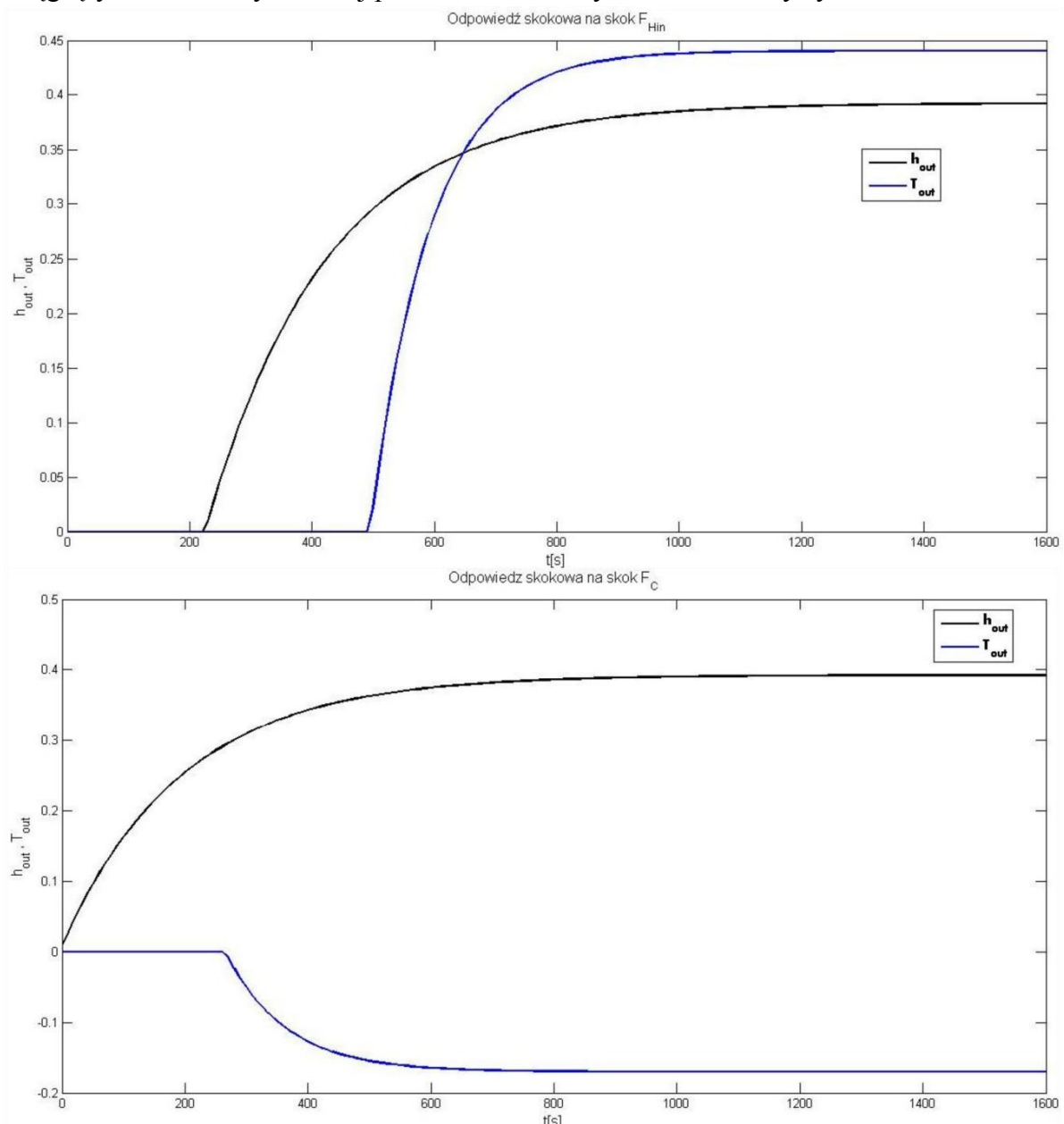


11. Analityczny regulator predykcyjny DMC

Dla badanego obiektu zaprojektowano analityczny regulator predykcyjny DMC z uwzględnieniem ograniczeń sterowania poprzez rzutowanie. Mając zaimplementowany dyskretny model obiektu wyznaczono odpowiedzi skokowe na sygnały sterujące F_{Hin} i F_C . Następnie na ich podstawie oraz na podstawie parametrów regulatora wyznaczono macierze M , M_p oraz K .

11.1. Odpowiedzi skokowe na sygnały sterujące F_{Hin} i F_C .

Odpowiedzi skokowe uzyskano poprzez użycie funkcji *step(args)* w Matlabie na podstawie transmitancji opisującej badany obiekt uwzględniającej opóźnienia w obiekcie. Następnie wybrano odpowiednie charakterystyki obiektu - na sygnały sterujące F_{Hin} i F_C . Analizując dynamikę obiektu ukazaną w etapie 1, początkowo przyjęto horyzont dynamiki równy 100. Dla czasu próbkowania $T_p = 10s$, czas predykcji wynosił $D \cdot T_p = 1000 s$. Natomiast po przeprowadzeniu symulacji działania DMC i analizie odpowiedzi skokowych ustalono horyzont dynamiki równy 160. Po tym czasie można przyjąć, że odpowiedzi skokowe osiągnęły stan ustalony. Poniżej przedstawiono otrzymane charakterystyki skokowe.



Rysunek 1 Odpowiedzi skokowe symulowanego obiektu na skok sygnałów sterujących F_{Hin} i F_C .

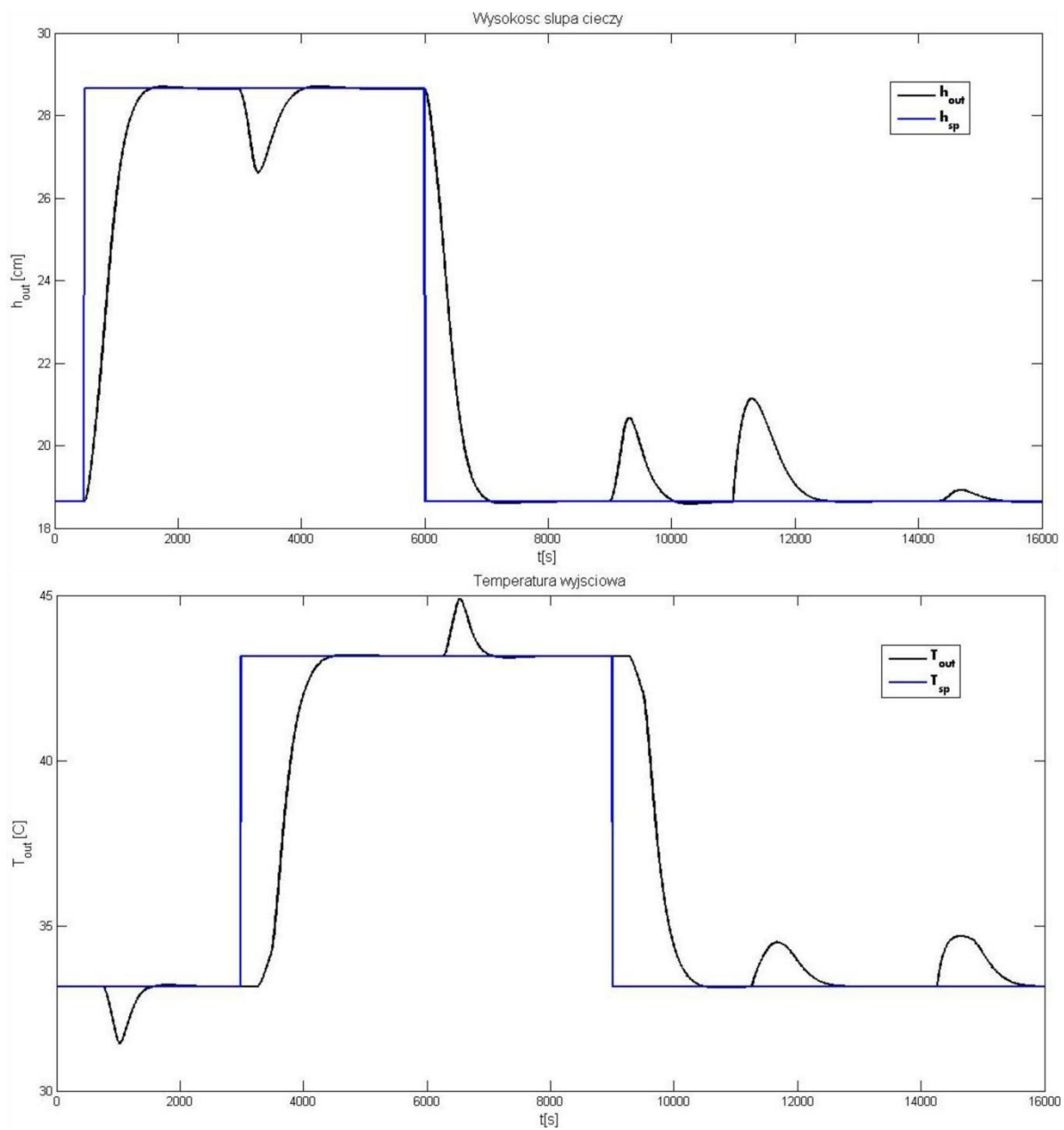
11.2. Dobranie optymalnych parametrów regulatora

Po przeprowadzeniu szeregu symulacji z różnymi nastawami ostatecznie wybrano następujące parametry:

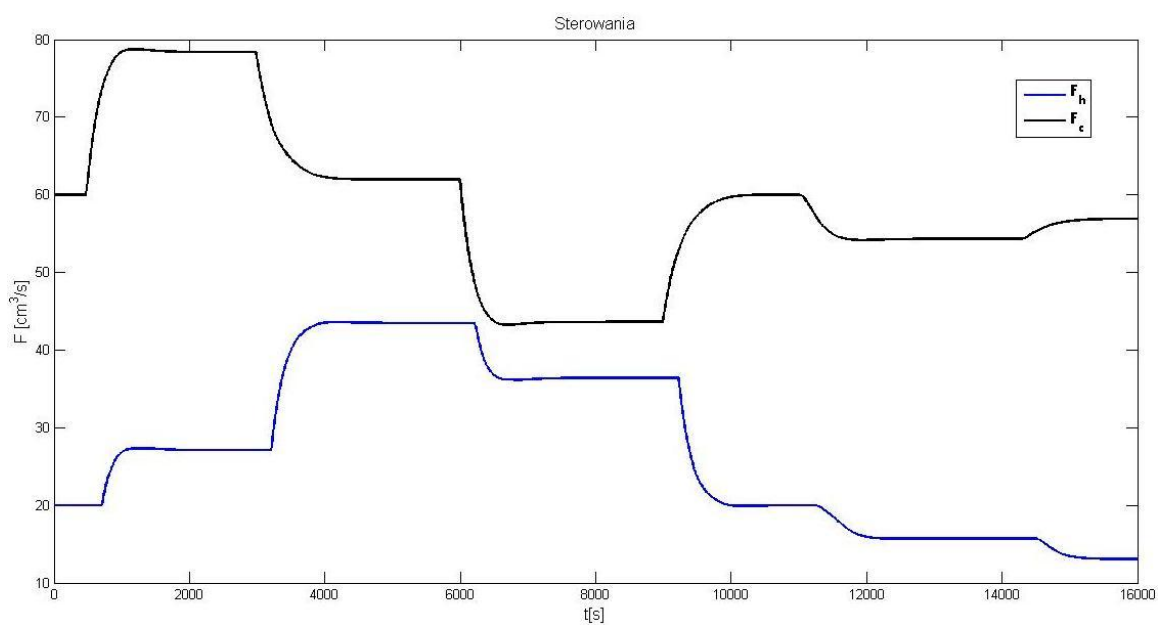
horyzont dynamiki $D = 160$,
horyzont predykcji $N = 120$,
horyzont sterowania $N_u = 20$,
współczynnik λ_1 i $\lambda_2 = 130$,
współczynnik $\psi = 1$,
przy czasie próbkowania $T_p = 10s$.

Symulacja działania regulatora rozpoczyna się w punkcie pracy obiektu. W 500s zmieniono wartość zadaną h_{out} o 10 cm. Następnie w 3000s zmieniono wartość zadaną T_{out} o 10°C. Następnie w 6000s wartość zadaną h_{out} wróciła do wartości z punktu pracy, a w 9000s również wartość zadaną T_{out} wróciła do wartości początkowej. W 11000s w celu przetestowania odporności regulatora na zakłócenia wprowadzono zakłócenie F_d i zwiększono go o $10 \frac{cm^3}{s}$, a w 14000s wprowadzono zakłócenie T_d , zwiększając jej wartość o 10°C.

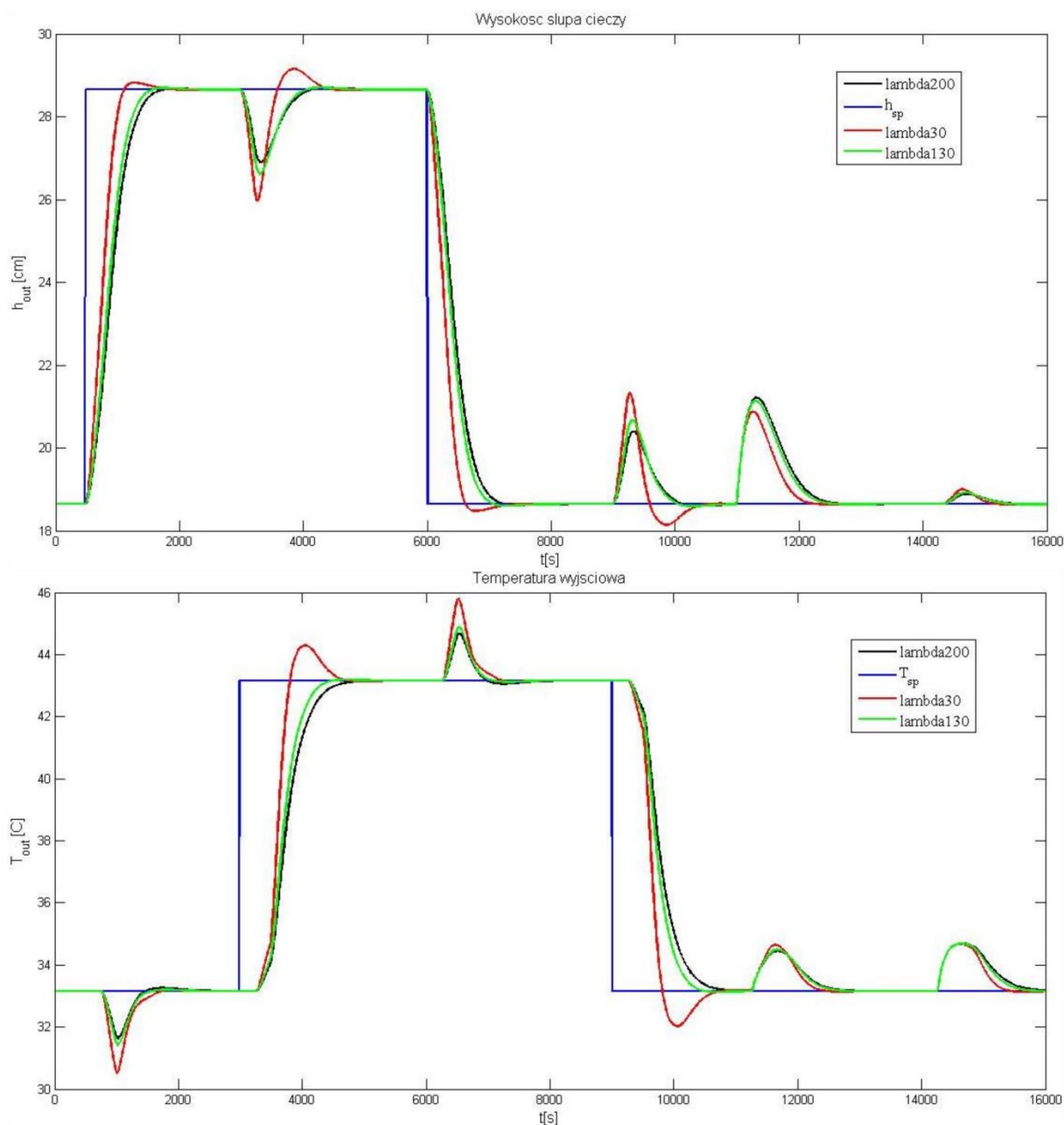
Na podstawie tak skonstruowanego przebiegu testowano i dobierano optymalne nastawy regulatora DMC. Dodatkowo przyjęto następujące ograniczenia sterowania $F_{Cmax} = 100 \frac{cm^3}{s}$, $F_{Cmin} = 0 \frac{cm^3}{s}$, $F_{Hmin} = 0 \frac{cm^3}{s}$, $F_{Hmax} = 80 \frac{cm^3}{s}$ oraz przyrostów sterowania $\Delta U_{max} = 1 \frac{cm^3}{s}$. Poniżej zostaną przedstawione przebiegi dla różnych wartości nastaw regulatora DMC.



Rysunek 2 Regulacja symulowanego obiektu z optymalnymi nastawami regulatora DMC.

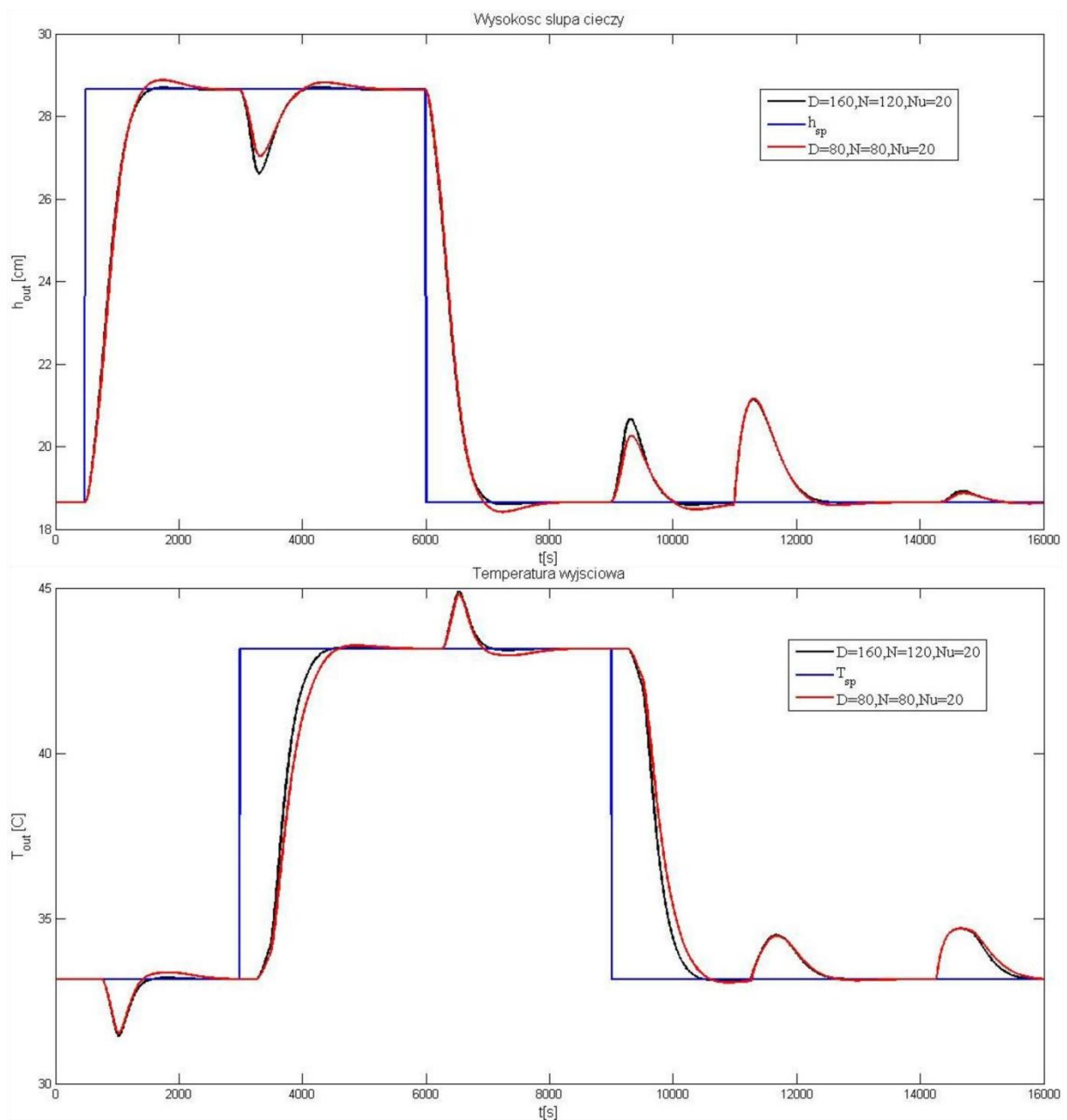


Rysunek 3 Wartości sygnałów sterujących dla optymalnych nastaw regulatora DMC.



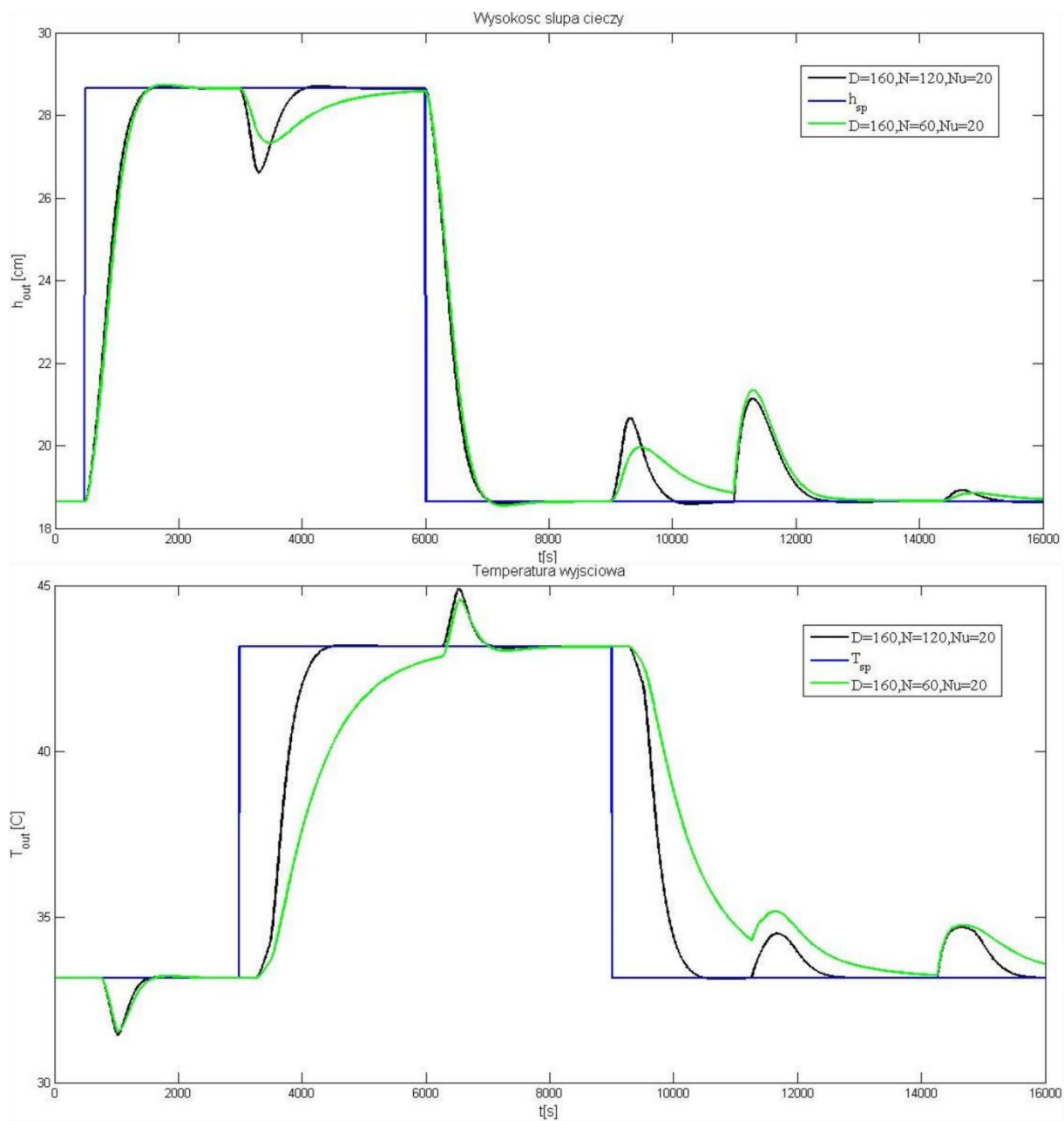
Rysunek 4 Porównanie przebiegów regulacji w zależności od współczynnika lambda.

Z rysunku 4 wynika, że najlepszą regulację, czyli brak przeregulowań i najkrótszy czas regulacji w większości przypadków uzyskano dla lambda wynoszącej 130. Znaczne zmniejszenie współczynnika lambda powoduje powstanie znacznych przeregulowań oraz większe wahania wartości wyjściowej w przypadku zmiany pozostałej wartości zadanej. Z drugiej strony za duży współczynnik lambda powoduje wydłużenie czasu regulacji. Dlatego należało dobrać odpowiednią wartość lambda, aby uzyskać jak najlepszą regulację. Zdecydowano się na wartość współczynnika, dla którego nie występują jeszcze przeregulowania, lub jeśli występują to o nieznacznej wartości.



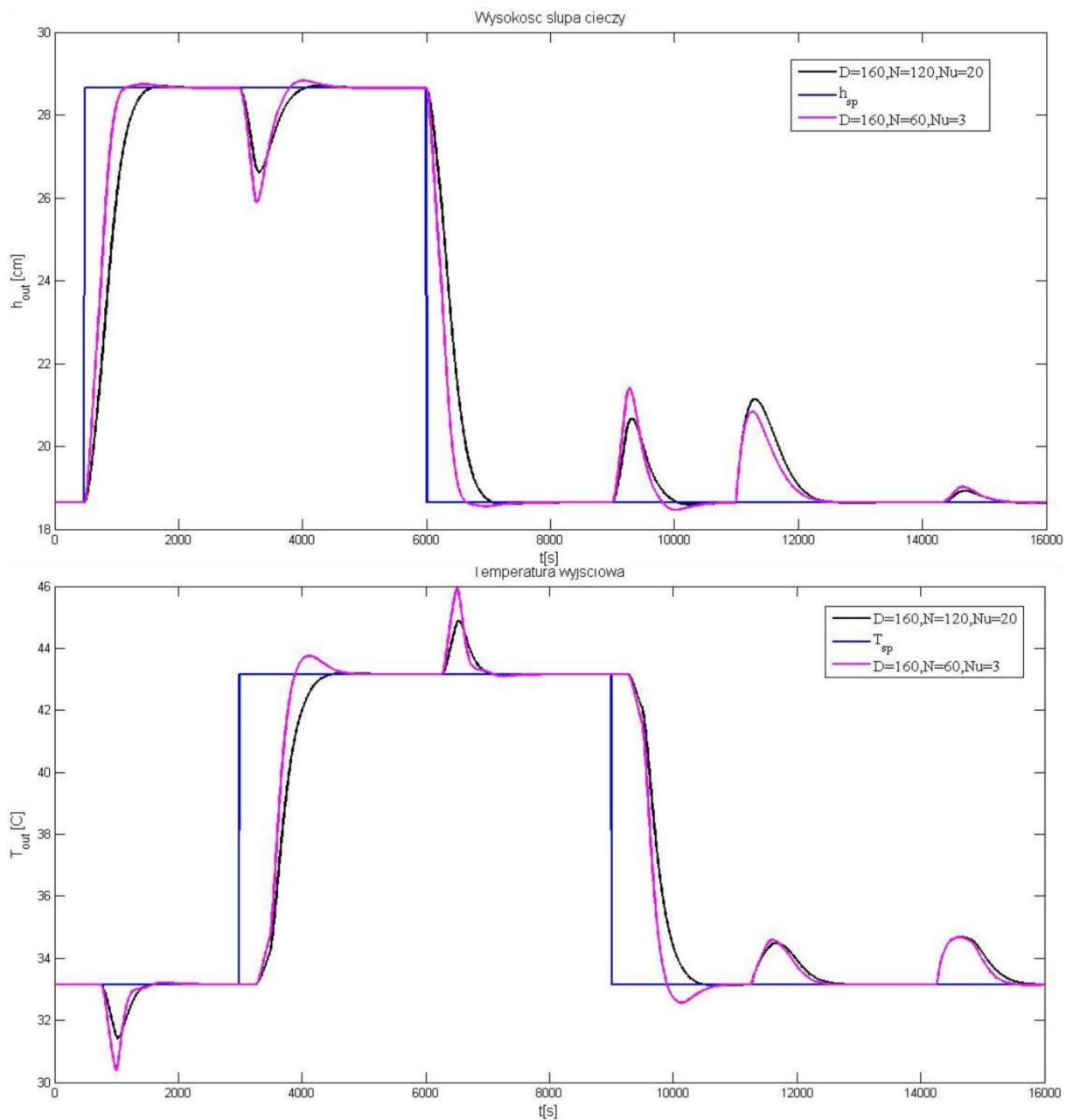
Rysunek 5 Porównanie przebiegów regulacji w zależności od horyzontu dynamiki.

Z powyższego rysunku łatwo zauważyć, że obniżenie horyzontu dynamiki ma wpływ na przebieg regulacji. Zbyt mały horyzont dynamiki pogarsza jakość regulacji.



Rysunek 6 Porównanie przebiegów regulacji w zależności od horyzontu predykcji.

Dobranie odpowiedniego horyzontu predykcji ma krytyczny wpływ na jakość regulacji. Gdy horyzont predykcji jest zbyt mały to drastycznie spada jakość regulacji. Przy niewłaściwym doborze horyzontu predykcji regulacja jest praktycznie niemożliwa.

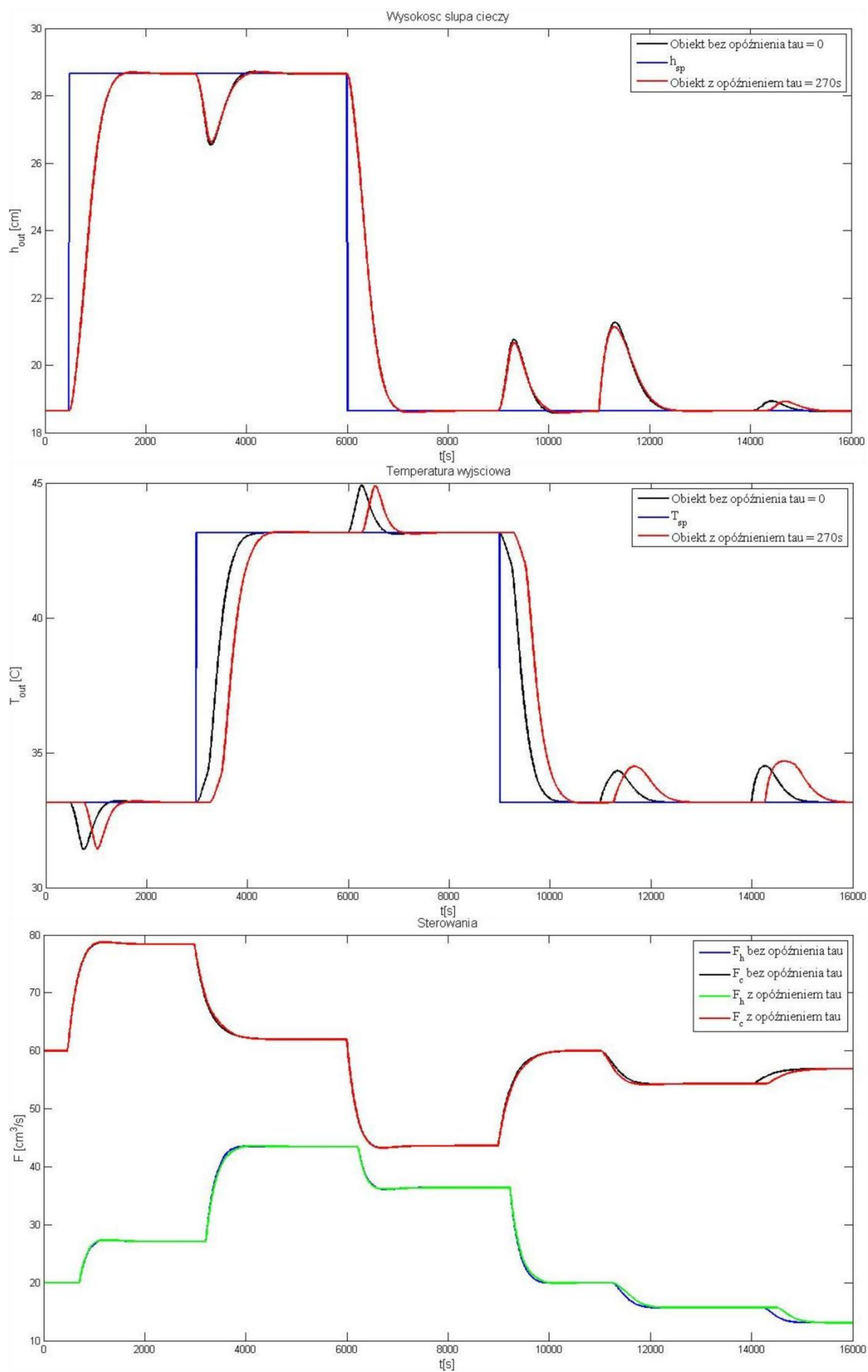


Rysunek 7 Porównanie przebiegów regulacji w zależności od horyzontu sterowania.

Horyzont sterowania wpływa na jakość regulacji jedynie przy już bardzo małych wartościach. Zmiany są zauważalne przy horyzoncie mniejszym niż 5. Dla jak najlepszych wyników regulacji przyjęto horyzont sterowania równy 20.

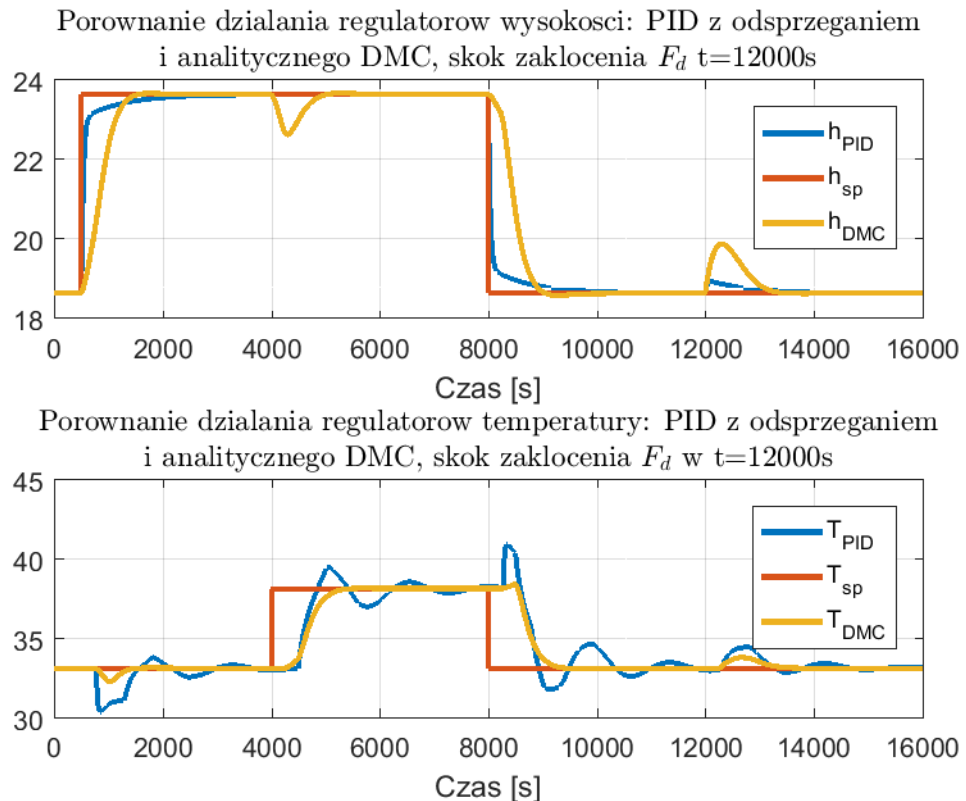
11.3. Analiza wpływu likwidacji opóźnienia na wyjściu T_{out} na przebieg regulacji

Przeprowadzono również analizę analogiczną jak dla układu regulacji PI/PID w punkcie 10. Dla obiektu bez opóźnienia przetestowano regulator DMC. Zmieniano współczynnik λ regulatora, aby polepszyć jakość regulacji. Z przeprowadzonych badań wynika, że najlepszą regulację uzyskano dla tych samych nastaw, co dla regulatora dla obiektu z opóźnieniem na wyjściu T_{out} . Oznacza to, że opóźnienie na sygnale wyjściowym nie ma znaczącego wpływu na działanie regulatora DMC. Jedynie można zaobserwować przesunięcie przebiegu o wartość opóźnienia na wyjściu sygnału T_{out} .



Rysunek 8 Porównanie przebiegów regulacji w zależności od opóźnienia na sygnale wyjściowym T_{out} .

11.4. Porównanie regulacji za pomocą analitycznego algorytmu DMC z dwupętlowym układem regulacji PI/PID.



Rysunek 9 Porównanie przebiegów regulacji z wykorzystaniem algorytmu DMC oraz PID.

W przypadku regulacji wysokości przebiegi regulacji PID i DMC są zbliżone. Regulator PID dobrze reguluje wysokość. Radzi sobie nawet lepiej niż regulator DMC analityczny dzięki członom odsprzegającym. Przy zmianie wartości zadanej wysokości czas, po którym osiągnięty zostanie stan ustalony jest podobny dla obu algorytmów. Dodatkowo PID dla regulacji wysokości ma lepszą reakcję na zakłócenie.

Natomiast regulacja temperatury jest zdecydowanie lepsza dla algorytmu DMC. Spowodowane jest to opóźnieniem na wyjściu sygnału T_{out} . Dla regulatora DMC występowanie takiego opóźnienia nie jest problemem i doskonale sobie radzi z regulacją zarówno przy zmianach wartości zadanej, jak i przy wystąpieniu zakłócenia. Regulator PID znacznie gorzej radzi sobie z regulacją temperatury. Występujące opóźnienie nie pozwala na szybką regulację i jest przyczyną występowania znacznego przeregulowania oraz oscylacji. Dla tego przypadku dobrze widać przewagę w jakości regulacji algorytmu DMC nad algorytmem PID.

12. Numeryczny regulator predykcyjny DMC

Zaprojektowany regulator numeryczny DMC bazuje na tych samych danych wejściowych (tej samej odpowiedzi skokowej). Różnica pomiędzy regulatorem numerycznym, a analitycznym polega na tym, że regulator numeryczny uwzględnia ograniczenia sterowania, przyrostów sterowania oraz wyjścia. Algorytm regulatora numerycznego DMC polega na rozwiązaniu zadania optymalizacji przy każdej interwencji regulatora.

$$\min_{\Delta U(k)} \{ \|Y^{zad}(k) - Y^0(k) - M\Delta U(k)\|_{\psi}^2 + \|\Delta U(k)\|_{\lambda}^2 \}$$

z ograniczeniami: $u_{\min} \leq u(k+p|k) \leq u_{\max}, p = 0, \dots, N_u - 1$

$$-\Delta u_{\max} \leq \Delta u(k+p|k) \leq \Delta u_{\max}, p = 0, \dots, N_u - 1$$

$$y_{\min} \leq y^0(k+p|k) + M_p \Delta U(k) \leq y_{\max}, p = 0, \dots, N_u - 1$$

Zadanie to sprowadzono do postaci standardowej dla zadania programowania kwadratowego.

$$\min \{ J(x) = \frac{1}{2} x^T H x + f^T x \}$$

$$\text{z ograniczeniami: } x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, \\ Ax \leq b$$

Przyjmując $x = \Delta U(k)$ przekształcono odpowiednio zapis funkcji celu i ograniczeń i wyznaczono poszukiwane parametry H , f , x_{\min} , x_{\max} , A i b .

Parametry regulatora nastawiono na takie same wartości jak dla regulatora analitycznego.

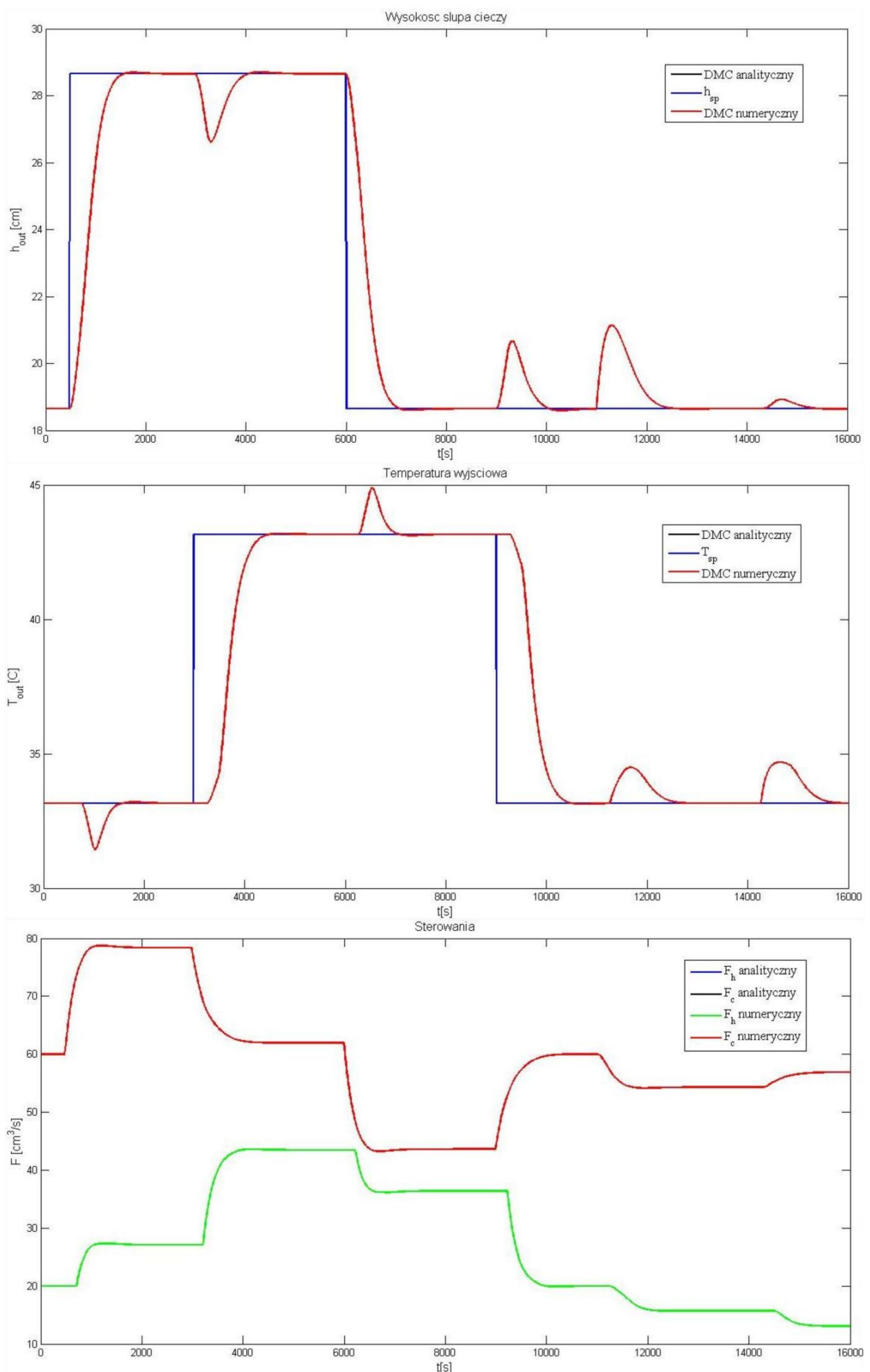
Porównanie regulatora DMC analitycznego i numerycznego zostanie przeprowadzone dla różnych wartości ograniczeń. Przebieg symulacji będzie miał taki sam charakter jak zastosowany w poprzednim rozdziale.

dla pierwszego porównania przyjęto następujące ograniczenia:

$$F_{C\max} = 100 \frac{cm^3}{s}, F_{C\min} = 0 \frac{cm^3}{s}, F_{H\min} = 0 \frac{cm^3}{s}, F_{H\max} = 80 \frac{cm^3}{s}, \Delta U_{\max} = 1 \frac{cm^3}{s},$$

$$h_{out\min} = 0 \text{ cm}, h_{out\max} = 40 \text{ cm}, T_{out\min} = 10^\circ C, T_{out\max} = 60^\circ C.$$

Dla przyjętych powyższych ograniczeń regulacja z wykorzystaniem obu algorytmów regulacji jest taka sama. Brak różnic wynika z tego, że ograniczenia nie są przekraczane w żadnej z zaistniałych sytuacji podczas symulacji pracy obiektu.

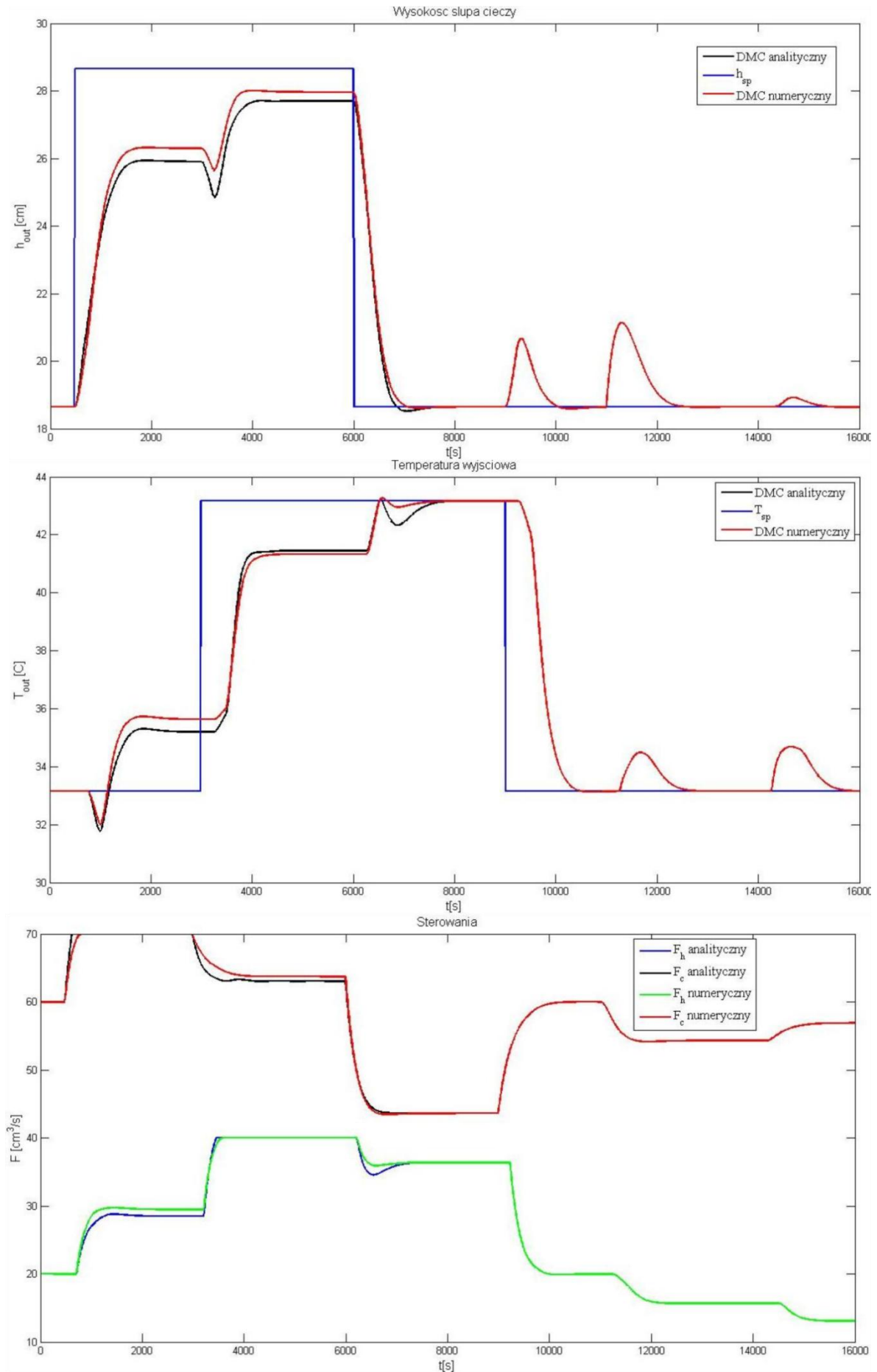


Rysunek 10 Porównanie regulacji za pomocą algorytmu DMC analitycznego i numerycznego.

W celu zauważenia różnicy pomiędzy algorytmami zmniejszono ograniczenia:

$$F_{Cmax} = 70 \frac{cm^3}{s}, F_{Cmin} = 0 \frac{cm^3}{s}, F_{Hmin} = 0 \frac{cm^3}{s}, F_{Hmax} = 40 \frac{cm^3}{s}, \Delta U_{max} = 1 \frac{cm^3}{s},$$

$$h_{out\ min} = 0\ cm, h_{out\ max} = 40\ cm, T_{outmin} = 10^\circ C, T_{outmax} = 60^\circ C.$$



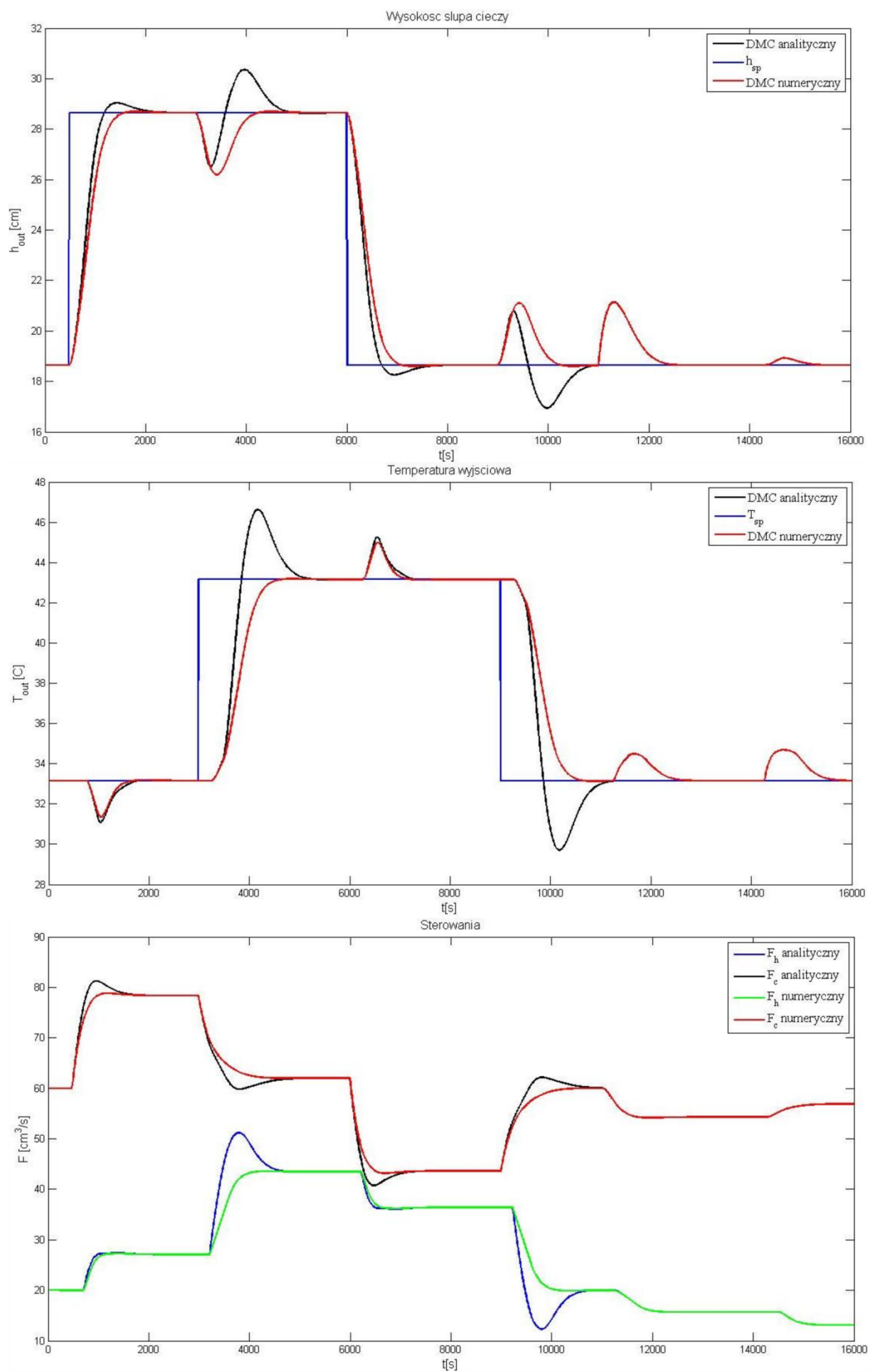
Rysunek 11 Porównanie regulacji za pomocą algorytmu DMC analitycznego i numerycznego.

W związku z tym, że w czasie pracy regulatora praktycznie przeregulowania nie występują, trudno zauważyć różnicę w działaniu obu regulatorów stosując takie ograniczenia aby regulacja była prawidłowa. Dlatego zdecydowano się wprowadzić ograniczenia, które uniemożliwiają osiągnięcie niektórych stanów, jednak pozwalają zauważyć różnicę w działaniu regulatorów. Na rysunku 11 widać, że regulator numeryczny lepiej sobie radzi z regulacją obiektu w takich warunkach niż regulator analityczny.

Dla porównania regulatorów pod kątem ograniczeń przyrostów sterowania wprowadzono następujące ograniczenia:

$$F_{Cmax} = 100 \frac{cm^3}{s}, F_{Cmin} = 0 \frac{cm^3}{s}, F_{Hmin} = 0 \frac{cm^3}{s}, F_{Hmax} = 80 \frac{cm^3}{s}, \Delta U_{max} = 0.3 \frac{cm^3}{s}, \\ h_{out\ min} = 0\ cm, h_{out\ max} = 40\ cm, T_{outmin} = 10^{\circ}C, T_{outmax} = 60^{\circ}C.$$

Dla tego przypadku zarejestrowano znacznie lepszą regulację dla regulatora numerycznego. Regulator numeryczny uwzględnia ograniczenia przyrostu sterowania i odpowiednio reaguje, jego właściwości regulacji niewiele się różnią od tej dla obiektu bez ograniczeń. Natomiast regulator analityczny jest bardzo wrażliwy na wprowadzane ograniczenia przyrostów sterowania. Powstają znaczne przeregulowania, wydłuża się czas regulacji oraz regulator wykorzystuje większe wartości sterowania w trakcie regulacji.



Rysunek 12 Porównanie regulacji za pomocą algorytmu DMC analitycznego i numerycznego przy zmianie ograniczenia przyrostu sterowania.