

# Sprawozdanie z laboratorium DCS nr 345

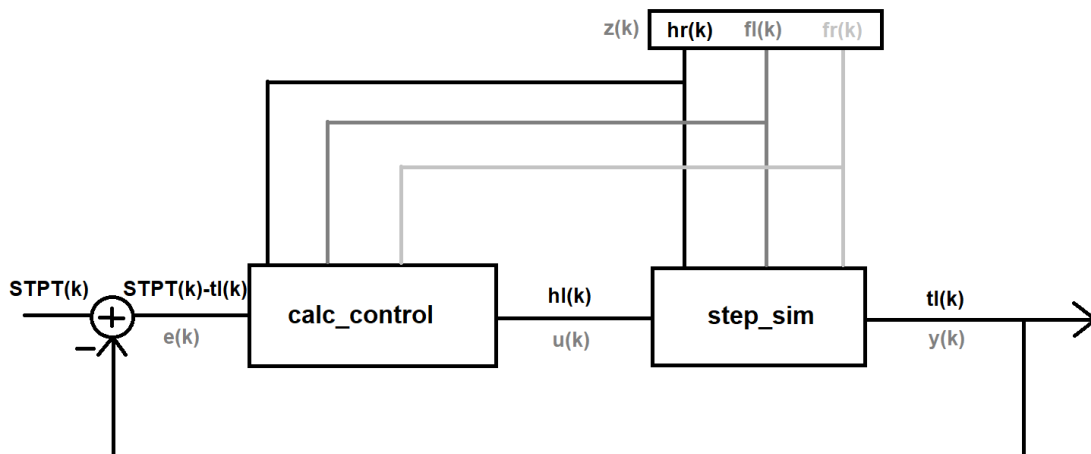
Grupa laboratoryjna nr 1 - Michał Kolankiewicz, Michał Rejer, Łukasz Tumialis; pod przewodnictwem dr inż. Sebastiana Plamowskiego

## 1. Wprowadzenie:

Celem laboratorium jest regulacja symulowanego systemu grzewczego, składającego się z dwóch grzałek i dwóch wentylatorów. Cały system zbudowany jest na przestrzeni kilku plików MATLAB, z czego naszym zadaniem było napisanie pliku „calc\_control.m”, który odpowiada za obliczenie sterowania na lewej grzałce. Sterowania zarówno prawej grzałki i wentylatorów traktowane są w tym układzie jako mierzalne zakłócenia, których wpływ na temperaturę lewej strony systemu należy możliwie zminimalizować na przestrzeni symulacji. Sterowania na grzałkach są liczbami rzeczywistymi z przedziału 0-100, a sterowania na wentylatorach z przedziału 30-100. Kryterium oceny zadania jest możliwie najmniejszy błąd średniokwadratowy w całym czasie trwania symulacji.

## 2. Analiza problemu:

Strukturę programu można wizualizować poniższym rysunkiem:

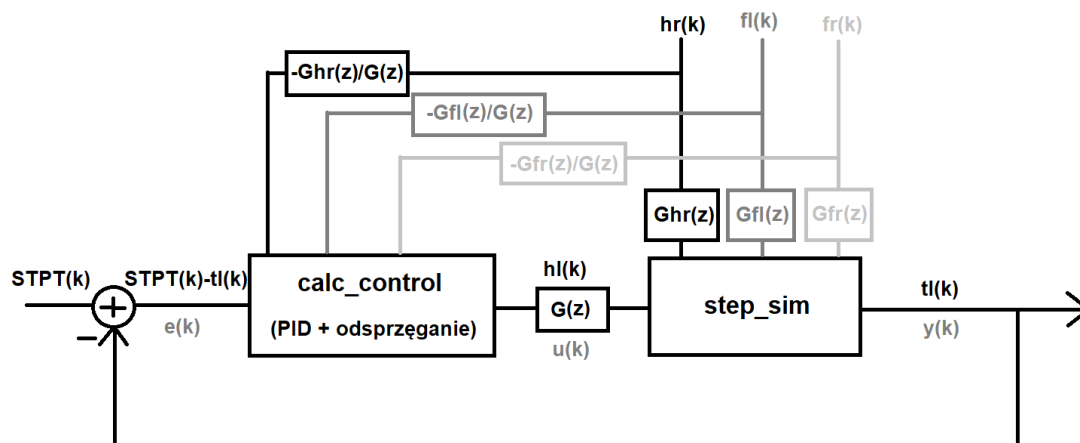


Z powyższego rysunku widać, że schemat ten to schemat typowego dyskretnego układu regulacji ze sprzężeniem zwrotnym i zakłóceniami. Różnica  $STPT-tl$  w danej chwili  $k$  to uchyb ustalony układu  $e(k)$ ,  $hl$  („grzałka lewa”) to sterowanie obiektu  $step\_sim$   $u(k)$ , a  $tl$  to wyjście układu  $y(k)$ . Można zauważyć, że funkcja  $calc\_control$  przyjmuje pięć argumentów - wejście układu  $STPT$  („setpoint”), wyjście układu  $tl$  („temperatura lewa”) oraz trzy zakłócenia  $hr$  („grzałka prawa”),  $fl$  („wentylator lewy”) i  $fr$  („wentylator prawy”).

## 3. Dekompozycja problemu:

$Calc\_control$  można zrealizować za pomocą dyskretnego regulatora PID z członami odsprężającymi do zakłóceń  $hr$ ,  $fl$ ,  $fr$ . W tym celu potrzebowalibyśmy zbadać jakie są

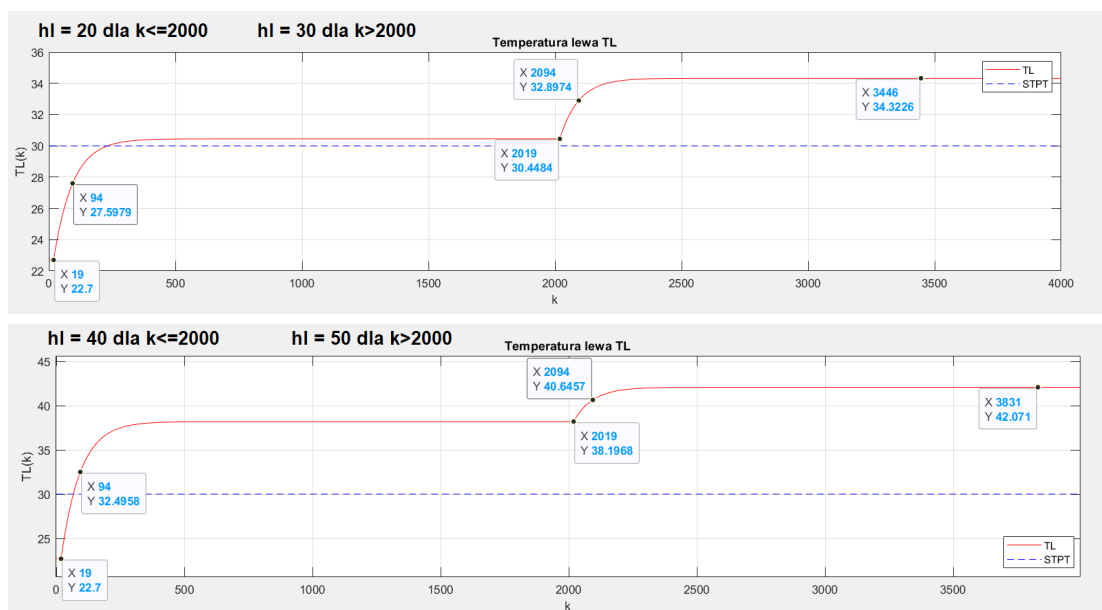
transmitancje zarówno regulatora na wyjście, jak i zakłóceń na wyjście. Wtedy w strukturze otwartej regulatora („feedforward”) można obliczyć transmitancję kompensującą zakłócenia i skupić się na regulacji PIDa, oczywiście pod warunkiem, że układ jest liniowy. W przeciwnym wypadku, powyższą metodologię można przeprowadzić dla pewnych punktów pracy stosując przybliżenie, że w danym punkcie pracy układ działa liniowo.

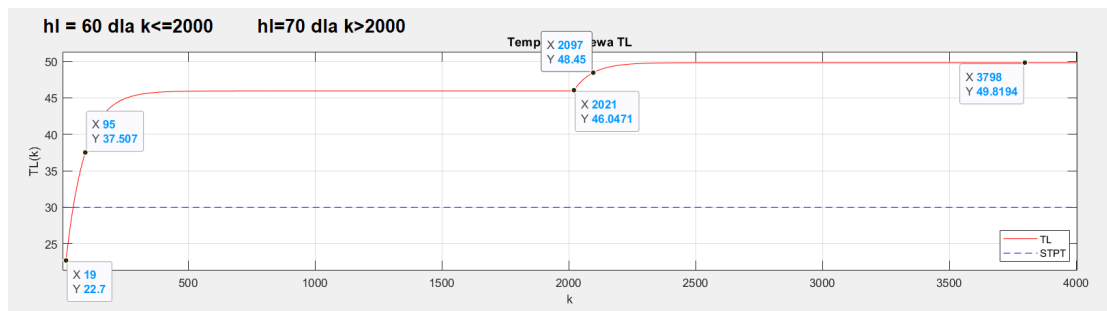


#### 4. Analiza symulatora - transmitancja sterowania hl:

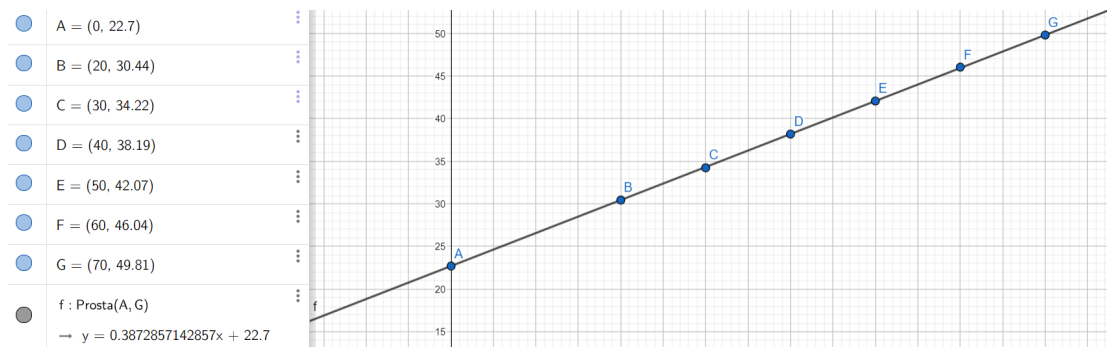
W celu zbadania transmitancji różnych sygnałów, będziemy wyłączać część zakłóceń i badać, jak zakłócenie wpływa na wyjście układu. Zaczniemy od samego sterowania hl. Już w tym momencie widać, że jeśli chcemy, aby funkcja calc\_control mogła odpowiednio reagować na to, co dzieje się w symulacji w danej chwili (albo działa), potrzebujemy pamięci, która by przechowywała informacje o dotychczasowych sterowaniach, zakłóceniach oraz liczniku czasu.

Na początek zminimalizujemy wszystkie możliwe zakłócenia:  $hr = 0$ ,  $fl = fr = 30$  i zobaczymy, jak wyglądają przebiegi temperatury lewej dla skoków sterowania na różnych jego poziomach.





Wykresy przebiegów temperatury zależne od wysokości sterowania hl dla zminimalizowanych zakłóceń.



Wykres zależności temperatury w stanie ustalonym od sterowania hl.

Z powyższych wykresów można wyciągnąć kilka następujących wniosków:

- układ reaguje z opóźnieniem 19s na zmiany sterowania,
- wzmacnienie układu po ustaleniu liniowo zależy od sterowania,
- ponieważ układ w tym przypadku jest liniowy, można dla dowolnego sterowania hl określić jego transmitancję,
- odpowiedź układu na skok jednostkowy przypomina wykres  $K \cdot u \cdot (1 - e^{-t/\tau})$ ,
- transmitancję sterowania można przedstawić jako człon jednoinercyjny:  $K/(Ts+1)$

Na powyższych wykresach na każdym "łuku" zaznaczone są wartości na poziomie  $\sim 63,2\%$  wzmacnienia  $(1 - 1/e)$ . Osiągane są one po czasie w uśrednieniu równym stałej czasowej transmitancji  $T=75$ . Wzmacnienie układu będzie równe różnicy temperatur dzielonej na różnicę sterowania  $K=(T(\text{inf})-T(0))/u_0$ , ok.  $K=0,387$  (pokrywa się ze współczynnikiem "a" funkcji liniowej określającej zależność  $tl(hl)$ ). Do transmitancji trzeba będzie również doliczyć człon opóźniający  $e^{-(s \cdot T_0)}$ , gdzie " $T_0$ " to czas opóźnienia 19 sekund.

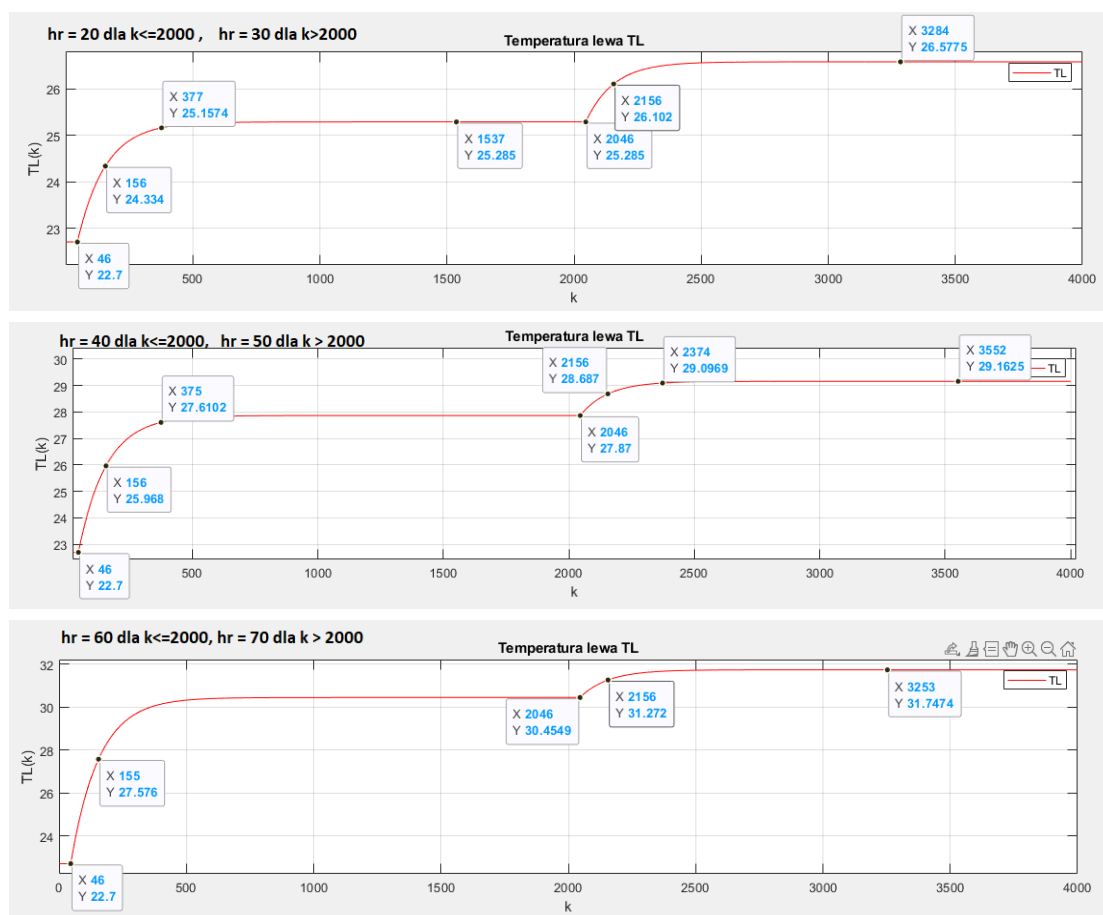
Transmitancja sterowania hl wynosi zatem:

$$G_{hl}(s) = \frac{0,387 \cdot e^{-19s}}{75s+1}$$

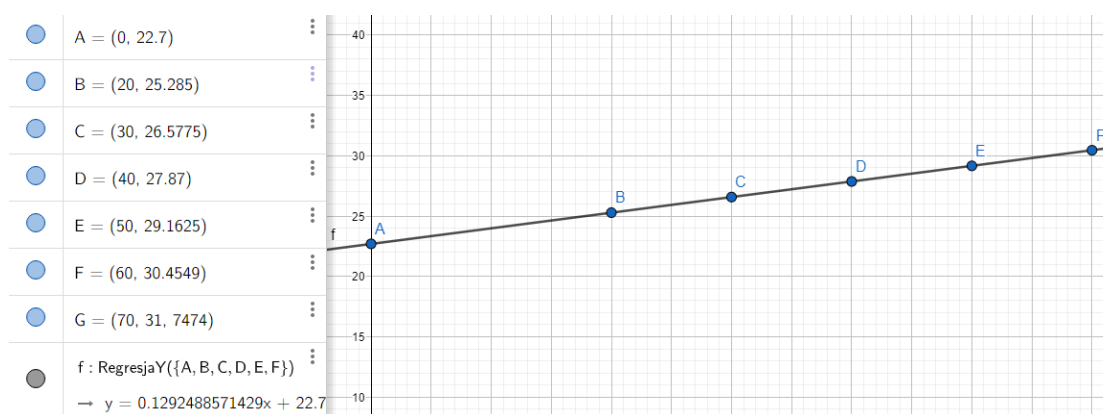
W późniejszej części sprawozdania potrzebne transmitancje oszacowane dla czasu ciągłego przekształcimy na transmitancje dyskretne i równania różnicowe stanu.

## 5. Analiza symulatora - transmitancja zakłócenia hr:

Podczas badania transmitancji hr zastosowane zostało analogiczne podejście jak w poprzednim podpunkcie. Poniższe wykresy osiągnięto dla  $h_l = 0$ ,  $f_l = f_r = 30$ .



Wykresy przebiegów temperatury zależne od wysokości zakłócenia hr dla zminimalizowanych zakłóceń i sterowania..



Wykres zależności temperatury w stanie ustalonym od zakłócenia hr.

Na wykresach przedstawiających przebiegi tl zaznaczono punkty w których nastąpiła reakcja na zmianę hr oraz dla których zmiana tl wyniosła odpowiednio 63.2% i 95% wartości ustalonej. Kolejne wartości tl dla 63.2% i 95% wartości ustalonej osiągane są po ok. 110 i 330 sekundach. Wzmocnienie wyznaczone za pomocą linii regresji wyniosło ok. 0.12925.

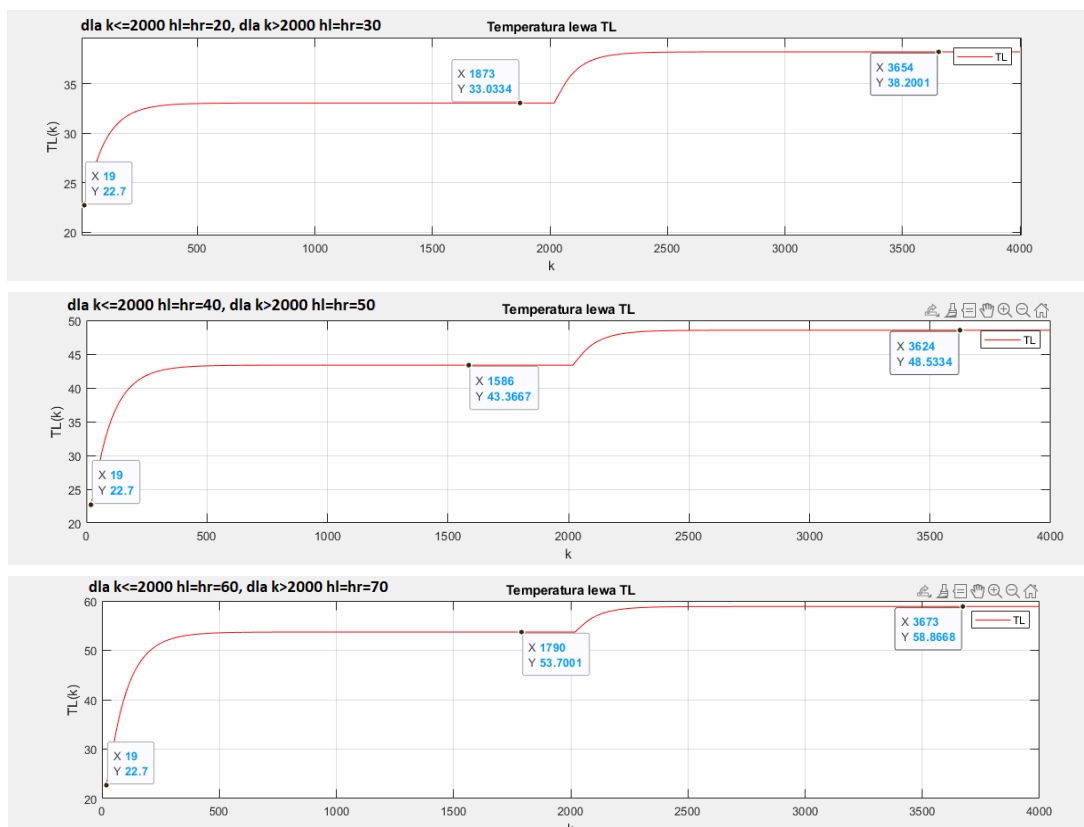
Z powyższych wykresów można wyciągnąć kilka następujących wniosków:

- układ reaguje z opóźnieniem 46s na zmiany zakłócenia hr,
- wzmocnienie układu po ustaleniu liniowo zależy od zakłócenia hr,

- ponieważ układ w tym przypadku jest liniowy, można dla dowolnego zakłócenia hr określić jego transmitancję,
- transmitancję sterowania można przedstawić jako człon jednoinercyjny  $K/(Ts+1)$  ze stałą czasową T wynoszącą ok. 110

$$G_{hr}(s) = \frac{0,129 \cdot e^{-46s}}{110s+1}$$

## 6. Analiza zależności między hl a hr:

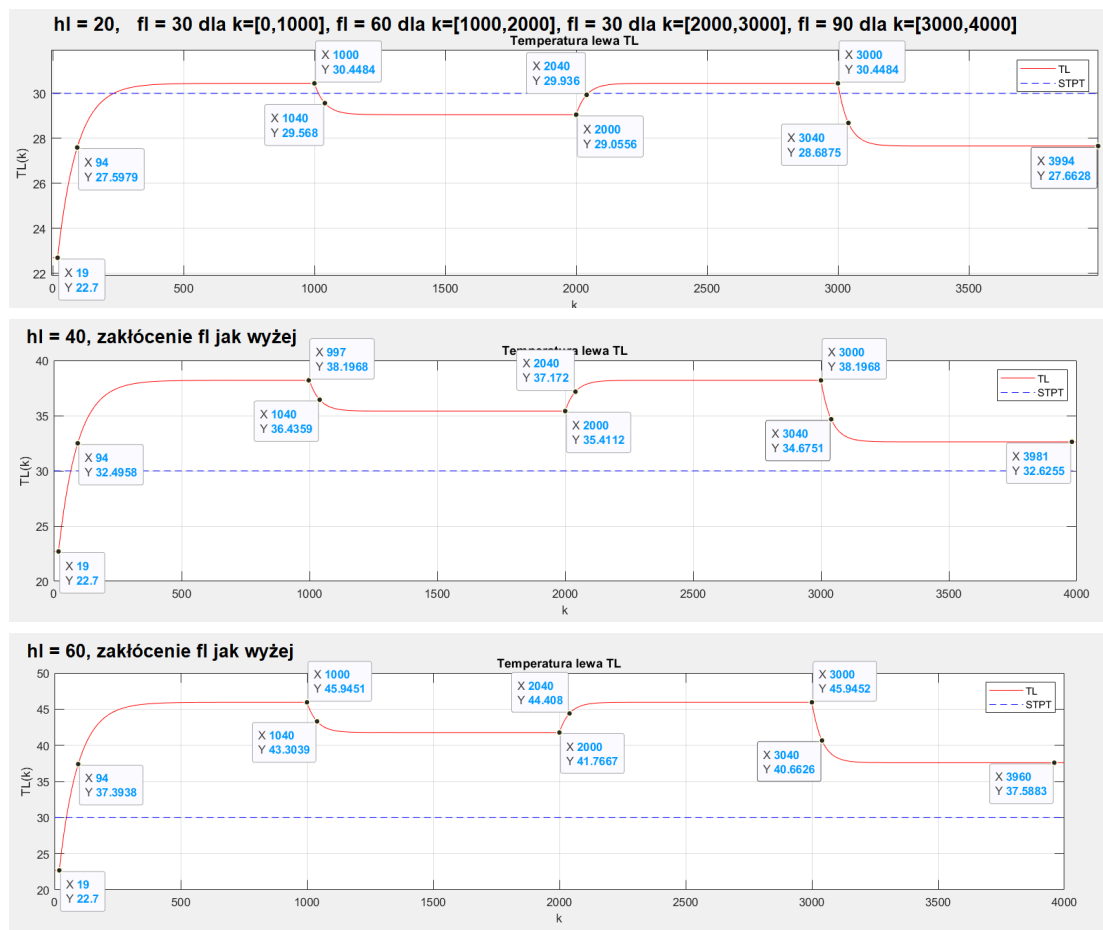


Wartość sygnału\sygnał	Δtl (hl)	Δtl(hr)	Δtl(hl+hr)	Δtl (hl)+ Δtl(hr) -Δtl(hl+hr)
20	7.7484	2.585	10.3334	0
30	11.6226	3.8775	15.5001	0
40	15.4968	5.17	20.6667	0.0001
50	19.371	6.4625	25.8334	0.0001
60	23.3471	7.7549	31.0001	0.1019
70	27.1194	9.0474	36.1668	0

Jak widać z powyższej tabeli porównującej sumę oddzielnych wpływów na temperaturę i wpływu łącznego obie grzałki dla jednakowych wartości wentylatorów są praktycznie niezależne.

## 7. Analiza symulatora - transmitancja zakłócenia fl:

W celu zbadania wpływu zakłócenia fl na temperaturę po lewej stronie zobaczmy, jak zachowują się przebiegi temperatury dla stałych sterowań hl i różnych przebiegów zakłócenia fl. Pozostałe dwa zakłócenia zostają zminimalizowane.



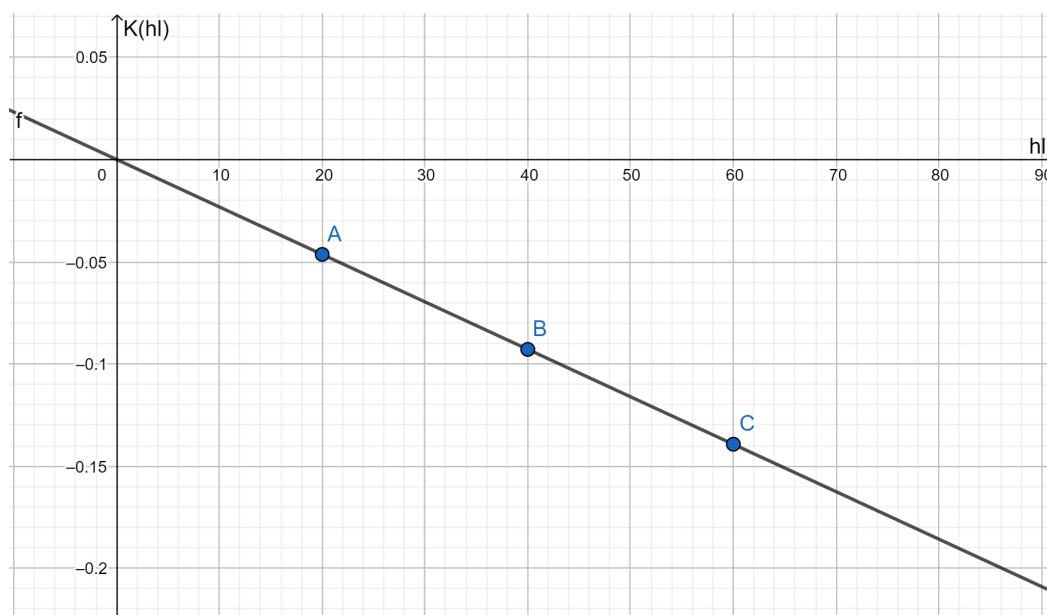
Wykresy przebiegów temperatury tl zależne od stałego sterowania i zmiennego zakłócenia fl.

Z powyższych wykresów można wyciągnąć kilka wniosków:

- reakcja temperatury na zmianę zakłócenia fl przypomina odpowiedź członu jednoinercyjnego,
- reakcja na zakłócenie występuje bez opóźnienia,
- dla stałego sterowania spadek temperatury zależy liniowo od zmiany zakłócenia (w każdym przypadku zmiana zakłócenia z 30 na 90 powodowała dwukrotnie większy spadek temperatury, niż zmiana zakłócenia z 30 na 60),
- mimo to spadek temperatury spowodowany stałą zmianą zakłócenia (np. z 30 na 60) nie jest taki sam dla żadnego stałego sterowania (zwiększenie zakłócenia powoduje większy ubytek temperatury dla wyższego sterowania) - dla skoku zakłócenia z 30 na 60 spadek temperatury wynosił odpowiednio dla sterowań hl=20, hl=40 i hl=60 około 1.3928, 2.7856, 4.1784 (ciąg arytmetyczny!)
- spadek temperatury dla ustalonego zakłócenia fl liniowo zależy od sterowania hl!

Powyższy zestaw wniosków pozwala nam na przybliżenie transmitancji zakłócenia  $f_l$  poprzez człon jednoinercyjny, gdzie nie ma opóźnienia, stała czasowa jest w każdym przypadku taka sama  $T=40$ , a wzmocnienie można określić dla dowolnego punktu pracy  $hl$  poprzez funkcję liniową  $K(hl)$ .

- $K(hl=20) = -1,3928/30 = -0,0464$
- $K(hl=40) = -2,7856/30 = -0,0929$
- $K(hl=60) = -4,1784/30 = -0,1393$



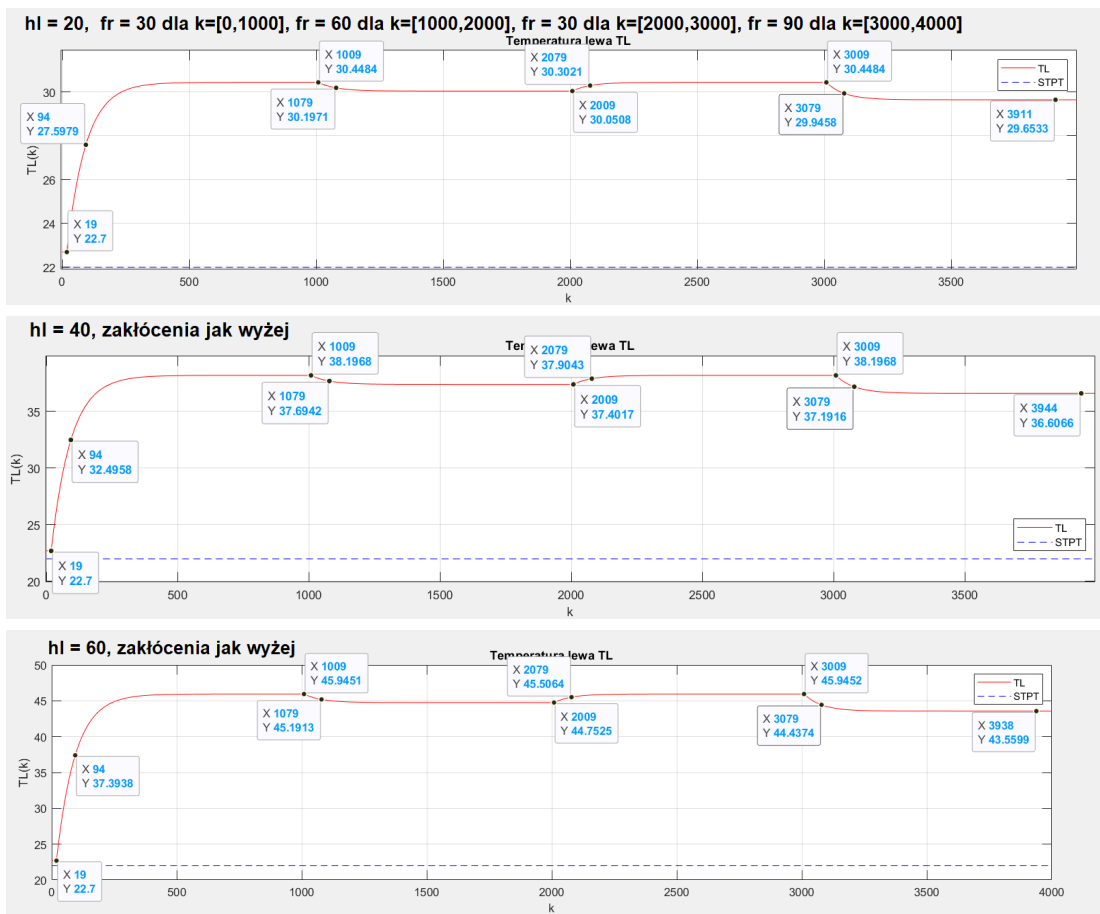
Wykres liniowości wzmocnienia transmitancji lewego wentylatora od sterowania.

Zatem transmitancja lewego wentylatora:

$$G_{fl}(s) = \frac{K}{40s+1}, K = -0,0023225 \cdot hl$$

## 8. Analiza symulatora - transmitancja zakłócenia $f_r$ :

W celu analizy wpływu prawego wentylatora na temperaturę lewą zrobimy analogiczne doświadczenie do wentylatora prawego - jak można się spodziewać, dostaniemy podobne wnioski, lecz z innymi liczbami.



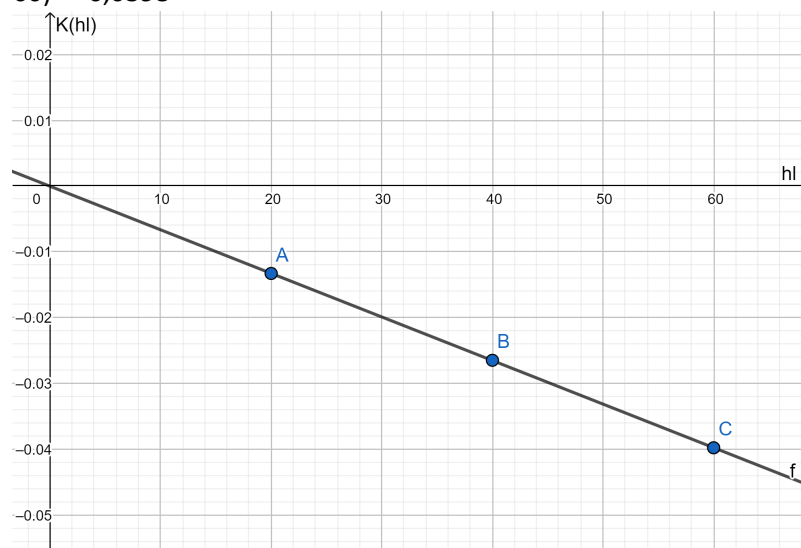
Wykresy przebiegów temperatury tl zależne od stałego sterowania i zmiennego zakłócenia fr

Jak zatem można było przypuszczać - z tych wykresów można wyciągnąć podobne wnioski, jak z eksperymentu z lewym wentylatorem, z tą różnicą, że tutaj występuje opóźnienie i oczywiście wzmocnienie i stałą czasową mają inne wartości. Stała czasowa  $T=70$ , opóźnienie  $T_o = 9$ , wzmocnienie:

$$K(hl=20) = (t_2 - t_1) / \Delta hr = (30,0508 - 30,4484) / 30 = -0,0133$$

$$K(hl=40) = -0,0265$$

$$K(hl=60) = -0,0398$$



Wykres liniowości wzmocnienia transmitancji prawego wentylatora od sterowania.



Zatem transmitancja prawego wentylatora:

$$Gfr(s) = \frac{K \cdot e^{-9s}}{70s+1}, K = -0,0006625 \cdot hl$$

## 8. Z transmitancji w czasie ciągłym do równań różnicowych:

Jak łatwo zauważyć, wszystkie obliczone transmitancje do tej pory były wyrażone postacią  $K \cdot e^{-(sT_o)}/(Ts+1)$ . Naszym celem jest teraz znalezienie transmitancji członów odsprężających (patrz rysunek w rozdziale 3.) by na ich podstawie umieć wyznaczyć odpowiednie równania różnicowe, które posłużą do kompensacji wpływu zakłóceń na obiekt step\_simulator.

Do tej pory wyznaczone transmitancje w czasie ciągłym dzieliliśmy w odpowiedni dla sprzężenia "feedforward" sposób, z tego ilorazu obliczyliśmy transmitancję w postaci zespolonej, po czym z każdej transmitancji zespolonej przy użyciu odwrotnej transformaty "Z" udało nam się wyznaczyć odpowiednie równania różnicowe.

$$HL(k) = \alpha \cdot HL(k-1) - \frac{15}{66} \cdot HR(k-27) + \frac{22\alpha-7}{66} \cdot HR(k-28)$$

$$HL(k) = \beta \cdot HL(k-1) - \frac{15K}{3.096} \cdot FL(k+19) + \frac{7K+8\beta K}{3.096} \cdot FL(k+18)$$

$$HL(k) = \gamma \cdot HL(k-1) - \frac{15K}{5.418} \cdot FR(k+10) + \frac{15K+14K(1-\gamma)}{5.418} \cdot FL(k+9)$$

gdzie  $\alpha = \exp(-1/110)$ ;  $\beta = \exp(-1/40)$ ;  
 $\gamma = \exp(-1/70)$ ;  
 $K = \text{wzmocnienie zakłócenia w funkcji } K(HL)$

Co zasługuje na zwrócenie uwagi to to, że dwa z tych równań są nierealizowalne w sposób bezpośredni na danym systemie, ponieważ wymagają wiedzy z chwil następnych - opóźnienie sterowania jest większe niż zakłóceń spowodowanych wentylatorami, więc wentylatory mają pewien przedział czasowy, podczas którego sterowanie nie może skompensować ich wpływu - dla wentylatora lewego jest to 19 sekund, dla prawego 10.

Co możemy najlepszego zrobić, to potraktować dane zakłócenie w taki sposób, jakby pojawiło się w chwili obecnej i należy je skompensować dla obecnej chwili. Równania zastosowane już w MATLABie wykorzystują zatem dane zakłóceń z chwili obecnej i poprzedniej, a nie przyszłej o kilkanaście sekund, bo jest to po prostu niemożliwe bez wiedzy o tym, jak będzie wyglądać przebieg symulacji. Niestety w takim przypadku nie możemy mówić o idealnej kompensacji, ponieważ przez czas kilkunastu sekund zakłócenie to spowoduje już wymierną różnicę w wyjściu układu i członów te będą bardziej wspierać PIDa, niż wyzerowywać zakłócenie, które już zdążyło zaistnieć w systemie. Poniższe równania pozostaną w naszym kodzie jako rys historyczny naszych dotychczasowych działań oraz dlatego, że mimo wszystko mają pozytywny wpływ (choć nieporównywalnie mniejszy niż idealne odsprężanie zakłócenia prawej grzałki) na regulowanie układu.

$$HL(k) = \alpha \cdot HL(k-1) - \frac{15}{66} \cdot HR(k-27) + \frac{22\alpha-7}{66} \cdot HR(k-28)$$

$$HL(k) = \beta \cdot HL(k - 1) - \frac{15K}{3.096} \cdot FL(k) + \frac{7K+8\beta K}{3.096} \cdot FL(k - 1)$$

$$HL(k) = \gamma \cdot HL(k - 1) - \frac{15K}{5.418} \cdot FR(k) + \frac{15K+14K(1-\gamma)}{5.418} \cdot FL(k - 1)$$

## 9. O regulatorze PID:

Część kodu związana z regulatorem PID będzie realizowana w sposób analogiczny do tego, jak wygląda struktura PIDa w typowym regulatorze z czasem ciągłym. Ponieważ mimo wszystko mamy do czynienia z dyskretyzacją (jedna próbka na sekundę), w naszej strukturze użyjemy dyskretnych ekwiwalentów całki i różniczki występującej czasie ciągłym.

Według tego całka to suma wszystkich dotychczasowych uchybów, a różniczka to różnica uchybu obecnego i poprzedniego (dzielona na czas próbkowania równy 1). Każdy ze składników jest odpowiednio przemnożony przez odpowiednią stałą. Sposób wyboru stałych regulatora w dużej mierze będzie opierać się na naszej eksperymentacji i drobnych zmianach, które nas stopniowo przybliżą do stosownego wyregulowania.

## 10. Realizacja i omówienie kodu:

Do tej pory udało nam się wypracować teoretycznie formułę na możliwie optymalne sterowanie układem wraz z kompensowaniem pojawiających się zakłóceń. Dotychczas podjęte przez nas działania zapisaliśmy w formie kodu w MATLABie w następujących sekcjach:

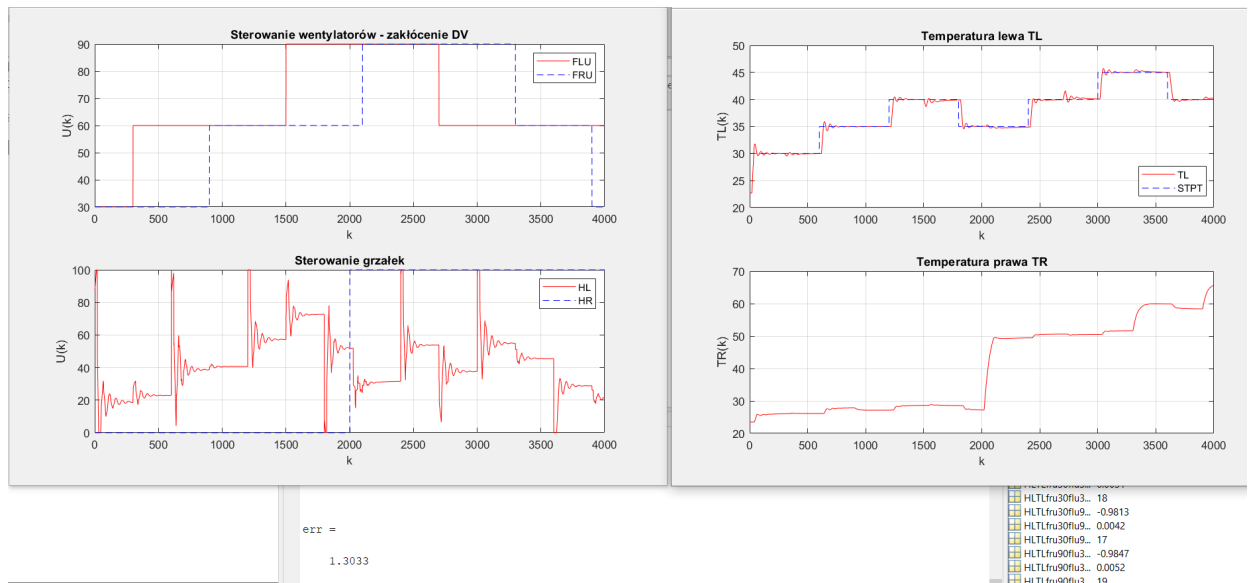
- pamięć kodu (przechowywanie argumentów ze wszystkich poprzednich chwil i dodatkowych informacji, np. o aktualnej chwili, o poprzednich wartościach odsprzęgań);
- formuły na sterowanie regulatorem PID (kalkulacja całki i różniczki) z wydzielonymi stałymi do łatwiejszego ich zmieniania (już teraz określamy sterowanie PIDa, ponieważ wzmocnienia transmitancji wentylatorów zależą od aktualnego sterowania PIDa z wyłączeniem członów odsprzęgających),
- równania członów odsprzęgających, liczących dodatkowe sterowanie zależne od zakłóceń (wg. równań z poprzedniego rozdziału),
- zsumowanie wszystkich sterowań (PID + odsprzęganie),
- ograniczenie sterowania do przedziału 0-100 i aktualizacja licznika czasu i pamięci.

## 11. Uzyskane wyniki:

Do zadania podeszliśmy dwa razy mając różne cele. Za pierwszym podejściem chcieliśmy możliwie zminimalizować błąd średniokwadratowy nie zważając na chaotyczność sterowania, przeregulowania, etc. W tej realizacji kodu użyliśmy wszystkich członów odsprzęgających oraz ustawiliśmy "ostre" parametry na naszym PIDzie, dokładniej:

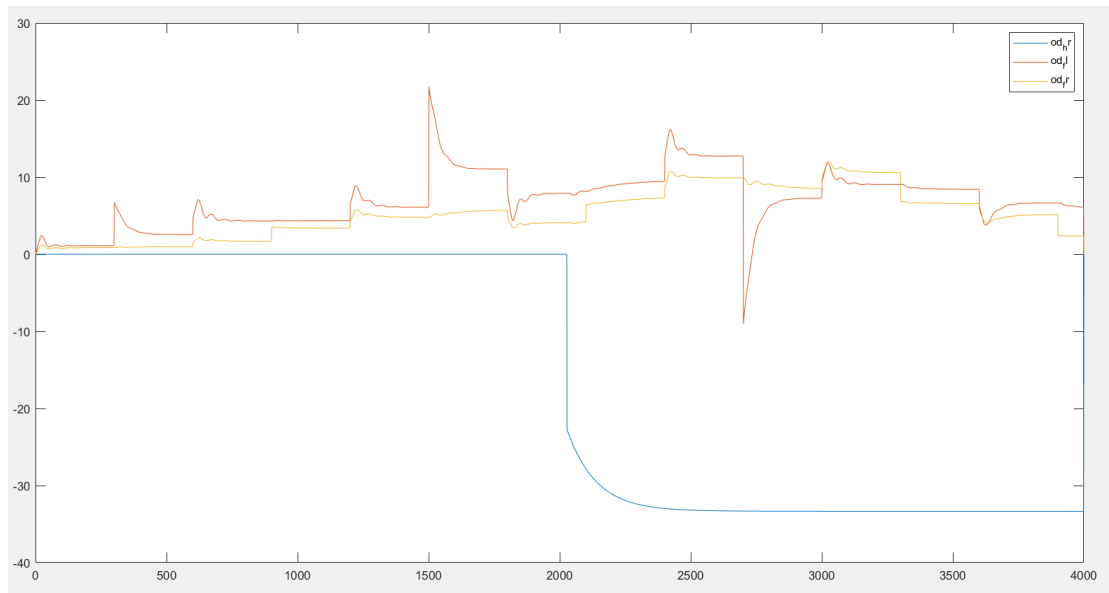
```
K_linear = 12;
K_integral = 0.1;
K_derivative = 117;
```

Przy tym sterowaniu udało nam się osiągnąć błąd średniokwadratowy **err = 1.3033**



Przebieg symulacji przeprowadzonej pod kątem możliwej minimalizacji błędu średniokwadratowego.

\_\_\_\_ Za drugim razem postanowiliśmy zadbać o to, by sterowanie grzałki nie było takie chaotyczne i potencjalnie niszczące dla układu. Postanowiliśmy zachować człony odprężające, ponieważ to nie dodają aż tak dużych impulsów do sterowania, które powodują te największe piki sterowania (są związane ze zmianą STPT - chwilami pojawiania się największych błędów spowodowanych opóźnieniem sterowania oraz ogólnie z definicji uchybu).

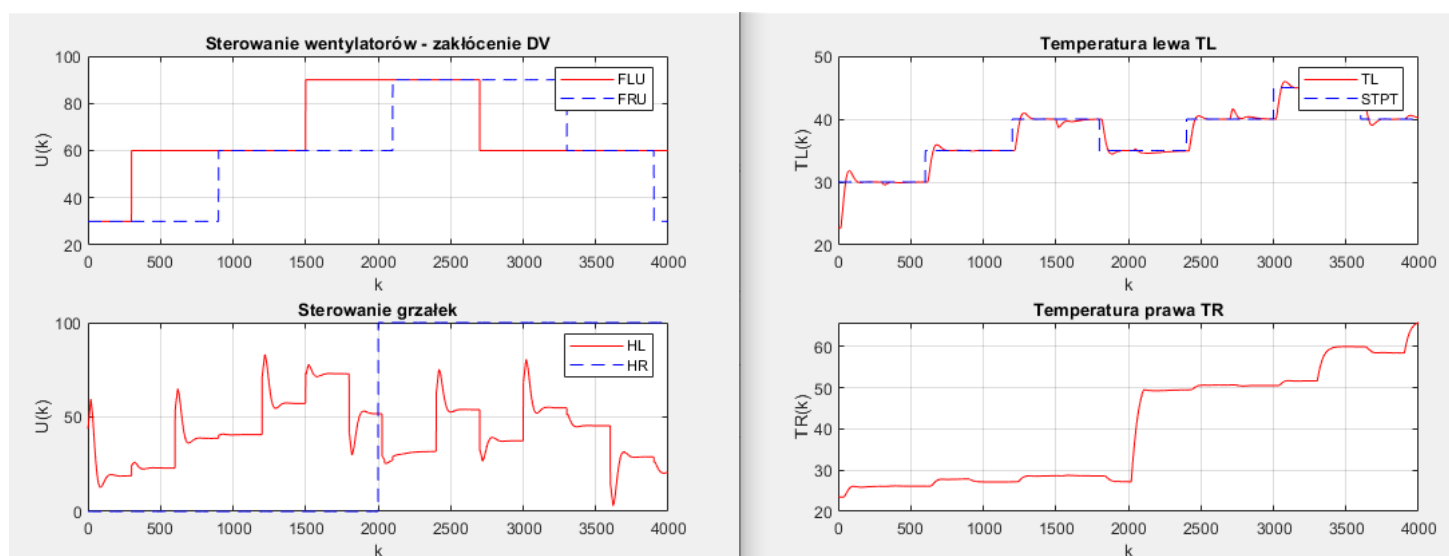


Odsprężania odpowiednich zakłóceń na system - te wartości są dodawane do sterowania z PIDa. Pojawiają się piki, jednak jedynie dwa są o różnicy w sterowaniu większej niż 20.

Do realizacji łagodnego sterowania nastawy PID wynosiły odpowiednio:

$K_{linear} = 6;$   
 $K_{integral} = 0.1;$   
 $K_{derivative} = 0.1;$

Przy takim sterowaniu błąd średniokwadratowy wyniósł  $err = 1.6180$  zapewniając przy tym znaczne ograniczenie oscylacji sygnału sterującego.



Przebieg symulacji przeprowadzonej pod kątem złagodzenia sterowania hl.

## 12. Podsumowanie:

Uważamy, że powyższe doświadczenie było całkiem udane. Jako cel początkowo przyjęliśmy sobie zminimalizować błąd do mniej niż 2, dlatego wynik 1.3033 naprawdę nas cieszy. W czasie tego laboratorium mieliśmy okazję realnie zajmować się identyfikacją pewnych systemów i odpowiednie dobranie sterowania dla niego zależnie od naszych potrzeb, czy jest nią minimalizacja błędu, czy możliwe łagodne sterowanie bez znacznej utraty jakości wyjścia. Nie zmienia to faktu, że w trakcie rozwiązywania tego zadania napotkaliśmy parę problemów, które być może można by rozwiązać w inny sposób.

Np. początkowo przyjęliśmy błędne założenie, że nasze sterowanie ma polegać wyłącznie na danych z chwili obecnej. Teraz widzimy, jak istotny jest w realnych systemach regulacji wgląd w pamięć dotychczasowego przebiegu. Innym problemem, jaki napotkaliśmy, którego nie udało nam się go rozwiązać w sposób idealny to odsprężania wentylatorów, gdzie zasadniczym problemem było opóźnienie systemu. Postanowiliśmy w tamtym miejscu pozostawić rozwiązanie takim, jakie ono jest, jednak aby móc jakoś dodatkowo wspomóc ten system odsprężania można by np. stosować chwilowe dodatkowe zwiększenie sterowania w momencie, gdy dostajemy informację o pojawieniu się zakłócenia albo już abstrahując od MATLABowskiej symulacji, można by np. spróbować opóźnić możliwie wprowadzanie zakłócenia o kilkanaście sekund, aby móc zaimplementować właściwe równania. Mimo to uważamy, że osiągnęliśmy zadowalający nas efekt.

Oświadczamy, że powyższa praca, stanowiąca podstawę do uznania efektów uczenia się z przedmiotu DCS została wykonana przez nas samodzielnie.

Michał Kolankiewicz, 303765

Michał Rejer, 303575

Łukasz Tumialis, 303780