

Janusz PEŁCZYŃSKI
Politechnika Rzeszowska

ANALIZA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA WYMUSZEŃ TERMICZNYCH W BUDYNKACH

Na podstawie przeprowadzonej analizy częstotliwościowej podstawowych wymuszeń termicznych w budynkach, zaproponowany został zakres częstotliwości, dla którego powinno się wyznaczać cieplne charakterystyki częstotliwościowe budynków na potrzeby dynamicznych analiz cieplnych.

1. Wstęp

Współczesne wymagania stawiane budynkom oraz budownictwu jako dziedzinie gospodarki są ukierunkowane na poprawę realizowania funkcji budynków, przy jednoczesnym zmniejszaniu nakładów inwestycyjnych, eksploatacyjnych i mniejszym obciążaniu środowiska naturalnego. Wymienione wymagania mają szczególne odniesienie do kwestii zapewnienia komfortu cieplnego w budynkach.

Zużycie energii oraz jakość termiczna środowiska wewnętrznego w budynkach są wynikiem warunków klimatycznych i szczegółowych warunków lokalizacji, przeznaczenia oraz sposobu użytkowania budynku, izolacyjności cieplnej przegród, dynamicznych właściwości cieplnych budynku oraz wyposażenia instalacyjnego i zastosowanego sposobu sterowania instalacjami [1-4].

Dynamiczne właściwości cieplne budynku są kształtowane przez jego rozwiązania materiałowe i przestrzenne. Zależą od doboru materiałów budowlanych, ich rozmieszczenia w przegrodach, elementach konstrukcyjnych budynku, a także od rozwiązania bryły i wewnętrznych układów przestrzennych [5-7].

Jedną z metod analizy dynamicznych właściwości cieplnych budynku lub jego wydzielonego elementu jest wykorzystanie charakterystyk częstotliwościowych. Charakterystyki te przedstawiają odpowiedzi obiektu na komponenty harmoniczne wymuszenia.

W klasycznym podejściu zakłada się, że dynamiczne właściwości cieplne elementów budowlanych są najlepiej charakteryzowane przez ich odpowiedzi na harmoniczne wahania o naturalnym cyklu dobowym [8-9]. Norma [10] podająca metodę obliczania charakterystyki dynamicznej komponentów budowlanych dla

dowolnych okresów wahań cieplnych wymienia cztery okresy, które odpowiada ją określonym grupom wymuszeń: 1 godzina, 1 doba, 1 tydzień, 1 rok.

Do celów obliczeniowych każde wymuszenie może być reprezentowane przez pełne spektrum harmoniczne. Istotne jest jednak zagadnienie określenia odpowiedniego zbioru częstotliwości, dla którego należy określać charakterystyki dynamiczne budynku i jego elementów, tak aby były one reprezentatywne wobec typowych wymuszeń oraz aby umożliwiały pełne porównanie właściwości różnych konstrukcji czy rozwiązań obiektów.

2. Analiza częstotliwościowa wymuszeń termicznych

2.1. Wymuszenia zewnętrzne

Podstawowymi wymuszeniami zewnętrznymi uwzględnianymi w dynamicznych modelach budynków są temperatura zewnętrzna T_e i całkowite promieniowanie słoneczne qs_g .

Analizie poddane zostały roczne przebiegi T_e i qs_g według danych klimatycznych typowego roku meteorologicznego dla Warszawy oraz syntetycznych zmiennych pogodowych wygenerowanych programem MeteoNorm dla lokalizacji Krakowa [11]. Przebiegi zmiennych pogodowych w programie Meteo-Norm generowane są na podstawie średnich 30-letnich wartości miesięcznych z wykorzystaniem stochastycznego modelu klimatu opisującego zmienne pogodowe i ich wzajemne korelacje. Uzyskane w ten sposób przebiegi wymuszeń stosowane są w symulacjach komputerowych służących analizom cieplnym budynków.

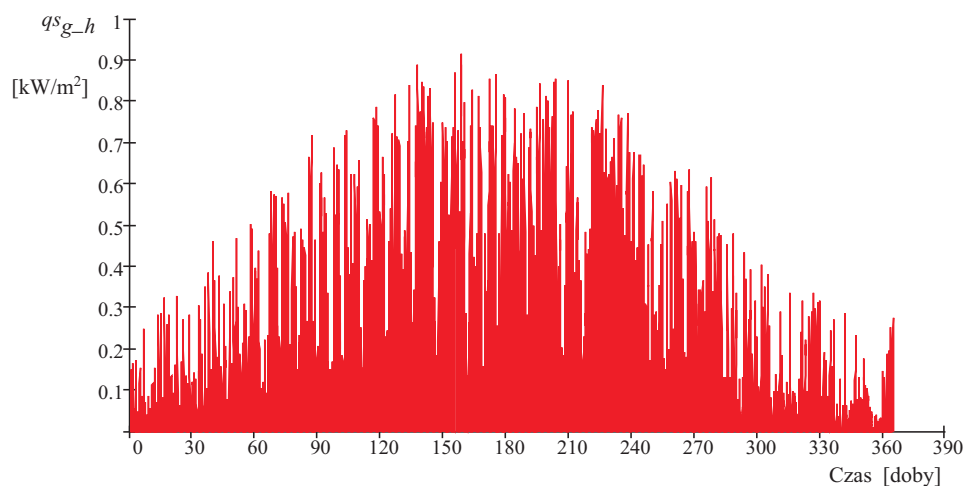
Zasadnicze wnioski z analizy obydwu wymienionych zbiorów danych nie różnią się – w dalszej części artykułu przedstawiono szczegółowe wyniki analizy syntetycznych zmiennych pogodowych wygenerowanych dla lokalizacji Krakowa.

Określenie widma częstotliwości dowolnego przebiegu można przeprowadzić numerycznie, wykorzystując np. algorytm FFT (szybkiej transformaty Fouriera). Ważną charakterystyką danego przebiegu czasowego jest jego widmo mocy. Widmo mocy wymuszenia, dane jako zbiór kwadratów modułów współczynników transformaty Fouriera, przedstawia dystrybucję mocy (lub wariancji) przebiegu czasowego w tworzących go częstotliwościach harmonicznym. Obraz widma mocy ułatwia wyłonienie dominujących częstotliwości komponentów harmonicznym dla danego przebiegu.

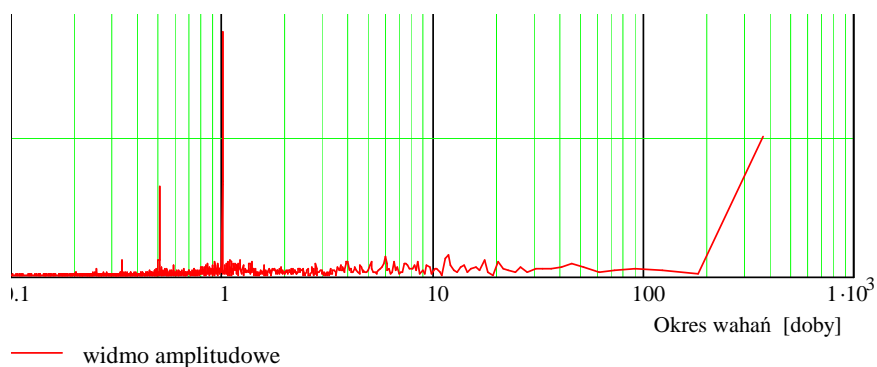
Promieniowanie słoneczne

Roczny przebieg analizowanego rozkładu całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą został przedstawiony na rys. 1. Rysunki 2. i 3. obrazują widmo częstotliwości i widmo mocy tego wymuszenia. Zarówno widmo częstotliwości, jak i widmo mocy nie pozostawiają wątpliwości co do

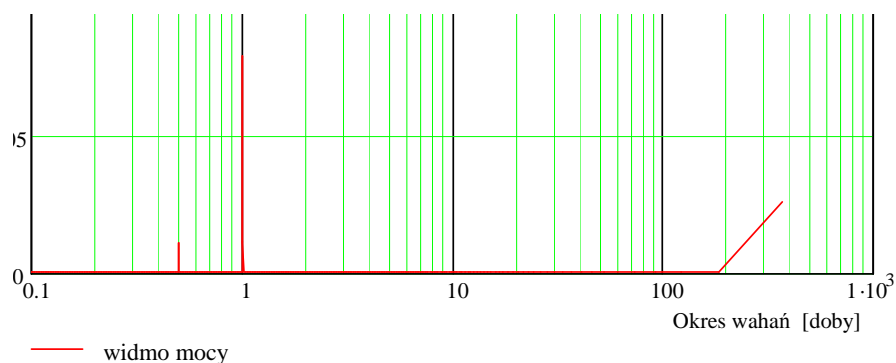
dominującej pozycji harmoniki o okresie wahań 24 godz. W widmie mocy wi-
dać w zasadzie trzy harmoniki: o okresie 12 i 24 godz. oraz 1 rok. Dla przebiegu
rocznego, obrazu widma nie zmienia osobne rozpatrywanie promieniowania
bezpośredniego i rozproszonego.



Rys. 1. Przebieg roczny całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą wg danych programu MeteoNorm dla Krakowa

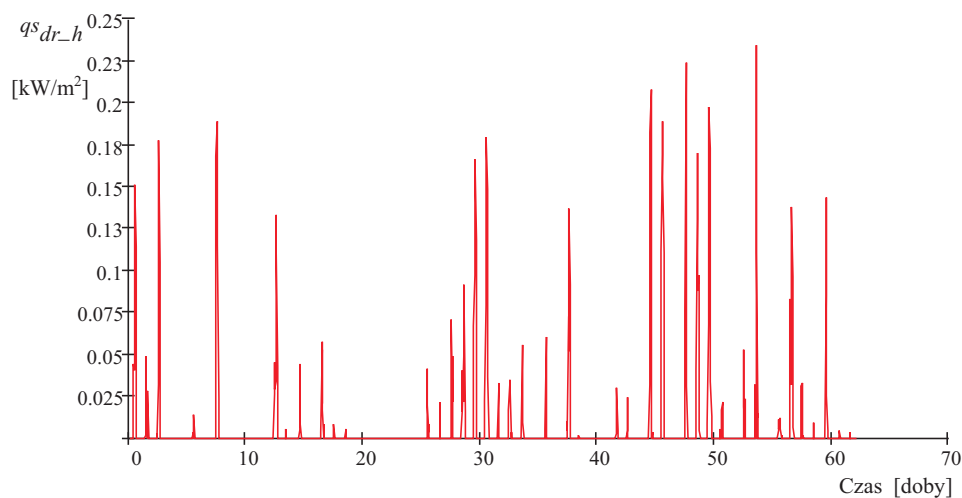


Rys. 2. Widmo amplitudowe całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą dla okresu roku

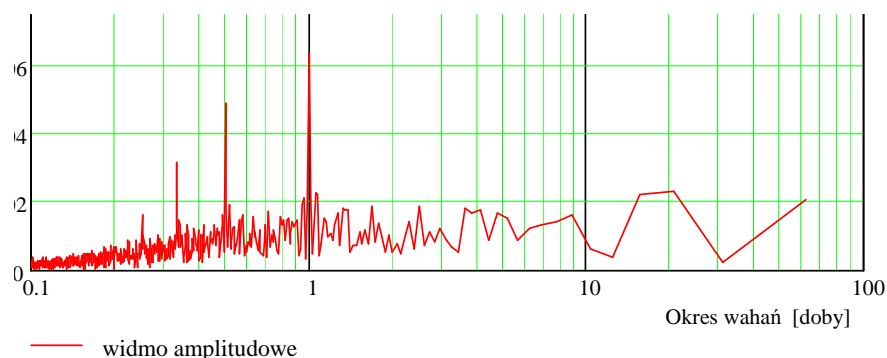


Rys. 3. Widmo mocy całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą dla okresu roku

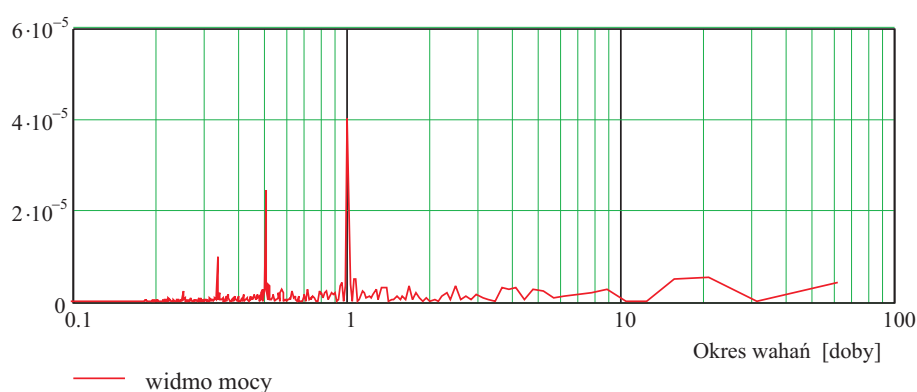
W okresach zimowych w Polsce dominuje promieniowanie rozproszone, a promieniowanie bezpośrednie występuje w okresach kilkudniowych. Grudzień i styczeń są miesiącami, w których przebiegi promieniowania całkowitego najbardziej odbiegają od średniej rocznej zarówno pod względem amplitud promieniowania, jak i składu promieniowania. Pomimo tego, nawet dla składowej promieniowania bezpośredniego w grudniu i styczniu dominującą częstotliwością widma (przy wyraźnym wzroście znaczenia harmonik o innych częstotliwościach) jest harmonika o okresie 24 godz. – rys. 4-6.



Rys. 4. Przebieg bezpośredniego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą wg danych programu MeteoNorm dla Krakowa – miesiące grudzień i styczeń



Rys. 5. Widmo amplitudowe bezpośredniego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą – miesiące grudzień i styczeń



Rys. 6. Widmo mocy bezpośredniego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą – miesiące grudzień i styczeń

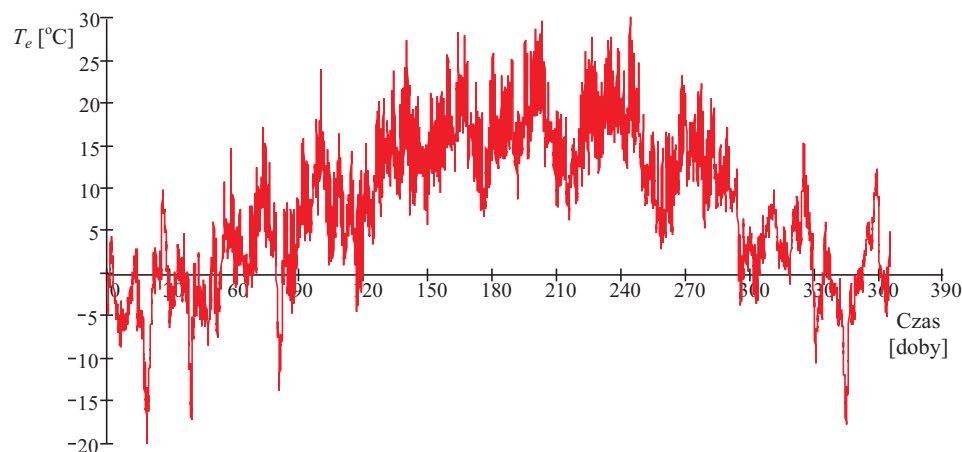
Temperatura zewnętrzna

Nawet wzrokowa ocena przebiegów temperatury zewnętrznej T_e pokazuje różny charakter jej zmian w poszczególnych okresach roku (por. rys. 10. i 13.).

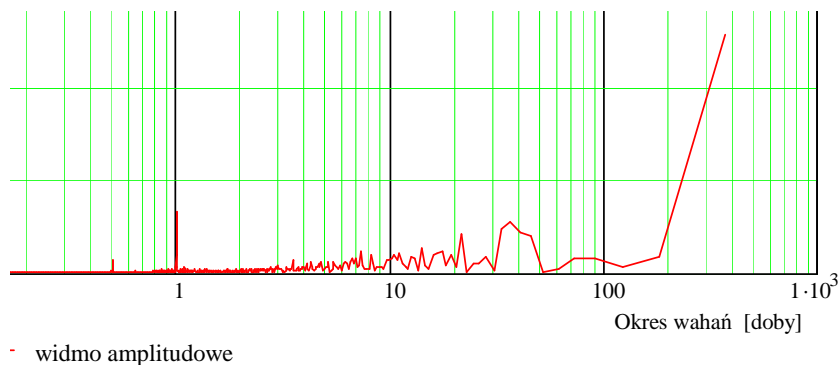
Problem zmienności charakterystyk wymuszeń klimatycznych dla warunków Polski został przedstawiony w pracy D. Bzowskiej [12]. Autorka, w ramach identyfikacji parametrów stochastycznego modelu przebiegów pogodowych dla danych klimatycznych Warszawy, określiła dla okresów miesięcznych m.in. składowe deterministyczne zmiennych pogodowych w postaci wartości średniej, amplitudy i przesunięcia czasowego harmoniki o okresie 24 godz. Zamieszczone w pracy [12] wyniki pokazują zróżnicowany w czasie udział tej częstotliwości w przebiegu poszczególnych zmiennych klimatycznych, w tym także dla temperatury zewnętrznej w kolejnych miesiącach roku. Ujawnia to dynamiczną naturę

przebiegów pogody i wyraża względną w czasie wielkość udziału danej częstotliwości w tworzeniu przebiegu danej zmiennej pogodowej.

Na rysunkach 7., 8. i 9. przedstawiony jest przebieg roczny T_e , jego widmo częstotliwości i widmo mocy. Dla okresu rocznego dominują częstotliwości o okresie 1 dzień, następnie kilka między 7 a 50 oraz 365 dni. Ten skład widma odzwierciedla udział poszczególnych harmonicznych w przebiegu rocznym, którego rozpatrywanie jako powtarzalnego w latach poprzednich i następnych można uznać za uzasadnione w stosunku do danych syntetycznych będących pewnym typem uśrednienia. Rzeczywiste przebiegi roczne ulegają określonym wahaniom w okresach wieloletnich [13-15].



Rys. 7. Roczny przebieg temperatury powietrza zewnętrznego

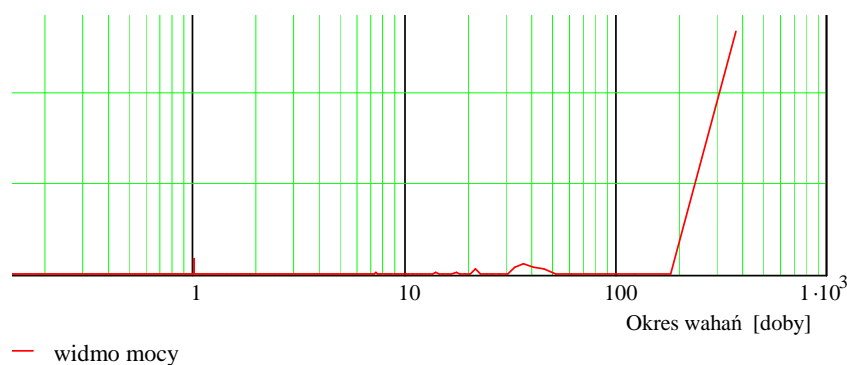


- widmo amplitudowe

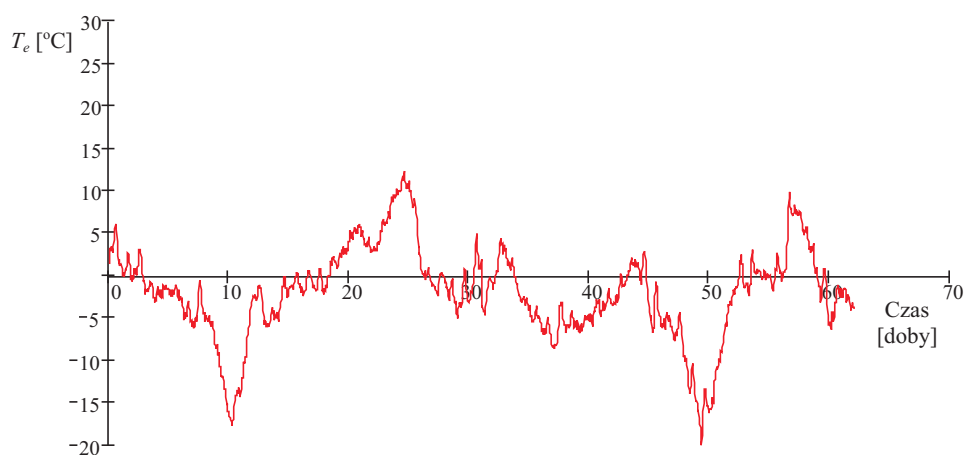
Rys. 8. Widmo amplitudowe przebiegu temperatury powietrza dla okresu roku

Analiza harmoniczna dla wybranych okresów w ciągu roku przedstawia inny skład widma niż dla przebiegu rocznego. Występuje także zróżnicowanie

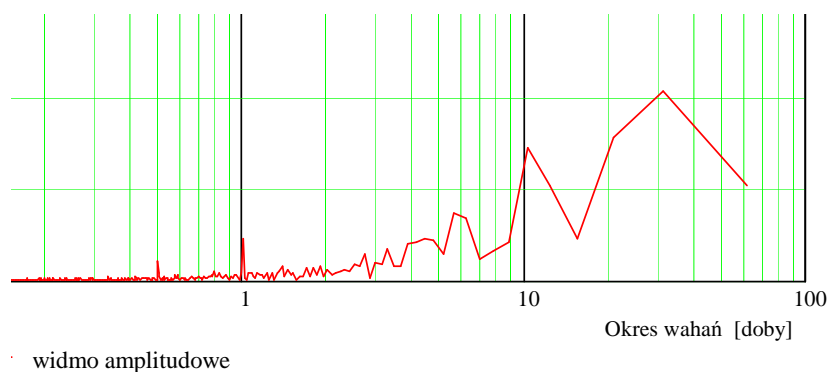
widma pomiędzy poszczególnymi okresami, co widać na przykładzie wybranych miesięcy zimowych i letnich (por. rys. 7-15). Ze względu na brak rozdzielczości w czasie, transformata Fouriera nie umożliwia bezpośredniego porównania składu widma dla kolejnych pór roku. Pomimo to widoczne różnice widm nie wynikają z techniki wyznaczania transformaty, która m.in. dla różnej długości szeregu czasowego ma różną rozdzielczość częstotliwości. Można to potwierdzić za pomocą technik umożliwiających określenie rozkładu częstotliwości w czasie.



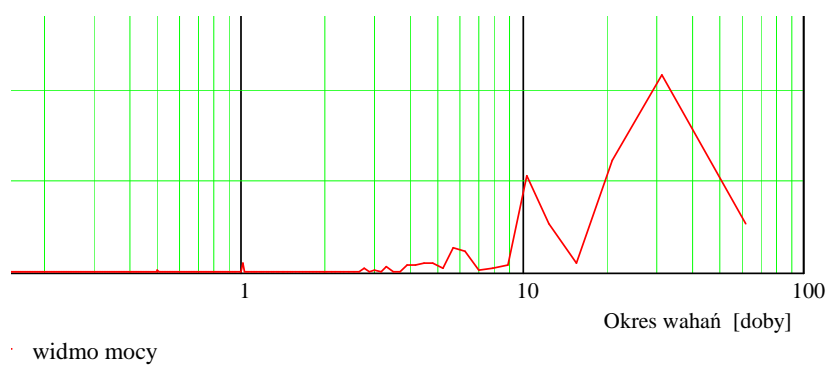
Rys. 9. Widmo mocy przebiegu temperatury powietrza dla okresu roku



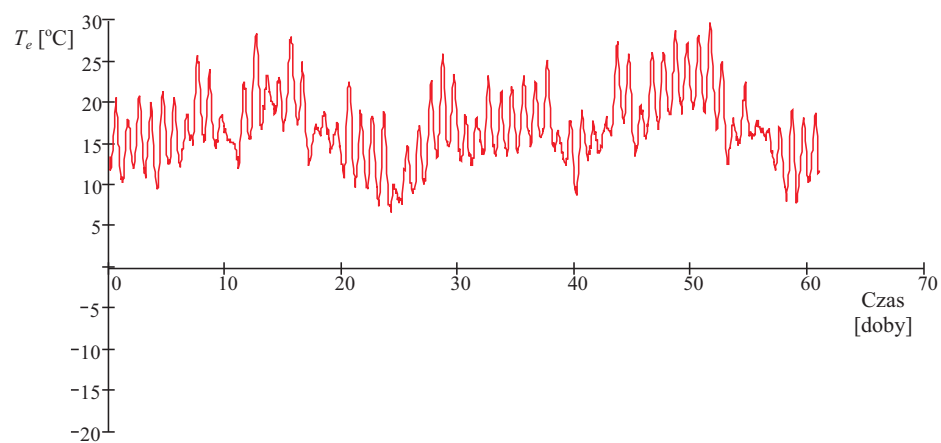
Rys. 10. Przebieg temperatury powietrza wg danych programu MeteoNorm dla Krakowa – miesiące grudzień i styczeń



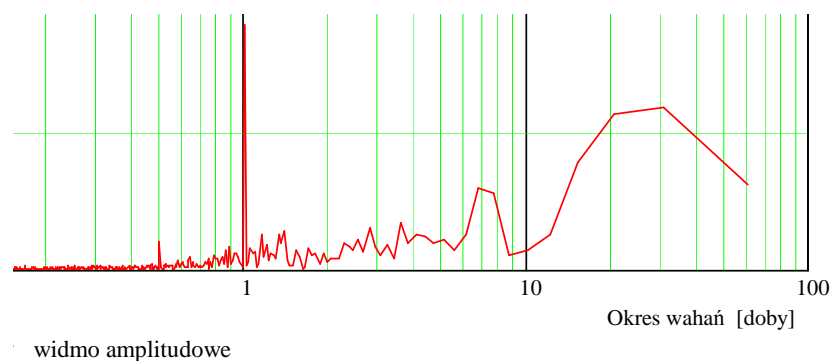
Rys. 11. Widmo amplitudowe temperatury powietrza – miesiące grudzień i styczeń



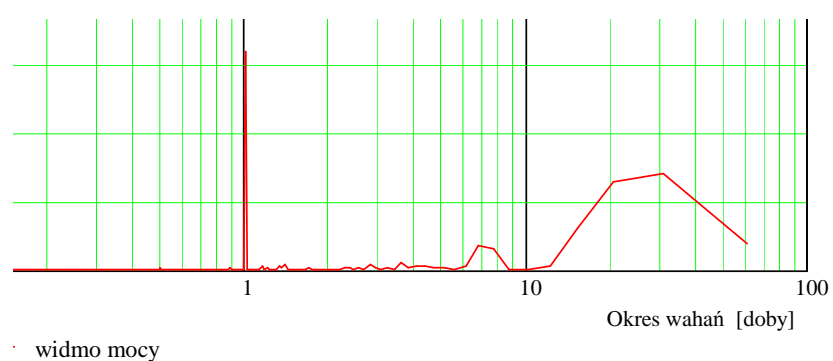
Rys. 12. Widmo mocy temperatury powietrza – miesiące grudzień i styczeń



Rys. 13. Przebieg temperatury powietrza wg danych programu MeteoNorm dla Krakowa – miesiące czerwiec i lipiec



Rys. 14. Widmo amplitudowe temperatury powietrza – miesiące czerwiec i lipiec



Rys. 15. Widmo mocy temperatury powietrza – miesiące czerwiec i lipiec

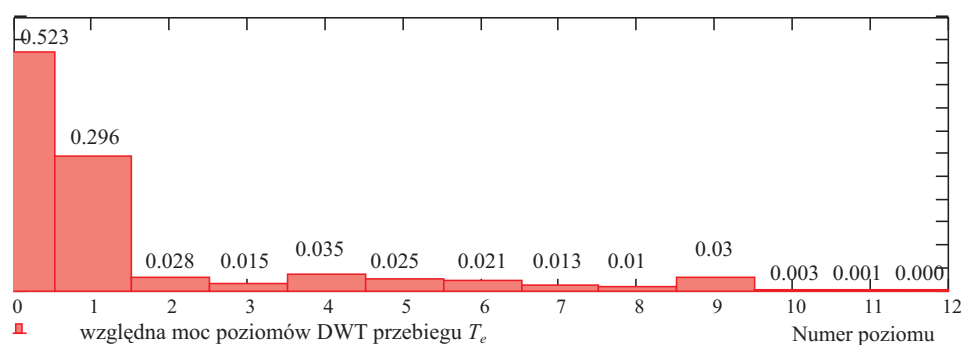
W celu określenia rozkładu częstotliwości w czasie stosowane są różne techniki, związane z wykorzystaniem tzw. okien (*windowing*) przy wyznaczaniu transformaty Fouriera. Możliwe wydaje się także inne przybliżenie rozwiązania, wykorzystujące transformatę falkową (*wavelet transform*). Transformata falkowa, mająca rozdzielczość częstotliwości w czasie, może być zastosowana do rozróżnienia zmiennego w czasie składu widma czasowych przebiegów dynamicznych, nie może jednak wykorzystywać jako funkcji bazy przebiegów sinusoidalnych.

Dyskretna transformata falkowa – DWT (*discrete wavelet transform*) dekomponuje dany przebieg czasowy na szereg poziomów, których współczynniki odnoszą się do kolejnych pasm częstotliwości fali elementarnej (nieharmonicznej) wykrywanych w sygnale, przy jednoczesnej lokalizacji występowania tych częstotliwości w czasie. Jeżeli poszczególne poziomy dekompozycji zostaną odwrotnie transformowane do dziedziny czasu, a następnie poddane standardowej analizie harmonicznnej, można uzyskać obraz pasma częstotliwości harmo-

nicznych tworzących dany poziom dekompozycji falkowej. Wówczas przebieg czasowy danego poziomu dekompozycji pozwala wnioskować o rozkładzie czasowym i wielkości udziału komponentów harmoniczných w całkowitym przebiegu wymuszenia.

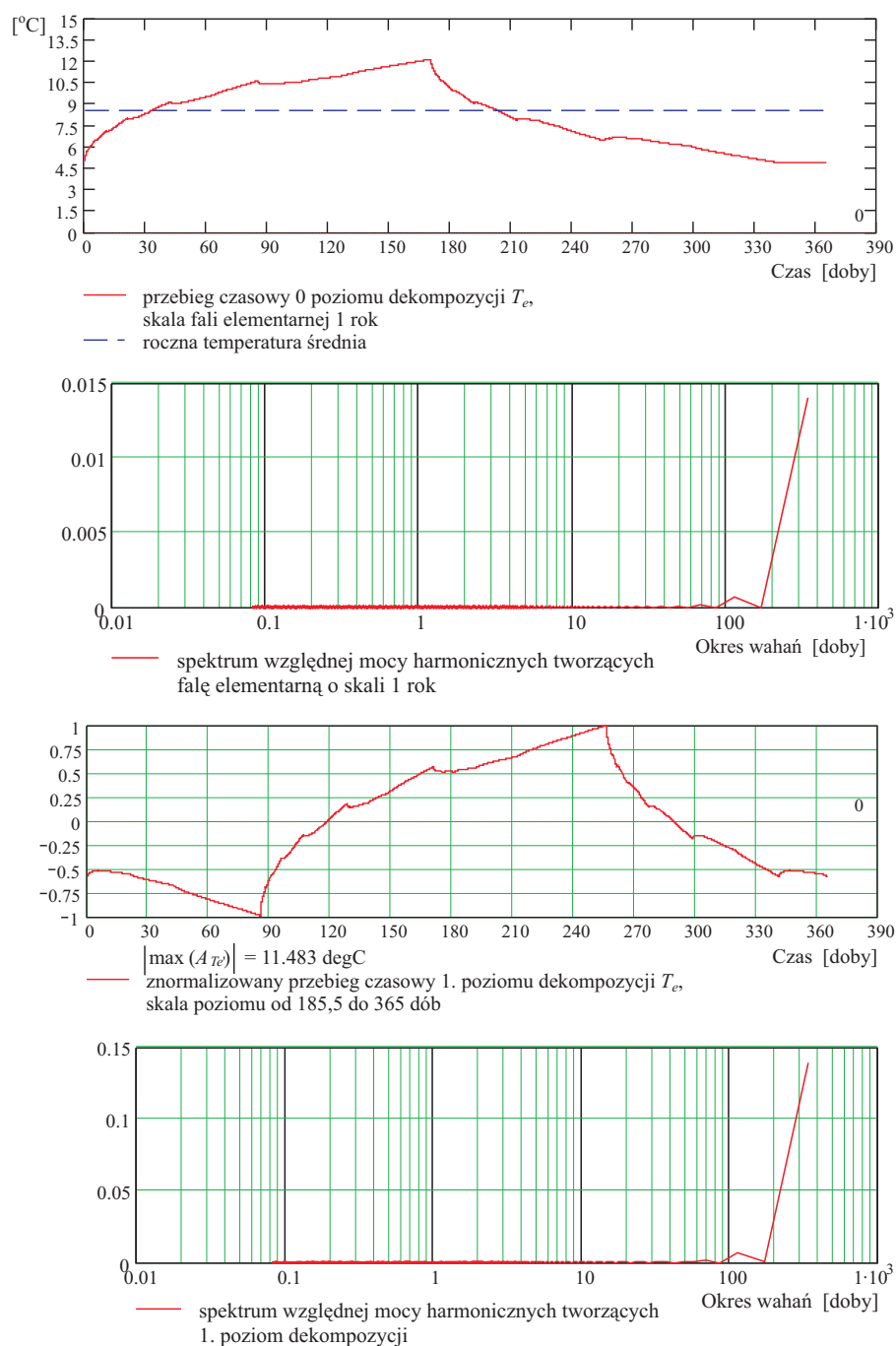
Przy wykorzystaniu 4-współczynnikowej fali elementarnej zdefiniowanej przez Daubechies [16] za pomocą programu Mathcad wykonana została dekompozycja T_e na 12 poziomów. Rysunek 16. przedstawia rozkład względnej mocy poziomów DWT (w stosunku do mocy sygnału), która jest równa mocy komponentów harmoniczných danego poziomu. Poziom 0 odzwierciedla średnią wartość przebiegu T_e w danym przedziale odwzorowaną za pomocą jednej fali elementarnej. Wartość średnia pozostałych poziomów jest równa zero.

Poziomy 0 i 1 DWT powinny być rozpatrywane łącznie, ponieważ ich harmoniczne widmo częstotliwościowe ma analogiczny skład i opiera się głównie na harmonikach o okresie od 170 dni do 1 roku. Obydwa pierwsze poziomy zawierają większość mocy przebiegu T_e (82%), a ich obecność w ciągu roku jest stała. Pozostałe poziomy zawierają 18% mocy T_e . Największy udział mają wśród nich poziomy 4. i 9., następnie 2., 5., 6., 7., 8., 10., 11., 12. Sześć pierwszych poziomów zawiera 16,7% mocy T_e . Ostatni, 12. poziom ma względną moc równą 0,0003 i zawiera niewielkie zmiany temperatury poniżej 1°C o okresie od 2,16 do 2,4 godz.

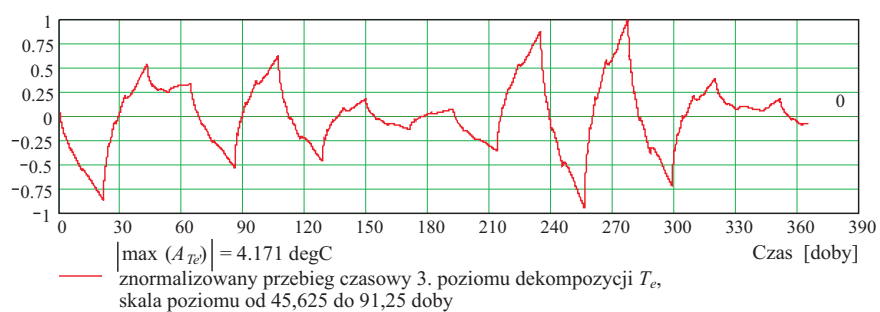
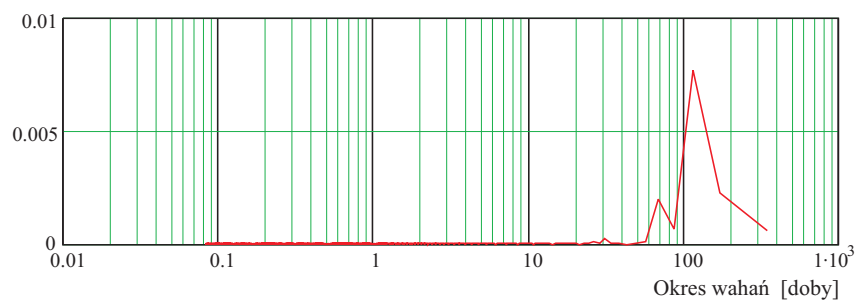
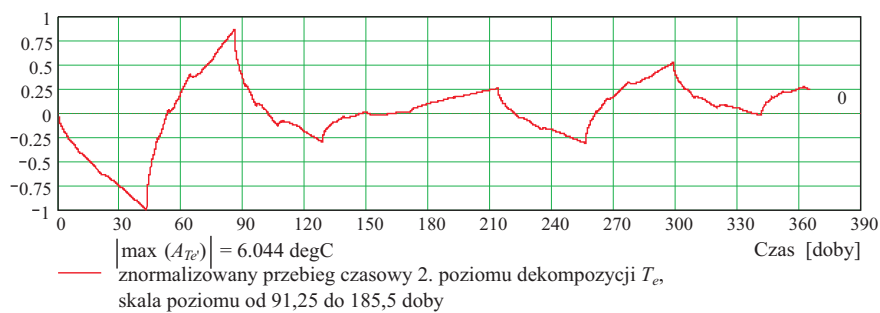


Rys. 16. Wielkość mocy względnej poziomów DWT dla przebiegu T_e

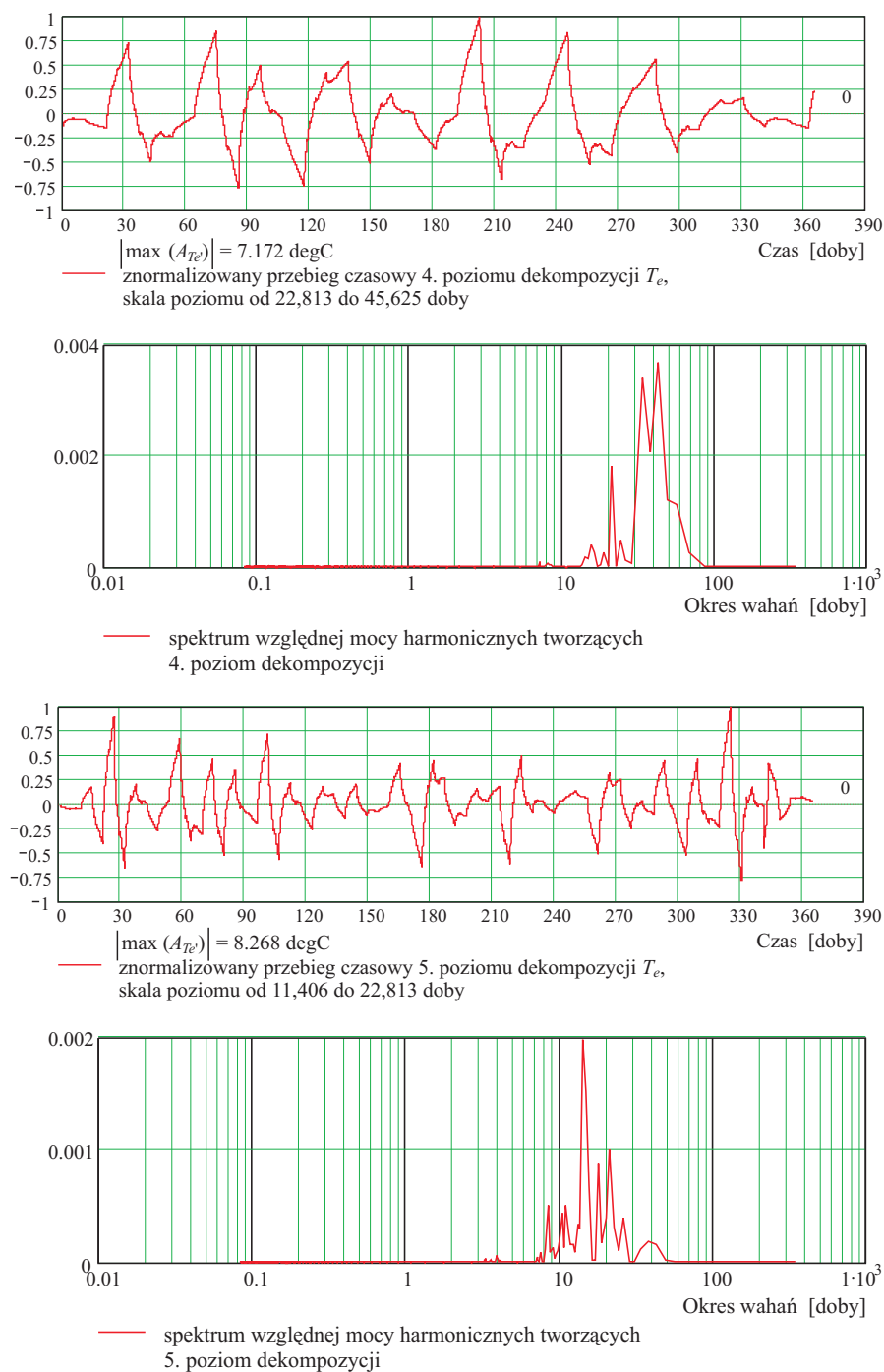
Na rysunkach 17-22 przedstawione są przebiegi czasowe poziomów dekompozycji (znormalizowane maksymalną dla danego poziomu amplitudą $A_{Te'}$) oraz rozkład względnej mocy harmoniczných danego poziomu. Taka reprezentacja spektrum częstotliwości pozwala przybliżyć zakres podstawowych częstotliwości tworzących poziom dekompozycji (pasmo o największych amplitudach), przy jednoczesnej orientacji w udziale, jaki dana częstotliwość bierze w tworzeniu oryginalnego przebiegu temperatury zewnętrznej T_e . Ze względu na częściowe nakładanie się pasm częstotliwości harmoniczných dla niektórych poziomów, nie uzyskuje się ścisłego obrazu zmienności widma harmonicznego



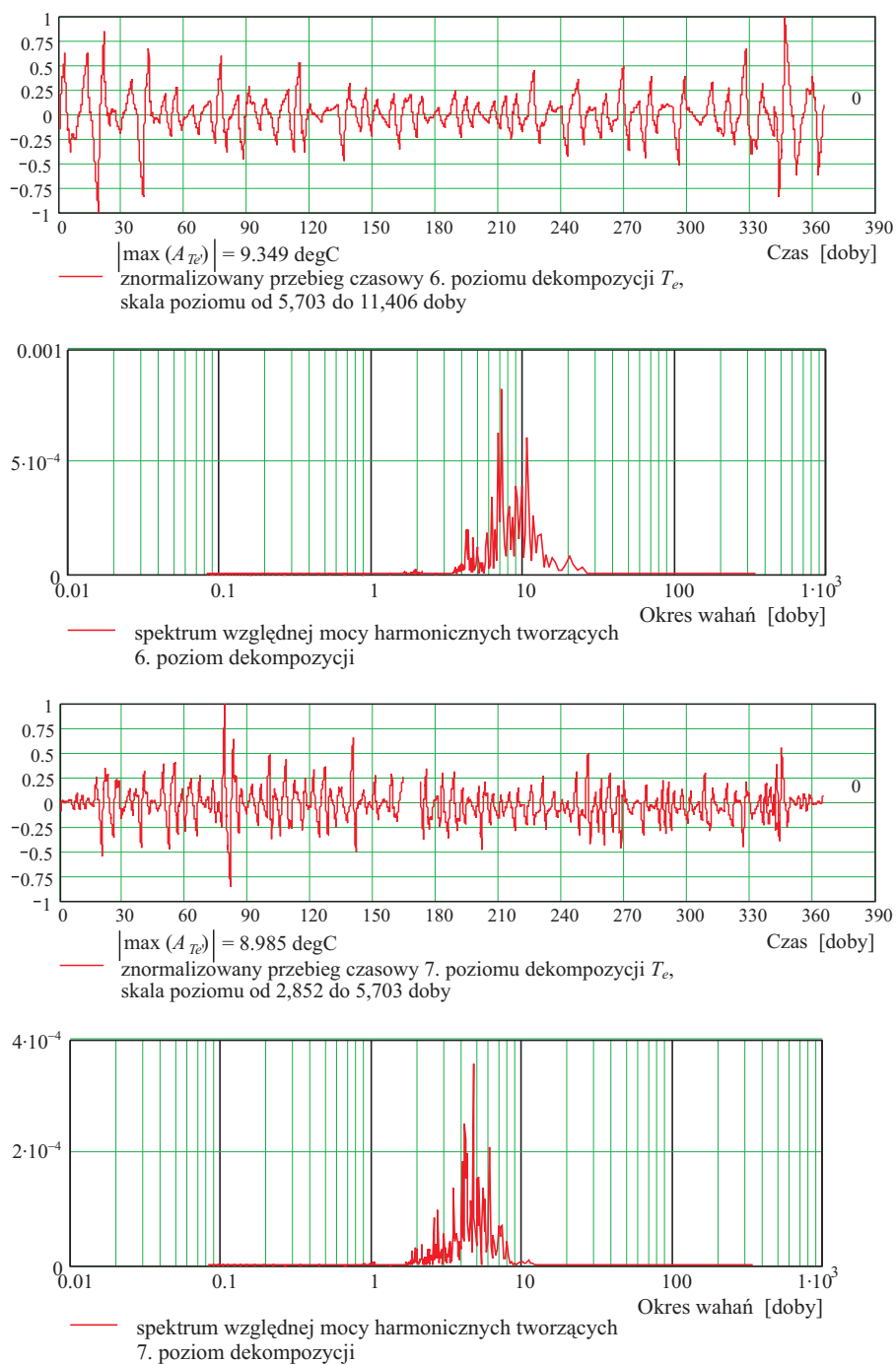
Rys. 17. Przebieg czasowy poziomu 0 i znormalizowany przebieg czasowy poziomu 1. oraz spektra względnej mocy harmonicznnych tych poziomów dekompozycji transformaty falkowej temperatury zewnętrznej



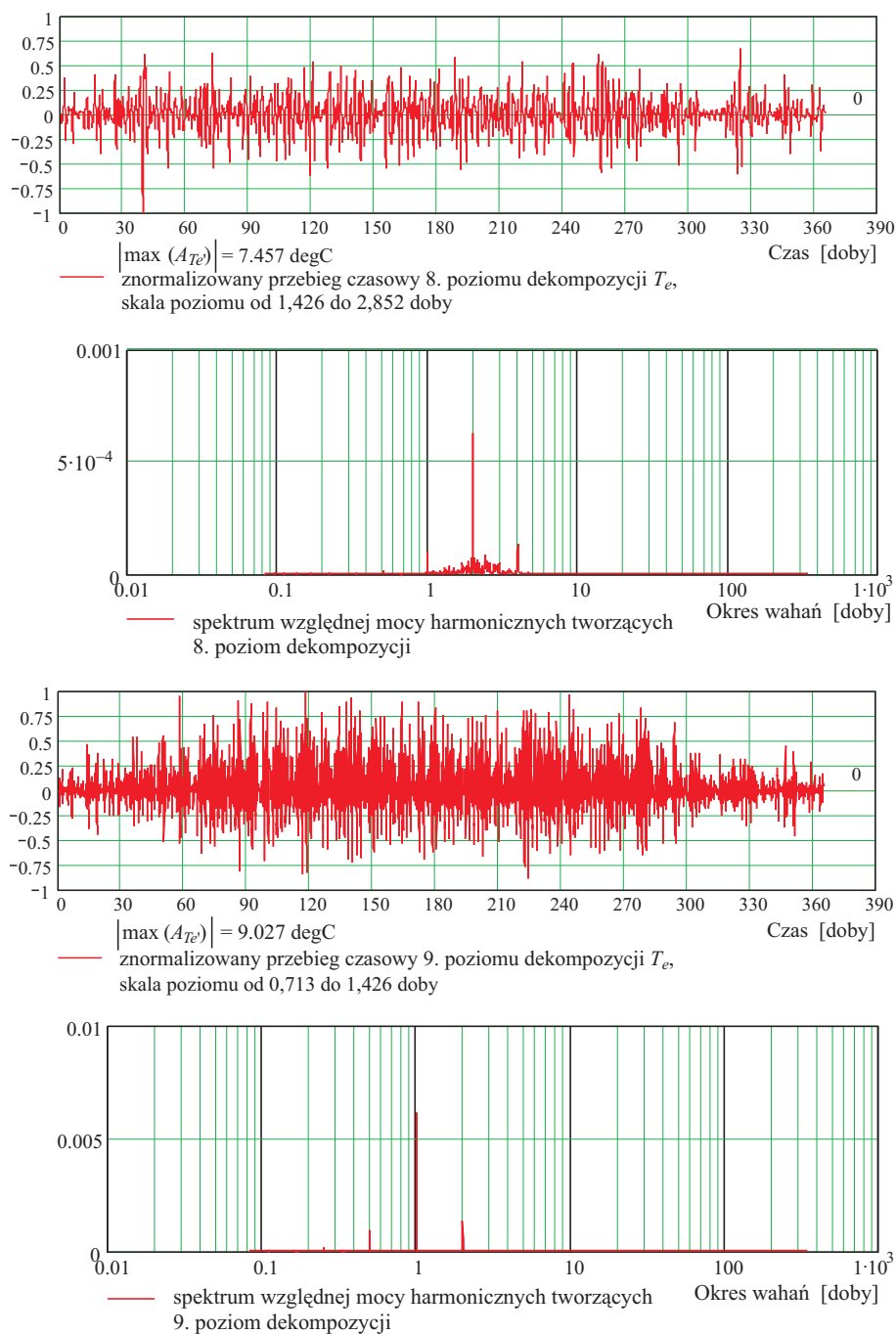
Rys. 18. Znnormalizowane przebiegi czasowe i spektra mocy względnej harmoniczných dla poziomów dekompozycji transformaty falkowej temperatury zewnętrznej – poziomy 2. i 3.



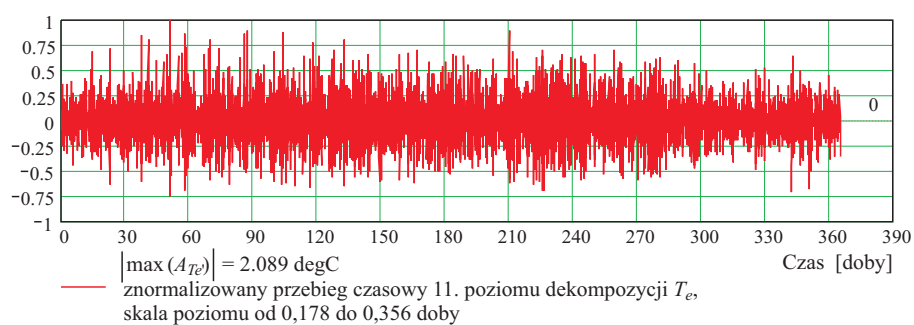
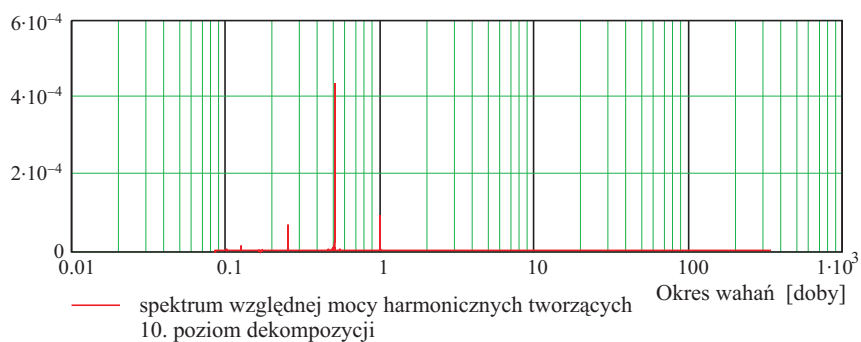
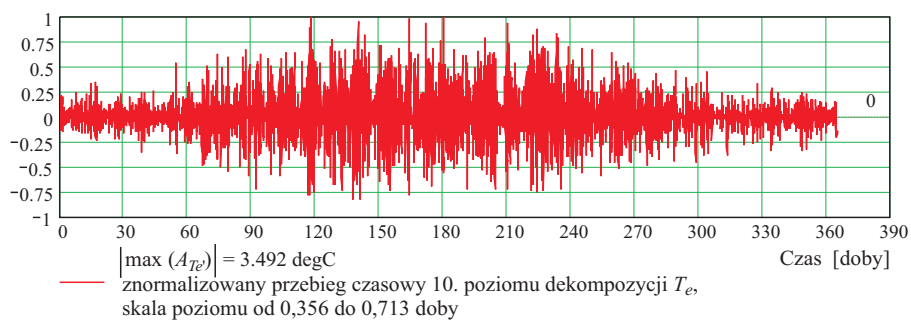
Rys. 19. Znormalizowane przebiegi czasowe i spektra mocy względnej harmonicznych dla poziomów dekompozycji transformaty falkowej temperatury zewnętrznej – poziomy 4. i 5.



Rys. 20. Znormalizowane przebiegi czasowe i spektra mocy względnej harmonicznych dla poziomów dekompozycji transformaty falkowej temperatury zewnętrznej – poziomy 6. i 7.



Rys. 21. Znormalizowane przebiegi czasowe i spektra mocy względnej harmonicznych dla poziomów dekompozycji transformaty falkowej temperatury zewnętrznej – poziomy 8. i 9.



Rys. 22. Znormalizowane przebiegi czasowe i spektra mocy względnej harmonicznych dla poziomów dekompozycji transformaty falkowej temperatury zewnętrznej – poziomy 10. i 11.

w czasie, chociaż częstotliwości o największej mocy, leżące w pasmach środkowych widma harmonicznego poszczególnych poziomów są dosyć wyraźnie rozdzielone. W przypadku wyższych częstotliwości, dla których DWT uzyskuje wyższą rozdzielczość w czasie [17], można zobaczyć wynik podobny do uzyskanego przez D. Bzowską: zmienną w czasie – wyraźnie mniejszą w miesiącach zimowych i większą w miesiącach letnich – amplitudę wahań harmoniki o okresie 24 godz. (rys. 21., 9. poziom dekompozycji DWT). Pomimo, że harmonika o okresie 24 godz. wyraźnie się wyróżnia w rozkładzie mocy, podobnie jak cały 9. poziom dekompozycji, to widoczna na rys. 21. zmienna wielkość jej amplitudy w czasie sprawia, że trudno ją przyjąć za równie reprezentatywną dla wszystkich pór roku.

Łączna moc poziomów 3., 4., 5., 7., 8., zawierających pośrednie między poziomami 6. i 9. oraz średnio- i długookresowe komponenty częstotliwościowe, jest ok. 2,5-krotnie wyższa niż łączna moc poziomów 6. i 9., zawierających częstotliwości wyróżnione w normie [10].

Przegląd przebiegów czasowych poszczególnych poziomów dekompozycji DWT pozwala śledzić zróżnicowanie znaczących komponentów harmonicznego temperatury zewnętrznej w poszczególnych okresach roku. Jak widać na wykresach, w miesiącach zimowych znacznie mniejszą rolę odgrywają dobowe cykle zmian temperatury. Dominujące znaczenie mają cykle wielodniowe o okresach 5, 7, 10, 20 dni. Porównanie przebiegu temperatury zewnętrznej z promieniowaniem słonecznym pozwala zauważyć wyraźną zależność między wielkością bezpośredniego promieniowania słonecznego a występowaniem cyklu o okresie 24 godz. Przy braku bezpośredniego promieniowania słonecznego T_e zmienia się przy niewielkich wahanach dobowych w cyklach wielodniowych. Wystąpienie silniejszego promieniowania bezpośredniego powoduje w danym dniu duży wzrost amplitudy temperatury, co odtwarza harmonika o okresie wahań 24 godz. Z kolei w lecie w związku z regularnym występowaniem silnego promieniowania bezpośredniego występuje wyraźna dominacja cykli dziennych, przy znacznej redukcji amplitudy cykli wielodniowych.

Wielkość amplitud przebiegów czasowych poziomów dekompozycji DWT pozwala zauważyć charakterystyczne wzrosty i spadki wielkości wahań poszczególnych poziomów, układających się wg zasady: zima – przewaga cykli długookresowych, lato – przewaga cykli krótkookresowych, okresy przejściowe – cykle średniookresowe.

2.2. Wymuszenia wewnętrzne

Wymuszenia wewnętrzne, podobnie jak zewnętrzne, mają charakter wymuszenia temperaturowego bądź wymuszenia strumieniem zysków cieplnych. Mogą one mieć charakter stały lub zmienny. Dowolne przebiegi wymuszeń wymagają każdorazowego wyznaczania ich charakterystyk przez transformatę Fouriera.

Wśród wymuszeń o zmiennym poziomie można wyróżnić grupę o przebiegach zmiennych okresowo, dosyć typowych dla wnętrz budynków. Z uwagi na liniowość problemu, wymuszenia o okresowo zmiennym poziomie można rozpatrywać jako sumę wymuszenia stałego i okresowego. Korzystnie jest przyjąć, że część stała wyznaczona jest przez najniższą wartość wymuszenia zmiennego, a wymuszenie okresowe zmienia się od zera do różnicy między maksymalną i minimalną wartością wymuszenia zmiennego. Wówczas wymuszenie okresowe może być rozpatrywane bezpośrednio w postaci prostych przebiegów o dobrze scharakteryzowanych właściwościach lub jako złożenie takich prostych przebiegów. Opis prostych sygnałów wymuszających zawarty jest m.in. w pracy [18]. Wśród nich szczególnie przydatne, zwłaszcza przy obliczeniach numerycznych, gdzie wymuszenia dane są w postaci dyskretnej, okazują się przebiegi okresowe typu bramka (fala prostokątna) oraz impuls trójkątny. Charakterystyki tych wymuszeń dane są przez podstawowe wielkości opisujące ich przebieg: czas trwania pojedynczego impulsu (τ dla bramki, 2τ dla impulsu trójkątnego), jego wartość maksymalną (A) oraz okres, w jakim impulsy się powtarzają (P). Podstawowa częstotliwość harmoniczna (o najdłuższym okresie) charakterystyk amplitudowych tych wymuszeń wynika z długości okresu P i wynosi $\omega_0 = 2\pi/P$. Taka jest też różnica między częstotliwościami kolejnych harmonik widma. Obwiednia widma amplitudowego osiąga wartość zero dla częstotliwości będących wielokrotnością częstotliwości o okresie równym τ – długości trwania impulsu bramki i połowy długości impulsu trójkątnego. Im krótszy czas trwania impulsu, tym dla większej częstotliwości obwiednia charakterystyki osiąga pierwsze zero i tym większą liczbę harmonik zawiera przedział wyznaczony przez tę częstotliwość.

Porównanie mocy sumy wartości średniej i harmonik zawartych w paśmie do pierwszego zera obwiedni (do częstotliwości $\omega = 2\pi/\tau$) z mocą całego widma pokazuje, że zawiera ona przynajmniej 97,5% mocy całkowitej [18]. Oznacza to, że sygnały te zastosowane jako wymuszenia termiczne mogą być sensownie reprezentowane przez wartość średnią i harmoniki o okresie wahań mniejszym niż długość trwania impulsu bramki lub połowa impulsu trójkątnego. Zatem charakterystyka częstotliwościowa dla dowolnego impulsu trójkątnego lub bramki może być przedstawiona przez harmoniki z przedziału częstotliwości $(2\pi/P, 2\pi/\tau)$.

Dla typowych wewnętrznych wymuszeń okresowych w budynkach można przyjąć okres P równy 7 dni jako ten, który pozwala odzwierciedlić tygodniowy harmonogram użytkowania budynku o dowolnym układzie wymienionych impulsów. Przyjmując najkrótszy czas trwania impulsu: $2\tau = 1$ godz., otrzymuje się zakres częstotliwości odtwarzających przebieg wymuszeń okresowych od $1/2$ godz. dla impulsu trójkątnego i 1 godz. dla bramki do 7 dni.

3. Wnioski

Przedstawiona analiza częstotliwościowa pokazuje dużą rozpiętość i zróżnicowanie występowania w czasie składowych harmonicznym wymuszeń ciepłych, jakim poddane są budynki i ich elementy.

W zasadzie tylko w przypadku promieniowania słonecznego wahania o cyklu dobowym dobrze je charakteryzują dla dowolnego okresu roku. Dynamika temperatury zewnętrznej podlega dużym zmianom w ciągu roku w zakresie składu widma częstotliwości oraz rozkładu mocy. Typowe wewnętrzne wymuszenia ciepłe mogą być reprezentowane przez harmoniki o okresie od ½ godz. do 7 dni.

Porównywanie dynamicznych właściwości ciepłych budynków i ich elementów składowych z wykorzystaniem kilku wyróżnionych harmonik może mieć znaczenie głównie orientacyjne i nie będzie reprezentatywne wobec wszystkich wymuszeń na przestrzeni całego roku.

W celu pełnego porównania dynamicznych właściwości ciepłych budynków i ich komponentów powinny być one reprezentowane przez charakterystyki częstotliwościowe określone dla szerokiego pasma częstotliwości odpowiadającego okresom wahań od ½ godz. do 365 dni.

Literatura

1. Gawin D. (red.): *Komputerowa symulacja procesów wymiany masy i energii w budynku*. Wydawn. Politechniki Łódzkiej, Łódź 1998
2. Kotarska K., Kotarski Z.: *Ogrzewane energią słoneczną. Systemy pasywne*. SIGMA NOT, Warszawa 1989
3. Rybka A., Pełczyński J.: *Elementy optymalizacji małych budynków mieszkalnych ze względu na ich energooszczędność*. III Konferencja Naukowo-Techniczna „Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Olsztyn 1999, s. 333-341
4. Saporito A., Day A.R., Karayiannis T.G., Parand F.: *Multi-parameter building thermal analysis using the lattice method for global optimisation*. Energy and Buildings, 33, 2001, s. 267-274
5. Kossecka E.: *Wybrane zagadnienia dynamiki cieplnej ścian budynków*. Studia z Zakresu Inżynierii, nr 45, PAN KILiW IPPT, Warszawa 1998
6. Kossecka E., Kośny J.: *The effect of structure of exterior walls on the dynamic thermal performance of a whole building*. IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Energodom'98, Kraków 1998, s. 237-244
7. Pełczyński J.: *Wpływ rozwiązań materiałowych i ukształtowania przestrzennego na energooszczędność budynku*. Praca doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2004
8. ASHRAE Handbook 1989, 1997: *Fundamentals*
9. Harris S.M., McQuiston F.C.: *A study to categorize walls and roofs on the basis thermal response*. ASHRAE Transactions, vol. 94 (2), 1988, s. 688-697

10. PN-EN ISO 13786, czerwiec 2001: *Właściwości cieplne komponentów budowlanych. Dynamiczne charakterystyki cieplne. Metody obliczania*
11. Remund J., Kunz S.: *Meteonorm*. Handbook, Part I-III, Meteotest, Swiss Federal Office of Energy, Bern 2002
12. Bzowska D.: *Wpływ losowych zmian pogody na procesy wymiany ciepła w budynkach*. Praca doktorska IPPT PAN, Warszawa 1996
13. Gawin D., Kossecka E. (red.): *Typowy rok meteorologiczny do symulacji wymiany ciepła i masy w budynkach*. Wydawn. Politechniki Łódzkiej, Łódź 2002
14. Kossecka E., Gawin D., Więckowska A.: *Metodyka opracowania typowego roku meteorologicznego dla Warszawy*. VIII Polska Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka budowli w teorii i praktyce”, Łódź 2001, s. 305-312
15. Sonechkin D.M., Astafyeva N.M., Datsenko N.M., Ivachtchenko N.N., Jakubiak B.: *Multiscale Oscillations of the Global Climate System as Revealed by Wavelet Transform of Observational Data Time Series*. Theoretical and Applied Climatology 64, 1999, s. 131-142
16. Daubechies I.: *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, SIAM, 1993
17. Polikar R.: *The Wavelet Tutorial*. <http://engineering.rowan.edu/>
18. Gabel R.A., Roberts R.A.: *Sygnały i systemy liniowe*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978

THE FREQUENCY ANALYSIS OF THERMAL FORCES IN THE BUILDINGS

S u m m a r y

On the basis of the conducted frequency analysis of basic thermal forces in buildings, the range of the frequency for the thermal frequency profiles of buildings for the needs of dynamic thermal analyses was proposed.

Złożono w Oficynie Wydawniczej w grudniu 2008 r.