i w układzie centralnego ogrzewania odbywa się w stanie ustalonym,
- duża akumulacyjność ogrzewanych budynków powoduje nieskończone opóźnienie odpowiedzi na sygnały zakłócające,
- straty ciepła przez przewody i urządzenia w węźle są pomijalne.

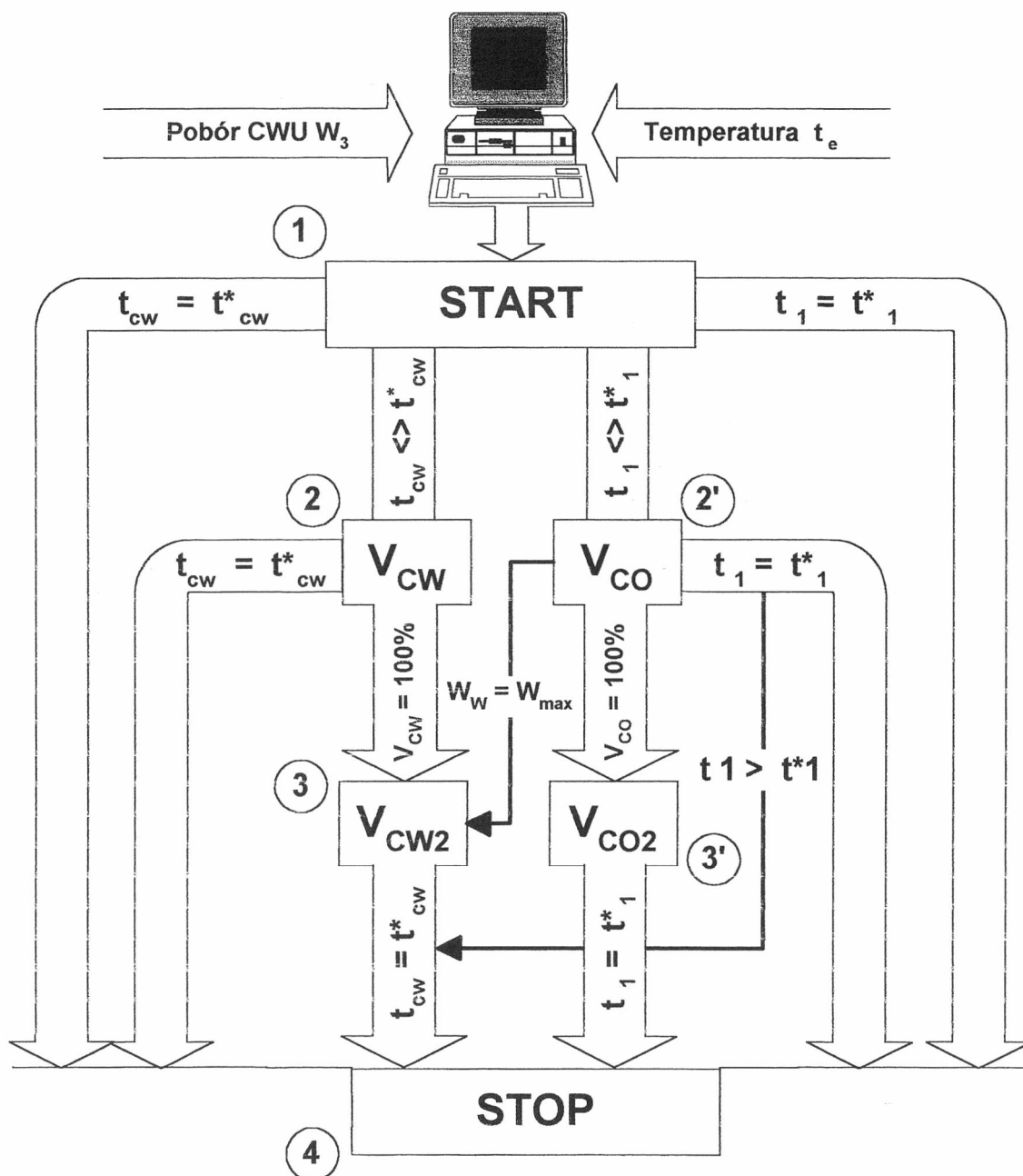
Dla tak przyjętych uproszczeń podmodel, symulujący procesy cieplno-hydrauliczne w pełnoszeregowym węźle ciepłowniczym z możliwością okresowej pracy w układzie szeregowo-równoległym, będzie opisywany bilansowymi równaniami zamieszczonymi w punkcie 5.2.2. i 5.2.3.

6.3. Model działania układu zaworów automatycznej regulacji

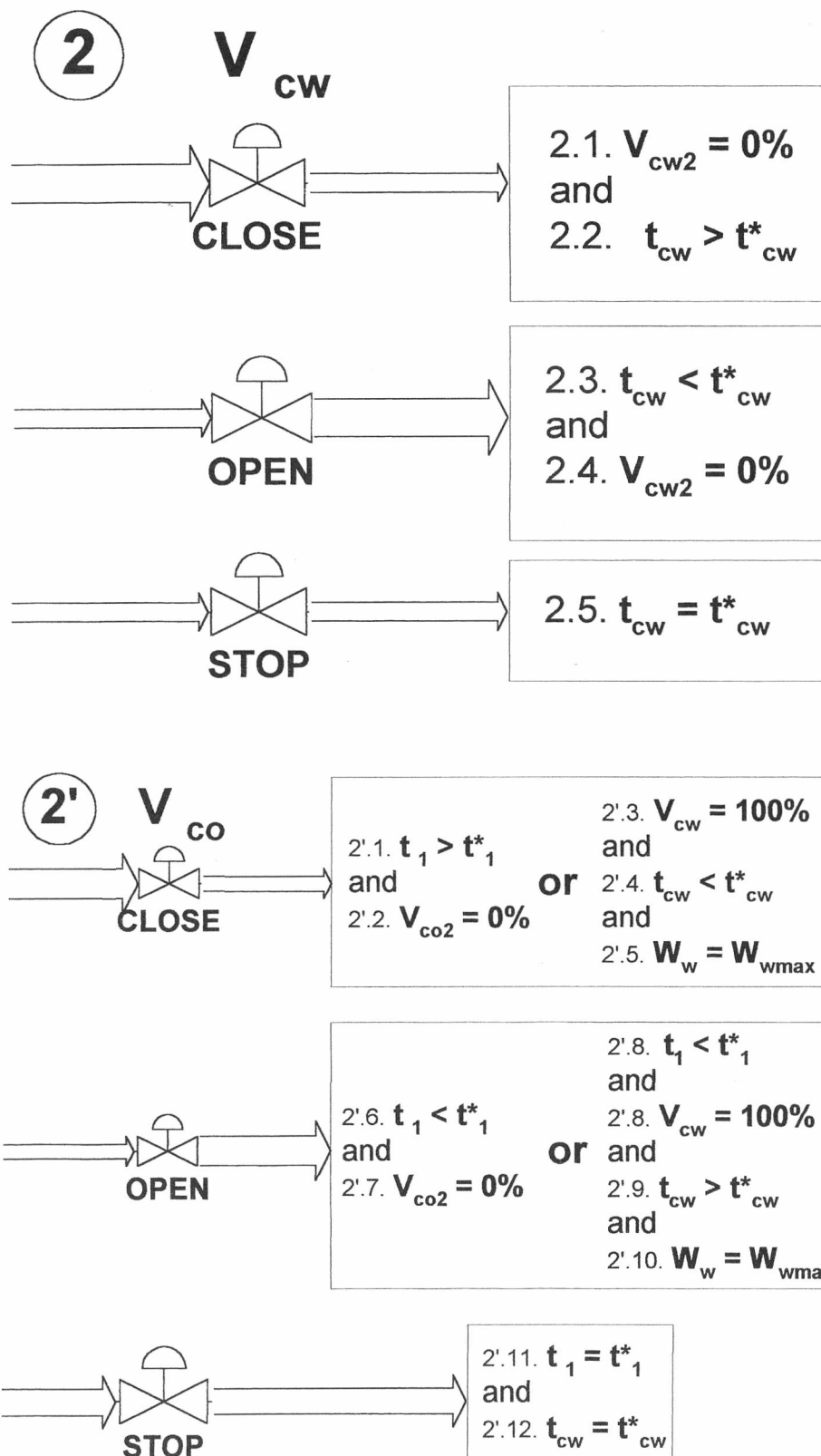
Na podstawie przedstawionych w punkcie 2.2.1. funkcji zaworów automatycznej regulacji oraz zgodnie z opisem analizy pracy węzła ciepłowniczego (p.2.3) opracowano matematyczne zależności warunkujące działanie poszczególnych zaworów. Dopuszczalne jest wstępne przyjęcie bezinercyjnej ich pracy, jako założenia upraszczającego.

Rysunek 6.1. przedstawia graf działania zaworów automatycznej regulacji zmodyfikowanego węzła ciepłowniczego. Zaznaczono na nim wartości sygnałów, wywołanych czynnikami zakłócającymi w postaci zmiennego poboru c.w.u. lub zmian temperatury zewnętrznej, kierowanymi do poszczególnych zaworów. Praca zaworów V_{CW} i V_{CW2} oraz V_{CO} i V_{CO2} jest sekwencyjna.

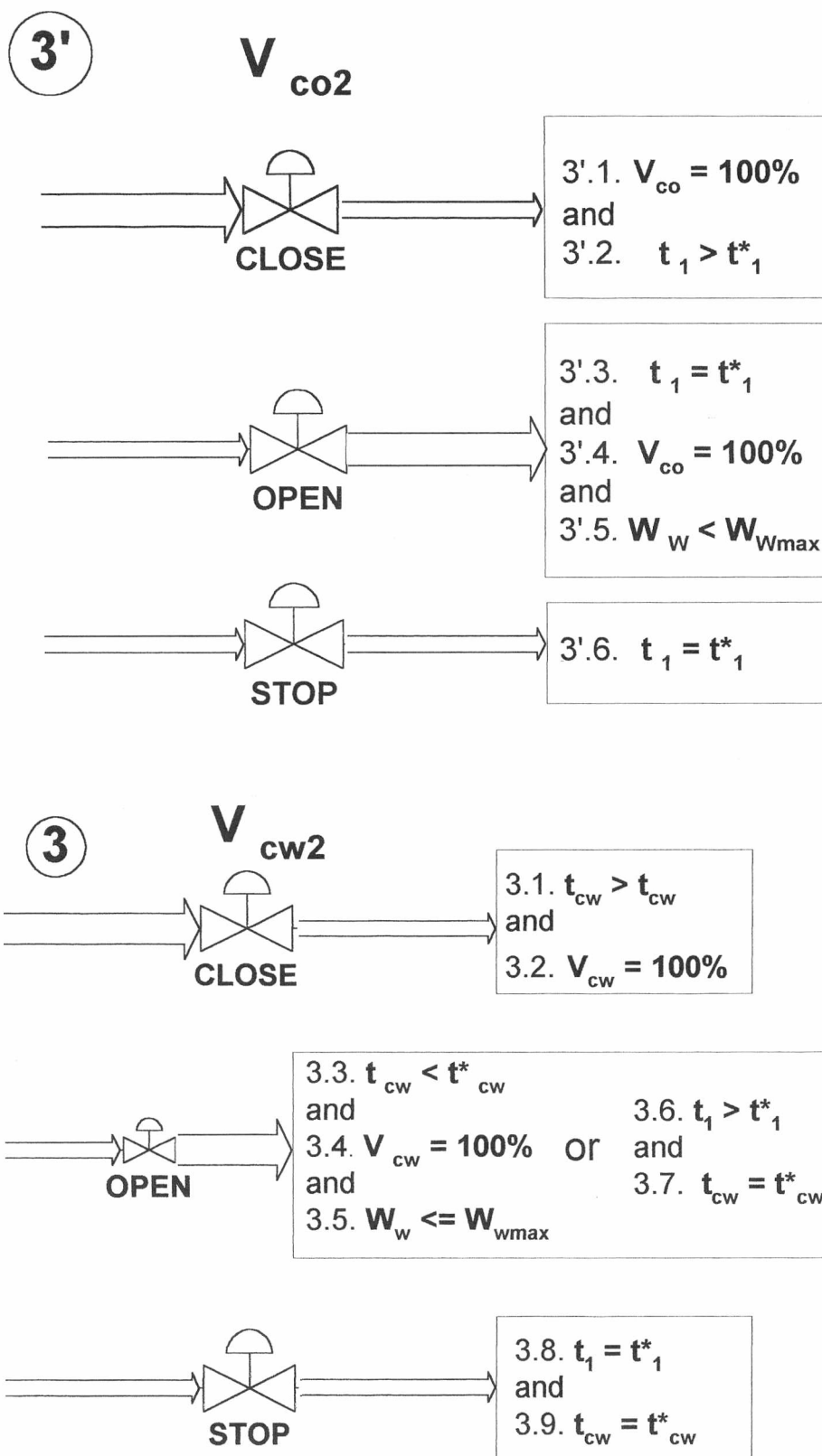
Natomiast rysunki 6.2. i 6.3. przedstawiają matematyczne zależności określające chwilowy stan ich pracy.



Rys. 6.1. Graf działania zaworów automatycznej regulacji.



Rys. 6.2. Matematyczne zależności stanu zaworów automatycznej regulacji.



Rys. 6.3. Matematyczne zależności stanu zaworów automatycznej regulacji.

Przyjęte oznaczenia:

t_{cw}^* – zadana temperatura ciepłej wody,

t_{cw} – chwilowa temperatura ciepłej wody,

t_1^* – temperatura wody zasilającej instalację c.o. wynikająca z wykresu regulacyjnego dla danej temperatury zewnętrznej t_e ,

t_1 – chwilowa temperatura wody zasilającej instalację c.o.,

W_{Wmax} – maksymalny strumień wody sieciowej jaki może dopłynąć do węzła,

W_w – chwilowy strumień wody sieciowej dopływający do węzła,

CLOSE – zamykanie zaworu,

OPEN – otwieranie zaworu,

STOP – stan bezruchu,

100% - zawór całkowicie otwarty,

0% - zawór całkowicie zamknięty.

7. Podsumowanie i wnioski

Badania węzłów ciepłowniczych o zmodyfikowanej konstrukcji udowodniły postawioną w pracy tezę. Pełnoszeregowy węzeł ciepłowniczy, okresowo pracujący jako szeregowo-równoległy, powoduje znaczne zmniejszenie nierównomierności pobieranego strumienia wody sieciowej. Wykazuje bowiem dwukrotnie mniejszy zakres tej nierównomierności od występującego w powszechnie stosowanych węzłach szeregowo-równoległych.

Wprowadzone pojęcia współczynnika dobowej i godzinowej nierównomierności strumienia wody sieciowej pozwalają dość jednoznacznie oceniać jakość dostarczania ciepła do odbiorców. Mogą być porównywane z obowiązującymi standardami jakościowymi obsługi odbiorców. Stanowią także o wpływie przyjętej konstrukcji węzła, na zdolność kompensowania dynamiki poboru ciepłej wody użytkowej i zmienność temperatury powietrza zewnętrznego.

Badania poboru ciepłej wody użytkowej w cyklach dobowych i rocznych, potwierdziły znaczne obniżenie konsumpcji c.w.u. wskutek indywidualnego opomiarowania odbiorców. Jednostkowe wskaźniki poboru wody ciepłej są zdecydowanie mniejsze od zalecanych do projektowania przez naszą normę [34]. Uwidocznily się również zmiany w charakterze poboru wody ciepłej wywołane sukcesywnym wprowadzaniem wodomierzy mieszkaniowych. W początkowych okresach, tuż po zamontowaniu wodomierzy, następuje gwałtowne obniżenie zużycia ciepłej wody (sięgające do 20%), po czym następuje niewielki (do 3%) wzrost jej konsumpcji.

Obserwuje się zdecydowane różnice w dobowym charakterze poboru c.w.u. Innym przebiegiem i zużyciem cechują się dni robocze, soboty i niedziele. Ze względu na podobieństwo w charakterze poboru c.w.u. w dniach roboczych możliwe jest wprowadzenie dnia roboczego, jako pojęcia zastępczego, przedstawiającego zużycie wody w tych dniach.

Największa konsumpcja wody ciepłej występuje w dniach wolnych od pracy i jest o ok. 15÷20% większa niż w dniu powszednim. Natomiast największą zmiennością poboru charakteryzują się dni robocze, a najmniejszą soboty.

Zwiększony pobór ciepłej wody w dniach wolnych od pracy wymaga dostarczenia do węzłów c.w.u. większych strumieni energii cieplnej. Nie powoduje to jednak zwiększenia obciążeń cieplnych systemu ciepłowniczego, który jest w tych dniach odciążony przez przemysł i obiekty użyteczności publicznej. Można więc przyjąć, że układy c.w.u. działają wówczas łagodząco na zmiany strumienia wody sieciowej krążącej w całym systemie ciepłowniczym.

Przeprowadzone w kilku sezonach ogrzewczych badania nierównomierności poboru strumienia wody sieciowej przez węzły wykazały:

- wpływ przyjętego wykresu regulacyjnego na wielkość wahań strumienia wody sieciowej,
- nieznaczną amplitudę wahań strumienia wody sieciowej wynoszącą $\pm 14\div 18\%$; odpowiada to zmianie współczynnika dobowej nierównomierności strumienia wody sieciowej K_{wsd} w granicach 1,33÷1,45,
- pracę węzłów o niewielkich udziałach ciepłej wody A_{cw} i dużym współczynniku akumulacyjności φ bez priorytetu c.w.u.,
- zgodność założeń teoretycznych z wynikami eksploatacyjnymi.

Obserwowane zmiany strumienia wody sieciowej w badanych węzłach nie przekraczają 20% ($K_{wsd}=1,50$). Dla obecnie stosowanych węzłów szeregowo-równoległych rzadko wartość ta jest mniejsza od 43% ($K_{wsd}=2,5$). Obowiązujące standardy jakościowe obsługi odbiorców, tę wielkość ograniczają do 5% ($K_{wsd}=1,11$). Świadczy to o rozbieżności między przepisami i rzeczywistością, która powoduje konieczność negocjowania umów między dostawcą i odbiorcą ciepła.

7.1. Wnioski o charakterze poznawczym

- 1) Uzyskane współczynniki nierównomierności poboru ciepłej wody odbiegają od wartości podawanych przez Polską Normę [34] o 20÷50%; większy błąd występuje w przypadku większej liczby odbiorców.
- 2) Wyniki badań poboru ciepłej wody użytkowej podważają celowość stosowania dotychczasowych wartości wskaźników jednostkowego jej zużycia. Określenie jednak wskaźników obliczeniowych wymaga rozwiązania problemu dni specyficznych (m.in. Wielka Sobota, Wigilia, Sylwester), w których pobór wody jest 2÷3 razy większy niż w pozostałych dniach.
- 3) Zmiana obciążenia cieplnego węzła, wywołana zwiększonym poborem c.w.u., kompensowana jest przez:
 - skierowanie części strumienia wody sieciowej z c.o. do c.w.u. (realizacja priorytetu c.w.u.),
 - pracę węzła w układzie szeregowo-równoległym (w okresie przejściowym).
- 4) W okresie czterech sezonów ogrzewczych, od 1994 do 1998, podczas których badano węzły będące przedmiotem niniejszej pracy, nie obserwowano temperatur zewnętrznych zbliżonych do obliczeniowych. Najniższe temperatury zewnętrzne (w granicach $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) utrzymywały się przez kilka dni w całym okresie badawczym. Stanowi to ok. 1,5% tego okresu, co potwierdza dyskutowaną ewentualną możliwość zmiany na wyższe obliczeniowych temperatur powietrza zewnętrznego.
- 5) Budynki mieszkalne wybudowane przed rokiem 1990 (wysokie zapotrzebowanie ciepła na ogrzewanie) charakteryzują się obecnie małymi wartościami udziału ciepłej wody użytkowej.

7.2. Wnioski o charakterze użytkowym

- 1) Stabilizację strumienia pobieranej przez węzeł wody sieciowej należy przekładać na pracę całego systemu ciepłowniczego. Udział ciepłej wody w pojedynczym węźle, wpływający na zmianę chwilowego zapotrzebowania na ciepło, jest znacznie większy niż dla całego systemu ciepłowniczego. Zapewniając stabilność strumienia wody sieciowej w węźle, zapewnia się jego niezmiennosc w całym systemie, a przez to np. pracę kotłów o długich stałych czasowych.
- 2) Przeprowadzone analizy pracy dwufunkcyjnych węzłów ciepłowniczych o zmodyfikowanej konstrukcji wykazują, jak ważnym zagadnieniem jest poprawne określenie udziału ciepłej wody A_{cw} i przyjęcie odpowiedniej akumulacyjności węzła ϕ . Zbyt duże zasobniki wody ciepłej, choć znacznie łagodzą wpływ dynamiki poboru c.w.u. na wahania strumienia wody sieciowej, to ograniczają możliwość pracy dwufunkcyjnego węzła z wykorzystaniem funkcji priorytetu c.w.u. Uzyskuje się, co prawda, stabilizację przepływu wody sieciowej w węźle, lecz przy bardzo wysokich kosztach inwestycyjnych, których można uniknąć.
- 3) Zaproponowany matematyczny model procesów cieplnych i hydraulicznych zachodzących w pełnoszeregowym węźle ciepłowniczym z możliwością okresowej pracy jako szeregowo-równoległy pozwala na przeanalizowanie jego pracy na etapie projektowania. Przed zastosowaniem opracowanego modelu konieczna jest jego weryfikacja na podstawie eksploatacyjnych pomiarów parametrów w rzeczywistych obiektach.

Literatura

- [1] **Antoniewicz B., Koczyk H.** – Problemy modernizacji instalacji c.w.u. w wielorodzinnych budynkach mieszkaniowych. *Ogrzewnictwo Praktyczne* nr 2/96 s.5÷10.
- [2] **Becker B. R., Stogsdill K. E.** – A domestic hot water use database. *ASHRAE Journal* 9/1990.
- [3] **Chybowski B.** – Instalacje ciepłej wody użytkowej. *Arkady, Warszawa* 1973.
- [4] **Cieślukowski R.,...** – Badania eksploatacyjne węzła kompaktowego z priorytetem c.w.u. w systemie ciepłowniczym miasta Szczecina. *Materiały Czwartej Krajowej Konferencji „Modernizacja miejskich systemów ciepłowniczych w Polsce”, Międzyzdroje, wrzesień 1995, s. 205÷213.*
- [5] **Cieślukowski R.,...** – Funkcja priorytetu c.w.u. w węźle cieplnym na podstawie wyników pomiarów. *Materiały Szóstej Krajowej Konferencji „Modernizacja miejskich systemów ciepłowniczych w Polsce”, Międzyzdroje, wrzesień 1997, s. 83÷87.*
- [6] **Cieślukowski R.,...** – Wpływ modernizacji węzła cieplnego i zamontowanych wodomierzy w budynku mieszkalnym na wielkość zużycia c.w.u. *Materiały Piątej Krajowej Konferencji „Modernizacja miejskich systemów ciepłowniczych w Polsce”, Międzyzdroje, 23-25 września 1996, s. 282÷286.*
- [7] **Dobrzański J., Mańkowski St.** – Centralne instalacje ciepłej wody użytkowej. Nowa technika w inżynierii sanitarnej. *Ogrzewanie i wentylacja* Nr 4. *Arkady, Warszawa* 1974r, str.75÷150.
- [8] **Dzierzgowski M., Rabjasz R.** – Weryfikacja potrzeb ciepłych budynków i jej wpływ na wymagane parametry pracy instalacji ogrzewczej i systemu ciepłowniczego w warunkach regulacji ilościowo-jakościowej. *Materiały Ósmej Krajowej Konferencji „III Forum Ciepłowników Polskich”, Międzyzdroje, wrzesień 1999, s.52÷59.*

- [9] **Fijewski M., Śnieżyk R.** – Wpływ sposobu dostawy ciepła do c.w.u. na koszty zaopatrzenia w ciepło budynków. *Katedra Klimatyzacji i Ciepłownictwa Politechniki Wrocławskiej. Raport serii SPR 27/98.*
- [10] **Glück B.** – Zustands- und Stoffwerte, Waser Dampf, Verbrennungsrechnung. *VEB, Verlag für Bauwesen. Berlin 1986.*
- [11] **Jeżowiecki J., Tiukało A.** – Modelowanie matematyczne poboru ciepłej wody użytkowej. *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej nr 43, seria: Monografie nr 25. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1984.*
- [12] **Juniewicz H., Śnieżyk R.** – Analiza metrologiczna pomiarów przepływu wody i ciepła w sieci ciepłowniczej. *Energetyka 1994 R. 48 nr 1 s.8–13.*
- [13] **Kierłańczyk T., Kotte G.** – Zasady doboru wielkości zasobników ciepła w miejskich systemach ciepłowniczych. *COW nr 6/1996, s.273÷297.*
- [14] **Koczyk H.** - Zużycie ciepła w wielorodzinnym budownictwie mieszkaniowym-prognozowanie a wyniki pomiarów. *Ogrzewnictwo Praktyczne nr 5/96 s. 5÷9.*
- [15] **Kwiatkowski J., Matwiejuk P.** – Badania zużycia wody w mieszkalnictwie opomiarowanym. *Materiały Czwartej Krajowej Konferencji „Modernizacja miejskich systemów ciepłowniczych w Polsce”, Międzyzdroje, wrzesień 1995, s.88÷94.*
- [16] **Mańkowski St.** - Projektowanie instalacji ciepłej wody użytkowej. *Warszawa Arkady 1981.*
- [17] **Mańkowski St.** – Moc zamówiona dla węzłów ciepłej wody użytkowej. *Materiały Ósmej Krajowej Konferencji „III Forum Ciepłowników Polskich”, Międzyzdroje, wrzesień 1999, s.119÷123.*
- [18] **Mańkowski St.** – Optymalizacja węzłów ciepłej wody użytkowej. *Nowa technika w inżynierii sanitarnej. Ogrzewanie i wentylacja Nr 2. Arkady, Warszawa 1972r, str.5÷85.*

- [19] **Mańkowski St.** – Pojemność zasobnika ciepłej wody użytkowej. *COW nr 8/1972, s. 240÷244.*
- [20] **Matwiejuk P.** – Obliczanie strumieni charakterystycznych poborów ciepłej wody użytkowej w instalacjach c.w.u. wyposażonych w wodomierze mieszkaniowe. *Materiały Ósmej Krajowej Konferencji „III Forum Ciepłowników Polskich”, Międzyzdroje, wrzesień 1999, s.124÷138.*
- [21] **Monitor Polski nr 35, poz. 336** – Zarządzenie Ministra Finansów z 9.06.1997 w sprawie ustalania cen urzędowych detalicznych energii cieplnej dostarczanej do mieszkań na cele bytowe.
- [22] **Nejranowski J., Szaflik W.** – Pobór ciepła na potrzeby centralnej ciepłej wody użytkowej w budynkach mieszkalnych wielorodzinnych. *Ogrzewnictwo Praktyczne nr 1/98, s.15÷19.*
- [23] **Nejranowski J., Szaflik W.** – Straty ciepła układów centralnej ciepłej wody użytkowej w budynkach mieszkalnych wielorodzinnych. *Materiały Szóstej Krajowej Konferencji „Modernizacja miejskich systemów ciepłowniczych w Polsce”, Międzyzdroje, wrzesień 1997, s.149÷154.*
- [24] **Nejranowski J., Szaflik W.** – Zmienność poboru ciepłej wody użytkowej w budynkach mieszkalnych wielorodzinnych wyposażonych w wodomierze mieszkaniowe. *Materiały Siódmej Krajowej Konferencji „II Forum Ciepłowników Polskich”, Międzyzdroje, wrzesień 1998, s.161÷169.*
- [25] **Nejranowski J., Szaflik W.** – Zmienność poboru ciepłej wody użytkowej w cyklu dobowym w budynkach mieszkalnych wielorodzinnych wyposażonych w wodomierze mieszkaniowe. *Materiały The 9-th International Conference „Air Conditioning & District Heating ‘98” Wrocław – Szklarska Poreba, s.377÷381.*
- [26] **Nejranowski J., Szaflik W.** – Zmienność poboru ciepłej wody użytkowej w cyklu rocznym w budynkach mieszkalnych wielorodzinnych wyposażonych w wodomierze mieszkaniowe. *Materiały Ósmej Krajowej Konferencji „III Forum Ciepłowników Polskich”, Międzyzdroje, wrzesień 1999, s.139÷143.*

- [27] Normatyw projektowania ciepłej wody użytkowej w budynkach mieszkalnych i użyteczności publicznej oraz dla potrzeb gospodarczo-socjalnych zakładów przemysłowych. *Informator Projektanta Budownictwa Ogólnego – Instalacje Sanitarne*, 4/1965.
- [28] **Nowak B., Zaleski J.** – Opis dobowej dynamiki poboru ciepłej wody użytkowej w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych. *COW nr 8/1995* s.354÷369.
- [29] **Nowak B., Zaleski J.** – Zmienność przebiegów dobowych poboru ciepłej wody użytkowej w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych dla dni roboczych. *COW nr 9/1995* s.393÷396.
- [30] **Pieńkowski K., Wydrycki J.** – Modernizacja sposobu przygotowania ciepłej wody użytkowej w dwufunkcyjnych węzłach ciepłych. *Materiały The 9-th International Conference „Air Conditioning & District Heating ‘98” Wrocław – Szklarska Poręba*, s.427÷432.
- [31] **Pieńkowski K., Wydrycki J.** – Możliwości obniżenia zapotrzebowania na moc cieplną systemów ciepłowniczych z tytułu realizacji priorytetowego podgrzewu ciepłej wody użytkowej w węzłach ciepłych. *Materiały Szóstej Krajowej Konferencji „Modernizacja miejskich systemów ciepłowniczych w Polsce”, Międzyzdroje, wrzesień 1997*, s.165÷168.
- [32] **Pieńkowski K., Wydrycki J.** – Wpływ instalacji ciepłej wody użytkowej na zużycie energii cieplnej w węźle ciepłym. *Materiały Siódmej Krajowej Konferencji „II Forum Ciepłowników Polskich”, Międzyzdroje, wrzesień 1998*, s.181÷186.
- [33] **Pieńkowski K., Wydrycki J.** – Wykorzystanie akumulacyjności cieplnej budynku w pracy instalacji centralnego ogrzewania. *Studia z zakresu inżynierii nr33. PAN, IPPT Warszawa 1992*.
- [34] **Polska Norma PN-92/B-01706** – Instalacje wodociągowe. Wymagania w projektowaniu.
- [35] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 17 lipca 1998 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci ciepłowniczych,

pokrywania kosztów przyłączenia, obrotu ciepłem, świadczenia usług przemysłowych, ruchu sieciowego i eksploatacji sieci oraz standardów jakościowych obsługi odbiorców (Dz. U. z 1998 r. Nr 100, poz. 642.)

[36]

[37] **Syposz J.** – Modelowanie matematyczne i badania zautomatyzowanych węzłów cieplnych. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej nr 53, seria: Monografie nr 29. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1988.

[38] **Szaflik W.** – Analiza pracy równoległego węzła c.o. i c.w.u. z priorytetem przygotowania ciepłej wody. Materiały Siódmej Krajowej Konferencji „II Forum Ciepłowników Polskich”, Międzyzdroje, wrzesień 1998, s.236÷242.

[39] **Szaflik W.** – Bilansowanie zapotrzebowania na ciepłą wodę do określania układów jej przygotowania. Materiały Czwartej Krajowej Konferencji „Modernizacja miejskich systemów ciepłowniczych w Polsce”, Międzyzdroje, wrzesień 1995, s.214÷219.

[40] **Szaflik W.** – Równoległe węzły c.o. i c.w.u. z priorytetem przygotowania ciepłej wody. *Informacja Instal* 7-8/98, s.4÷8.

[41] **Szaflik W.** – Wyposażenie instalacji ciepłej wody w mieszkaniach w wodomierze podstawą racjonalizacji zużycia ciepłej wody. *Ogrzewnictwo Praktyczne* nr 1/95, s.27÷30.

[42] **Szumska G.** – Weryfikacja przepływów obliczeniowych służących do obliczania węzłów c.w.u. na podstawie pomiarów w budynkach wielorodzinnych. *Materiały Ósmej Krajowej Konferencji „III Forum Ciepłowników Polskich”*, Międzyzdroje, wrzesień 1999, s.162÷167.

[43] **Tabernacki J.** – Problem stosowania indywidualnych pomiarów zużycia wody w mieszkaniach. *Ogrzewnictwo Praktyczne* nr 2/95 s.27÷32.