

Od PID do ADRC

(Active Disturbance Rejection Control)

Nowa metoda projektowania
serwonapędów

Plan wystąpienia

1. Motywacja
2. Co to jest ADRC ?
3. Przykład serwonapędu z ADRC
4. Krótkie podsumowanie
5. Perspektywy, pytania, wątpliwości, zagadnienia szczegółowe

From PID to Active Disturbance Rejection Control

Jingqing Han

ADRC is the result of years of investigation, largely performed experimentally in computer simulations with the scientific spirit of daring imaginations, painstaking observations, careful generalization and abstraction, and truthful verifications of principles in real-world applications. It may help the newcomers to ADRC greatly if one abandons the initial *How can this be right?* attitude and, instead, run a few simulations of the proposed solutions and observe the results. Perhaps the facts, or data, are more convincing than mere articulation of ideas.

If the PID was born early in the last century, where it was instrumental in the rise of modern industry and if PID is still dominant to this day, conceivably, a major overhaul is long overdue and a new era could be just around the corner. Ushered in by performance and practicality, perhaps ADRC will soon be accepted as a viable alternative to PID, as we wait in anticipation.



Jingqing Han received the B.S. degree in mathematics from Jilin University, Changchun, China, in 1958. From 1963 to 1966, he studied as a Ph.D. student at the Department of Mathematics and Mechanics, Moscow University.

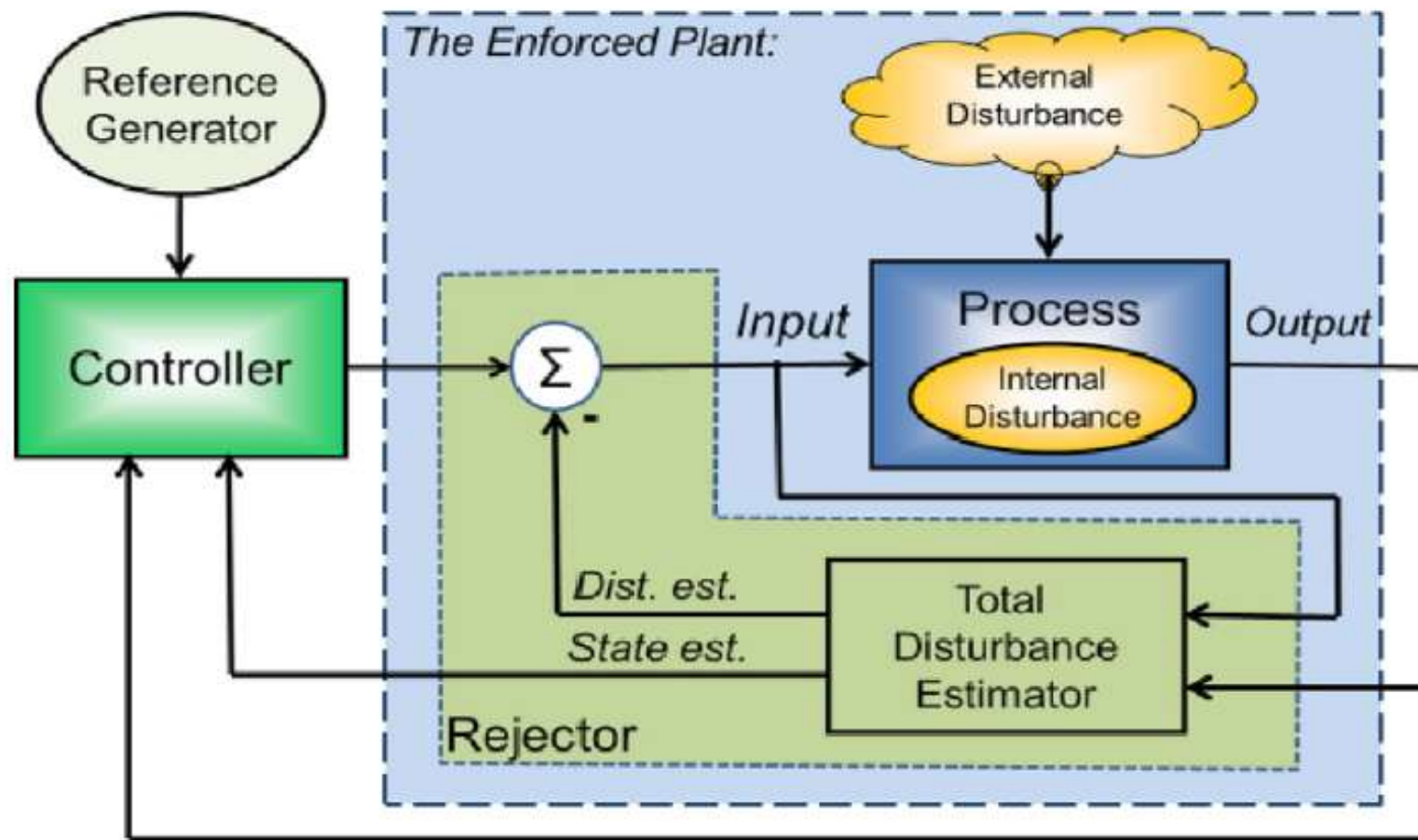
In 1958, he joined the Institute of Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, where he was a Professor Emeritus with the Institute of Systems Science, Academy of Mathematics and Systems Science. He published six books and over 200 papers and served in many professional organizations throughout his career. In his pursuit of truth, he was never afraid of putting his reputation on the line and challenging the establishment and the status quo. Trained as a mathematician, he never ceased to seek solutions to the pressing problems of the world in which we live.

Prof. Han was a leading scholar in China for over five decades, receiving numerous prestigious awards, recognitions, and joint appointments at various universities and research institutes.

Message from the Editor-in-Chief

Prof. Jingqing Han was a control theorist and educator who inspired generations of students and colleagues in China. He passed away on April 21,

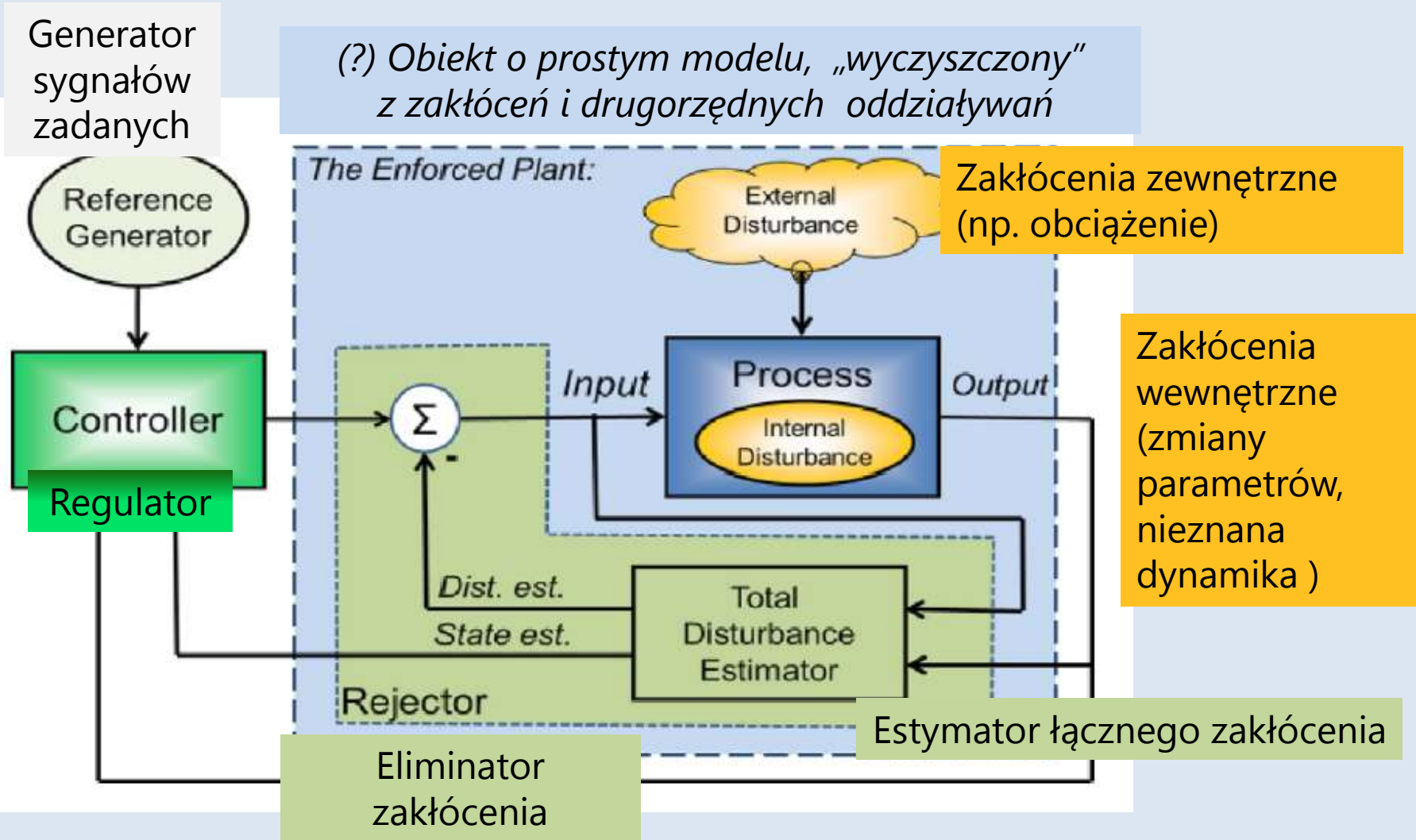
Schemat koncepcji ADRC



wg: [Zhiqiang Gao, On the centrality of disturbance rejection in automatic control](#)
ISA Transactions 53 (2014)



Schemat koncepcji ADRC



Regulator dobiera się do bardzo prostego modelu !



Zadania części składowych ADRC

Reference Generator

- kształtuje pożądane przebiegi wzorcowe zmiennych stanu

Total Disturbance Estimator (TDE)

- odtwarza zmienne stanu obiektu (*State estim.*) ,
- estymuje łączne zakłócenie (*Dist. Estim.*)

Rejector (TDE + sumator):

- usuwa wpływ zakłóceń korygując zewnętrzny sygnał sterujący
- dostarcza filtrowanych sygnałów sprzężenia zwrotnego

Controller

- minimalizuje uchyby (odstępstwa od przebiegów wzorcowych)

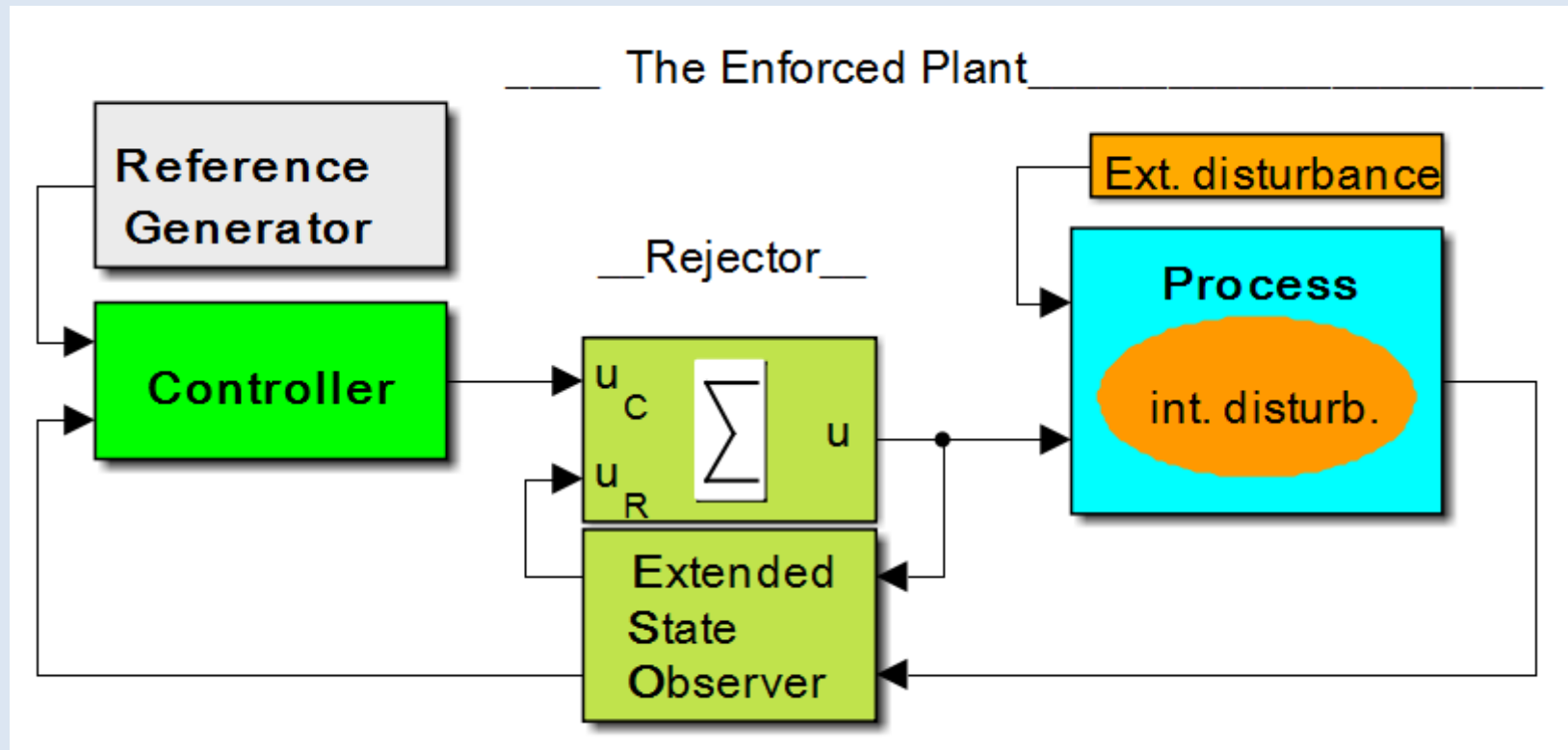
Uwagi:

- TDE to zwykle rozszerzony obserwator stanu, *Extended State Observer*, ESO
- Ograniczenia uwzględnia się głównie w bloku RG (dodatkowo: w sumatorze)

• Im lepszy *rejector* tym łatwiejsze zadanie ma *controller*



Ogólny model ADRC do badań symulacyjnych



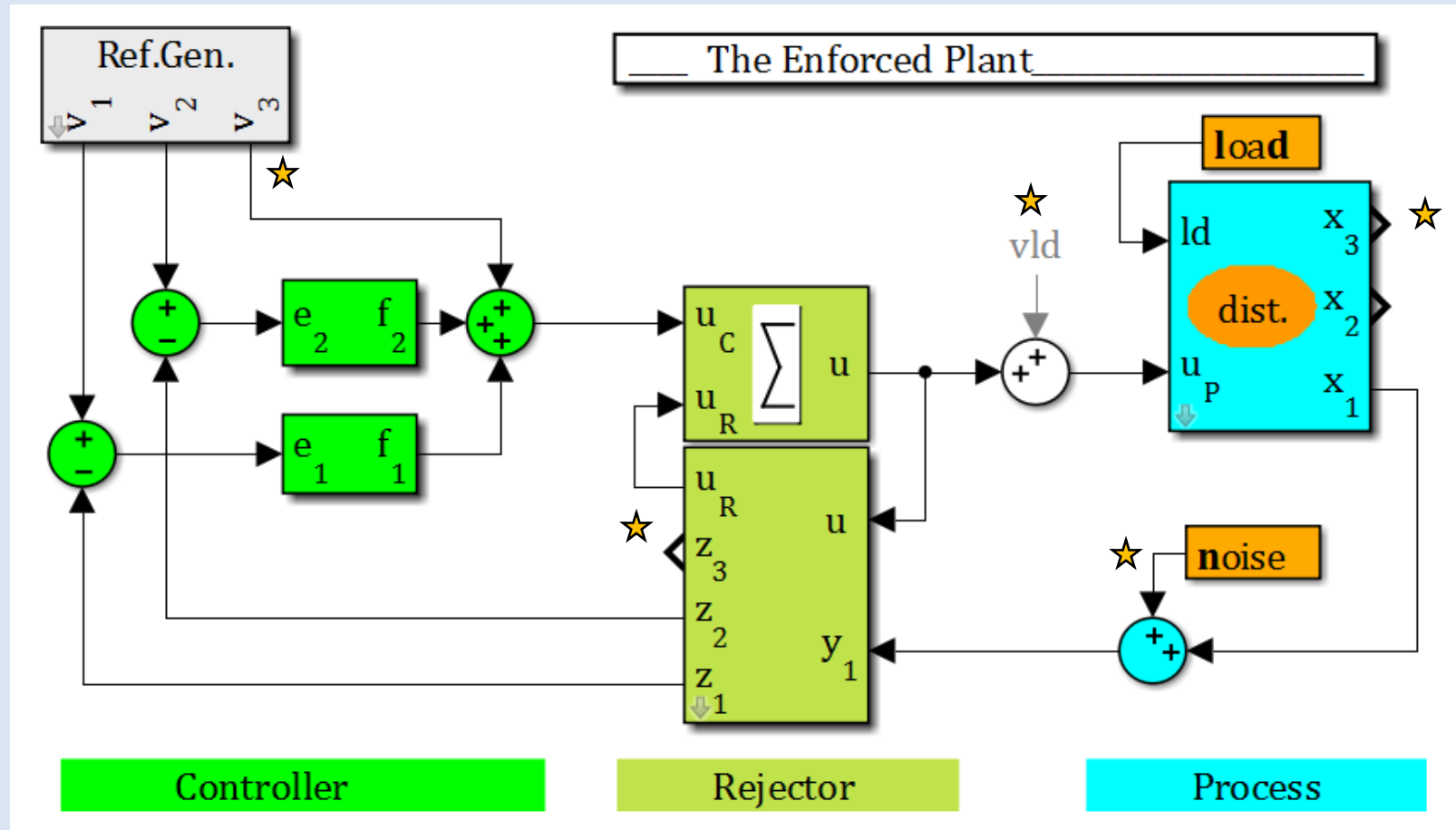
Uwaga: w eliminatorze (*rejector*) jest obecne wewnętrzne sprzężenie zwrotne obejmujące bloki sumatora i estymatora ESO. Dla stanu ustalonego jest to sprzężenie dodatnie, o wzmacnieniu jednostkowym.

Plan wystąpienia

1. Motywacja
2. Co to jest ADRC ?
3. Przykład serwonapędu z ADRC
 - modele serwonapędu
 - [praca bez regulatora](#)
 - [regulacja prędkości](#)
 - [regulacja położenia](#)
4. Krótkie podsumowanie
5. Perspektywy, pytania, wątpliwości, zagadnienia szczegółowe



Ogólny model symulacyjny ADRC serwonapędu



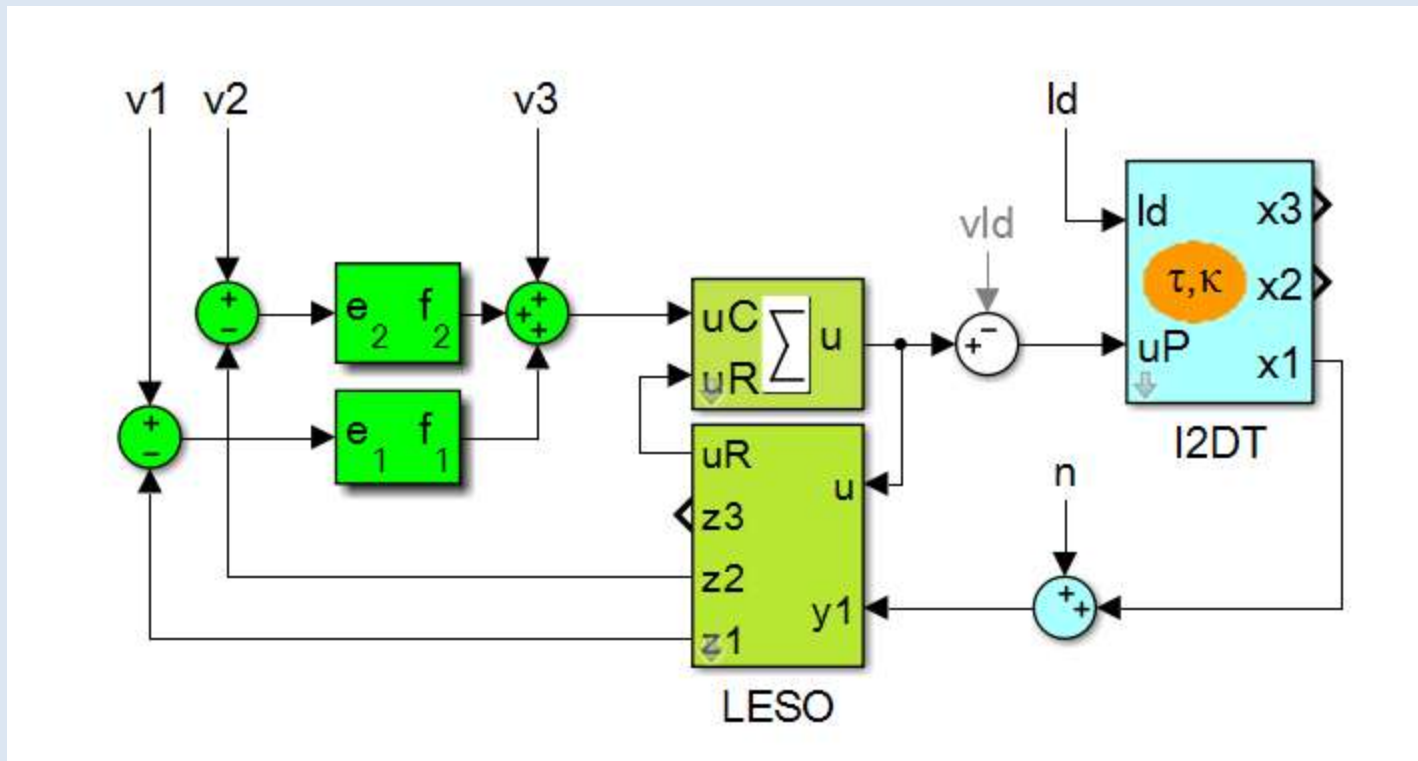
Przykład sterowania serwonapędem z ADRC

Założenia i uwagi:

- W generatorze wzorcowym RG wykorzystano funkcję ***fst*** ([Gao'2001](#)) oraz własne pomysły na ograniczanie pochodnych przyspieszenia
- Jako TDE przyjęto liniowy rozszerzony obserwator stanu *LESO* ([Han'2009](#)); **jedynym** jego parametrem jest krok obliczeń ***h***, tożsamy z okresem próbkowania.
- Większość badań przekrojowych zrobiono na **liniowym dyskretnym** modelu napędu o trzech bezwymiarowych parametrach (***τ* , *κ* , *ph***) charakteryzujących odstępstwa obiektu od idealnego podwójnego integratora
- Wyprowadzone wzory i wyniki symulacji można odnieść do **każdego** serwonapędu, przyjmując dowolny spójny system wielkości odniesienia; dla ułatwienia percepcji wyniki będą interpretowane dla przykładowego napędu o zaokrąglonych wartościach parametrów

Przykładowy model symulacyjny ADRC serwonapędu (1)

Liniowy model dyskretny, zrealizowany w MATLABie
(sygnały wejściowe z nieliniowego dyskretnego modelu generatora *RG_FIR*)

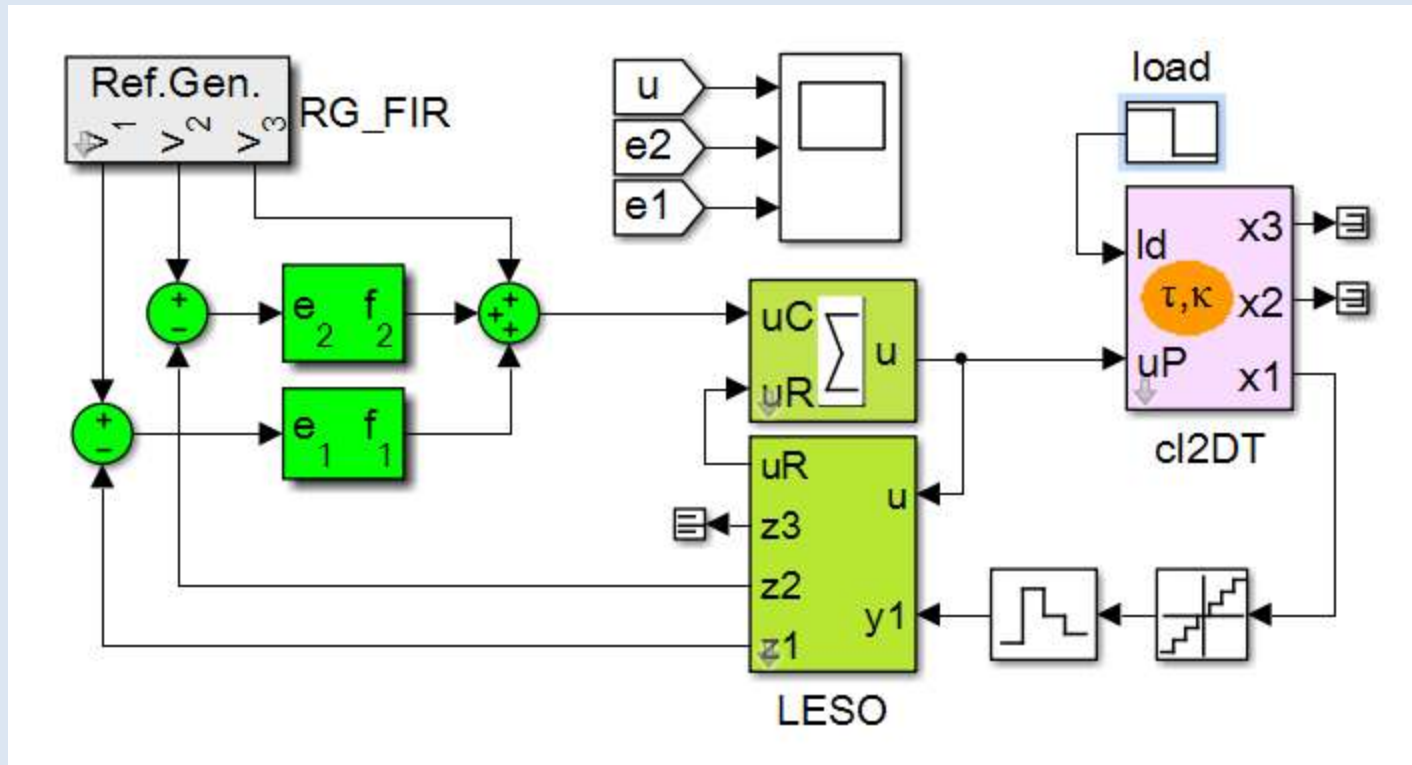


LESO : liniowy rozszerzony obserwator stanu (*Linear Extended State Observer*)

I2DT : człon podwójnie całkujący, z opóźnieniem

Przykładowy model symulacyjny ADRC serwonapędu (2)

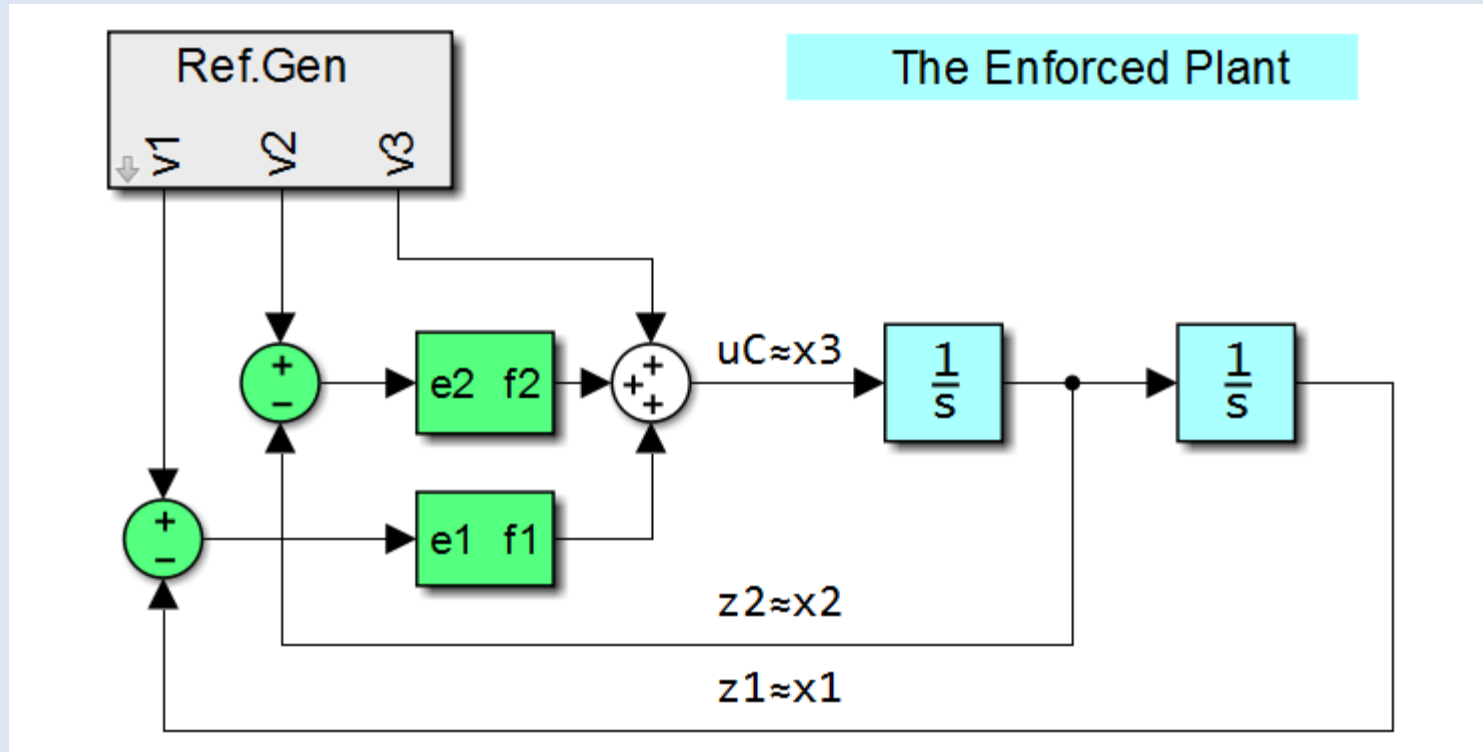
Nieliniowy model dyskretno-ciągły, zrealizowany w Simulinku



- RG_FIR : dyskretny nieliniowy generator przebiegów wzorcowych z ograniczaniem zrywem
LESO : dyskretny liniowy rozszerzony obserwator stanu
cl2DT : ciągły człon podwójnie całkujący, z opóźnieniem

Uproszczony model konceptualny serwonapędu

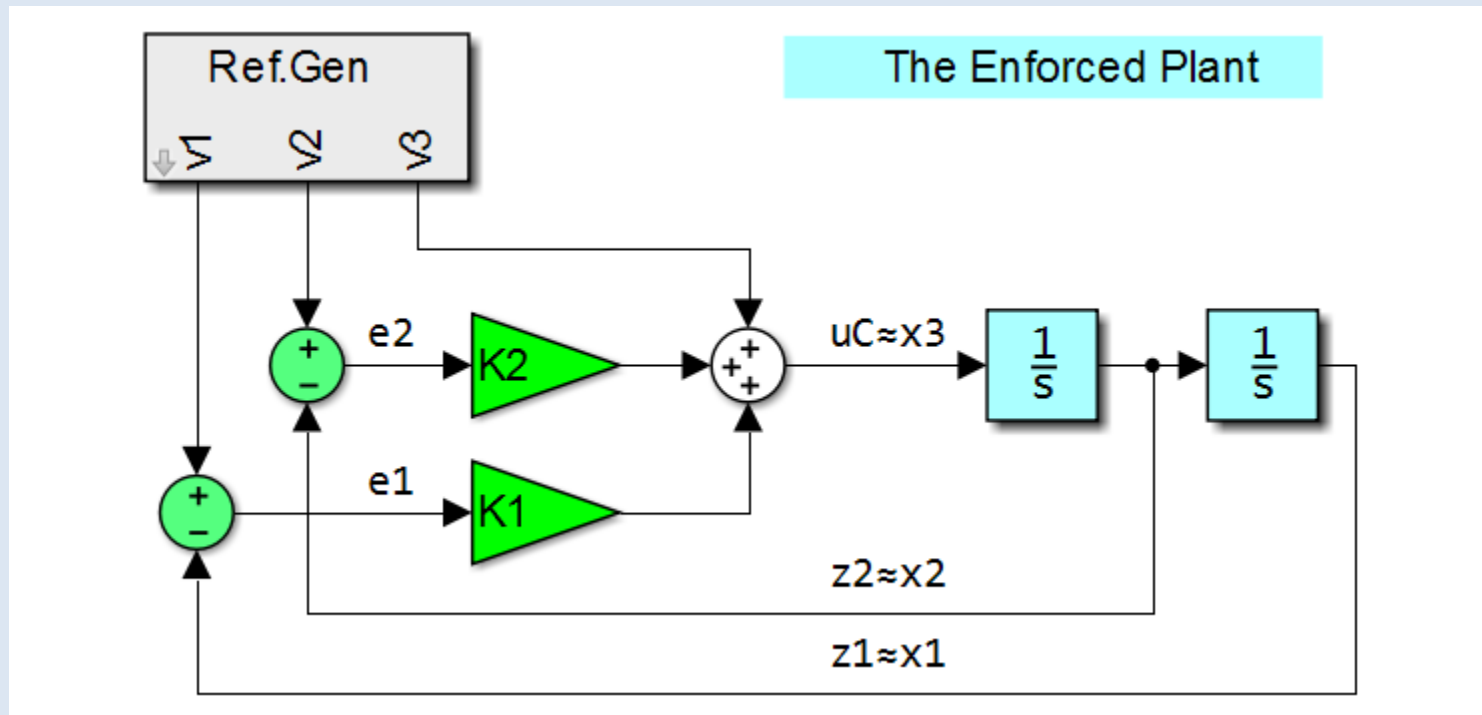
Jeśli przyjąć, że eliminator zlikwiduje wszystkie zakłócenia, to obiekt można uprościć do członu podwójnie całkującego:



Znaki $\approx$ zamiast $=$ sygnalizują, że eliminator nie jest idealny i trzeba się liczyć z pewnymi pozostałościami po zakłóceniach; ich minimalizacja należy do zadań regulatora

Serwonapęd z regulatorem proporcjonalnym

Najprostszy jest regulator proporcjonalny, wzmacniający uchyb regulacji; model serwonapędu jest 2-wymiarowy; są 2 uchyby i 2 wzmocnienia : K_1 , K_2



Wzmocnienie K_2 ma wymiar $1/s$, a K_1 ma wymiar $1/s^2$ *)

*) zamiast K_1, K_2 podawane będą wzmocnienia unormowane : $k_2 = K_2 \cdot h$, $k_1 = K_1 \cdot h^2$

Przykładowe dane serwonapędu z ADRC

Krok obliczeń i okres próbkowania: $h = 1ms$

Dane elektromechaniczne (projektowe, szacunkowe) :

$$x_{2N} \cdot T_N = P_N \quad : \quad 100rad/s \cdot 10Nm = 1kW$$

$$x_{2N} \cdot J_p / T_N = x_{3N} \quad : \quad 100rad/s \cdot 0.01kgm^2 / 10Nm = 1000rad/s^2$$

$$\Delta T_{ld} / \Delta x_2 = B \quad : \quad (0 \dots 0.5) T_N / x_{2N} = 0 \dots 0.05 Nm / (rad/s)$$

$$\text{Opóźnienie pętli regulacji momentu} / h \quad : \quad \tau = 0 \dots \mathbf{0.25} \dots 0.5$$

$$\text{Względne wzmocnienie całkowite} J_p / J \quad : \quad \kappa = 0.75 \dots \mathbf{1} \dots 1.5$$

$$\text{Biegun członu prędkościowego} -Bh/J \quad : \quad ph = -\mathbf{0.005} \dots 0$$

Parametry generatora sygnałów wzorcowych i zakłócających:

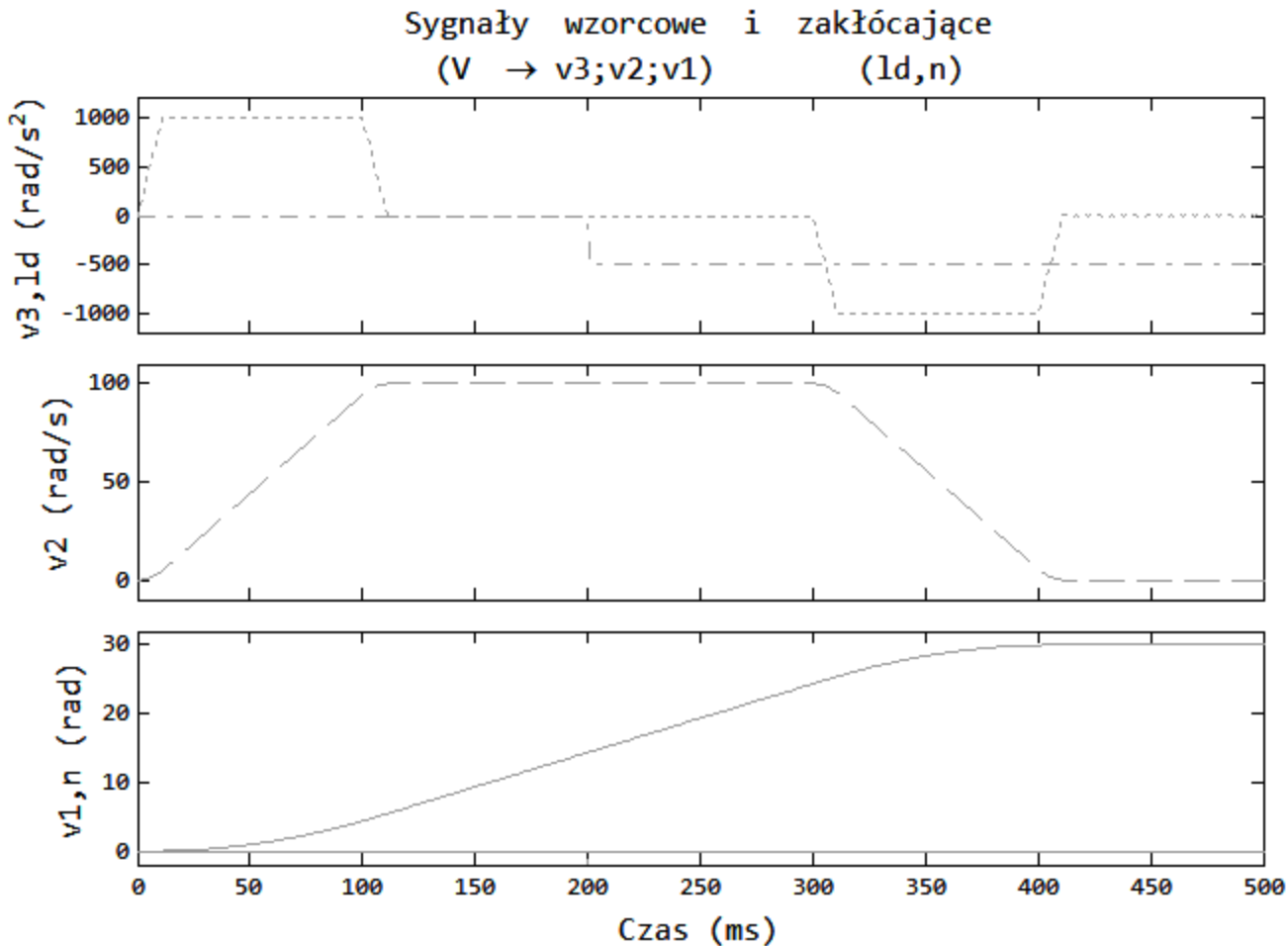
$$\text{Ograniczenie prędkości i przyspieszenia} \quad : \quad v_{2max} = x_{2N} \text{ , } v_{3max} = x_{3N}$$

$$\text{Czas zmiany przyspieszenia (zrywu)/h} \quad : \quad \tau_{v3} = 0 \dots \mathbf{10}$$

$$\text{Skok obciążenia} \text{ o } 0.5 \cdot T_N / J_p \quad : \quad ld = -\mathbf{500} rad/s^2 \cdot 1(t - t_{ld})$$

$$\text{Błąd rozdzielczości pomiaru kąta} \quad : \quad n_{max} = x_{1res} = \mathbf{0} \dots \pi \cdot 10^{-4} rad$$

Przykład: sygnały wejściowe



RG = RG-FIR

h = 1ms

$V_1 = 30\text{rad}$

$V_{2\text{max}} = 100\text{rad/s}$

$V_{3\text{max}} = 1000\text{rad/s}^2$

$\tau_{v3} = 10\text{h}$

→ v3

Pk = 1e+03

ST = 410.4

IA = 2e+05

→ v2

Pk = 100

ST = 401.0

IA = 3e+04

→ v1

Pk = 30

ST = 351.8

IA = 8.8e+03

Teoretyczny czas ustalania się (SettlingTime): $ST = \frac{\Delta V_1}{V_{2\text{max}}} + \frac{V_{2\text{max}}}{V_{3\text{max}}} + T_{v3} = 0.3 + 0.1 + 0.01 = 0.41\text{s}$

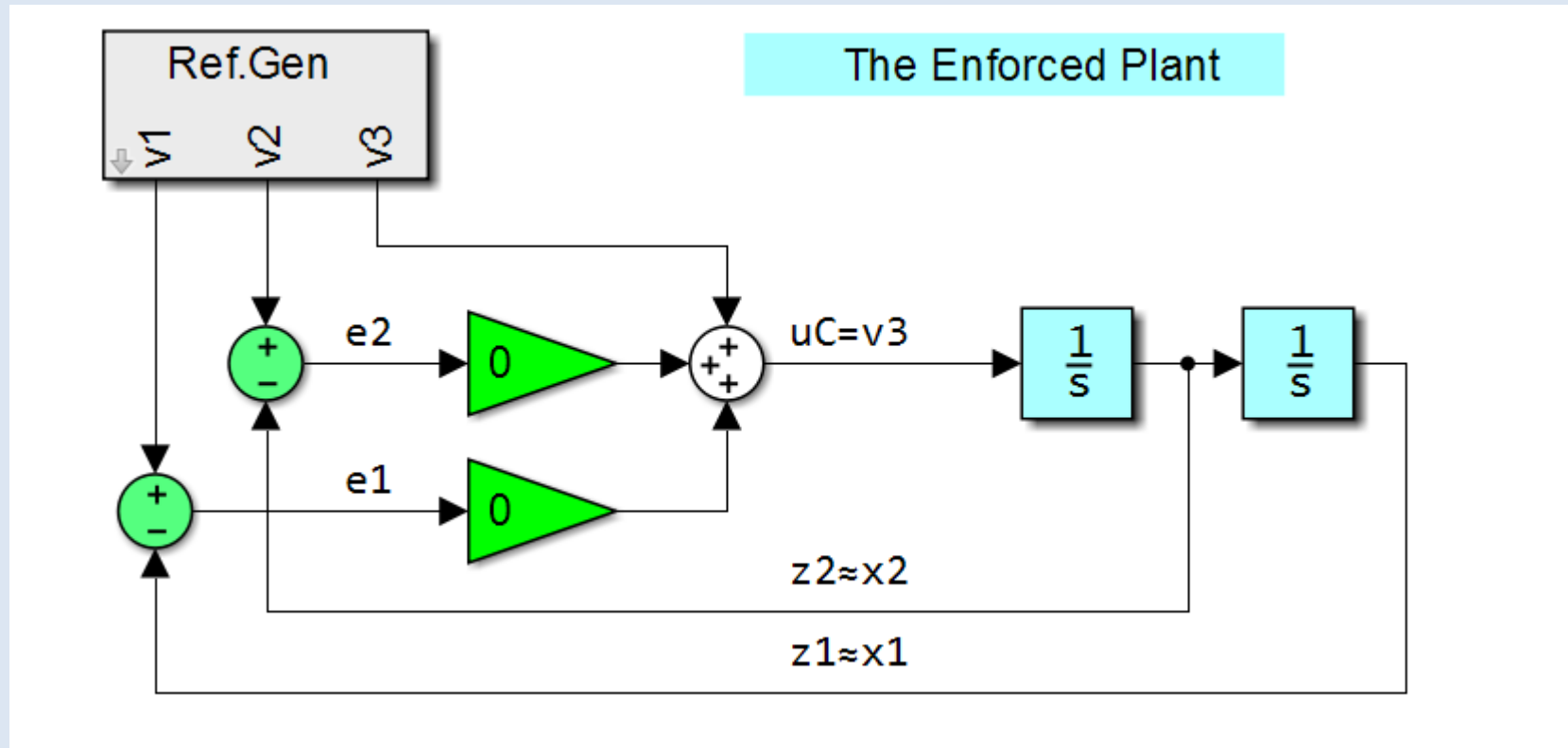
Plan wystąpienia

1. Motywacja
2. Co to jest ADRC ?
3. Przykład serwonapędu z ADRC
 - modele serwonapędu
 - praca bez regulatora
 - regulacja prędkości
 - regulacja położenia
4. Krótkie podsumowanie
5. Perspektywy, pytania, wątpliwości, zagadnienia szczegółowe



Przykład : testowanie obiektu bez regulatora (!?)

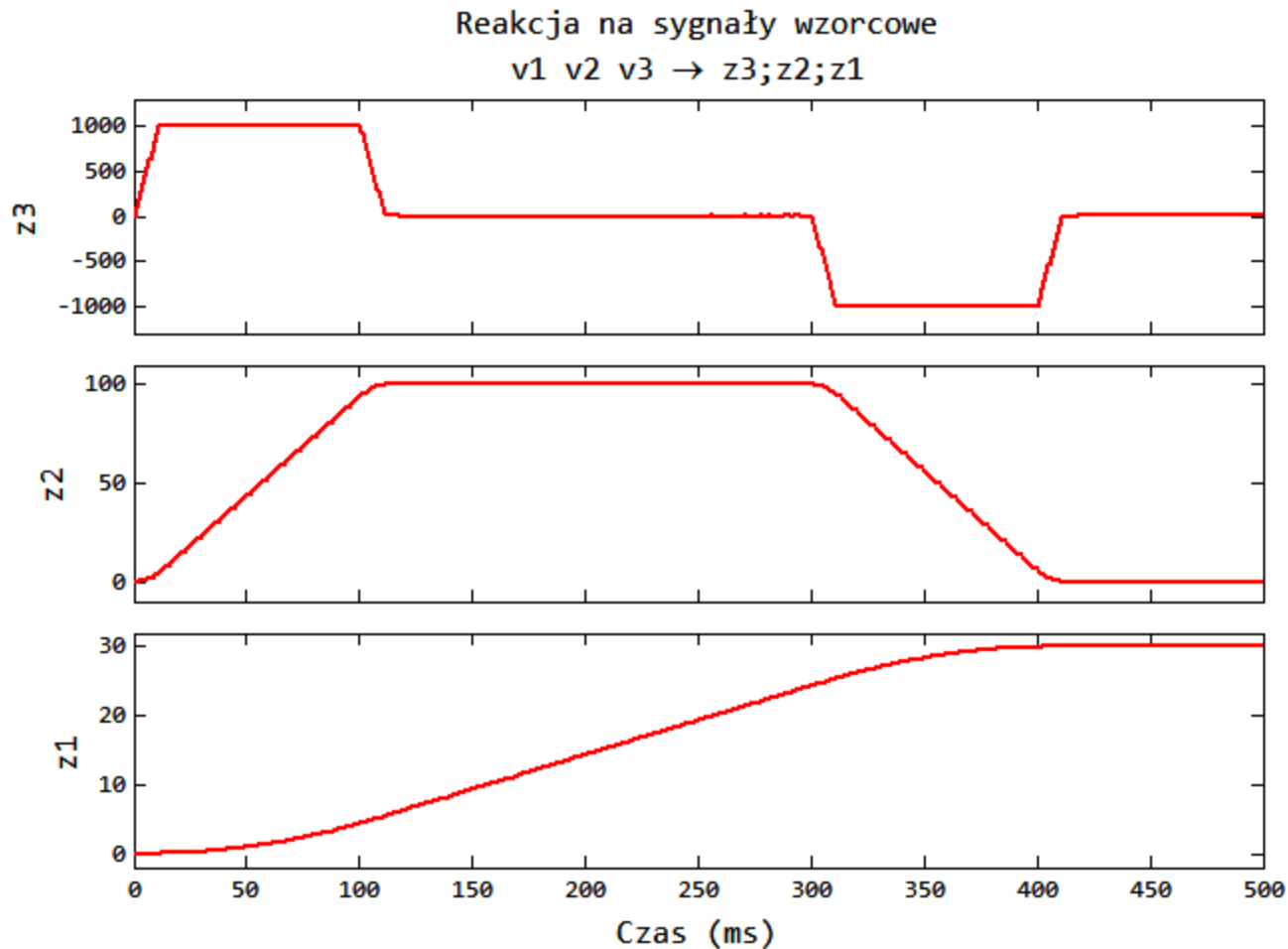
$$K1 = K2 = 0$$



Czy taka praca jest w ogóle możliwa? Czy układ nie będzie się rozbiegał pod wpływem aktywnego obciążenia?

Sterowanie serwonapędem z ADRC bez regulatora

(model nominalny, brak zakłóceń)



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 0$

$k1 = 0$

$\tau = 0.5$

$\kappa = 1$

$ph = 0$

$\rightarrow z3$

ST = 410.5

Pk = 1e+03

IA = 2e+05

$\rightarrow z2$

ST = 401.0

Pk = 100

IA = 3e+04

GM = 4.9

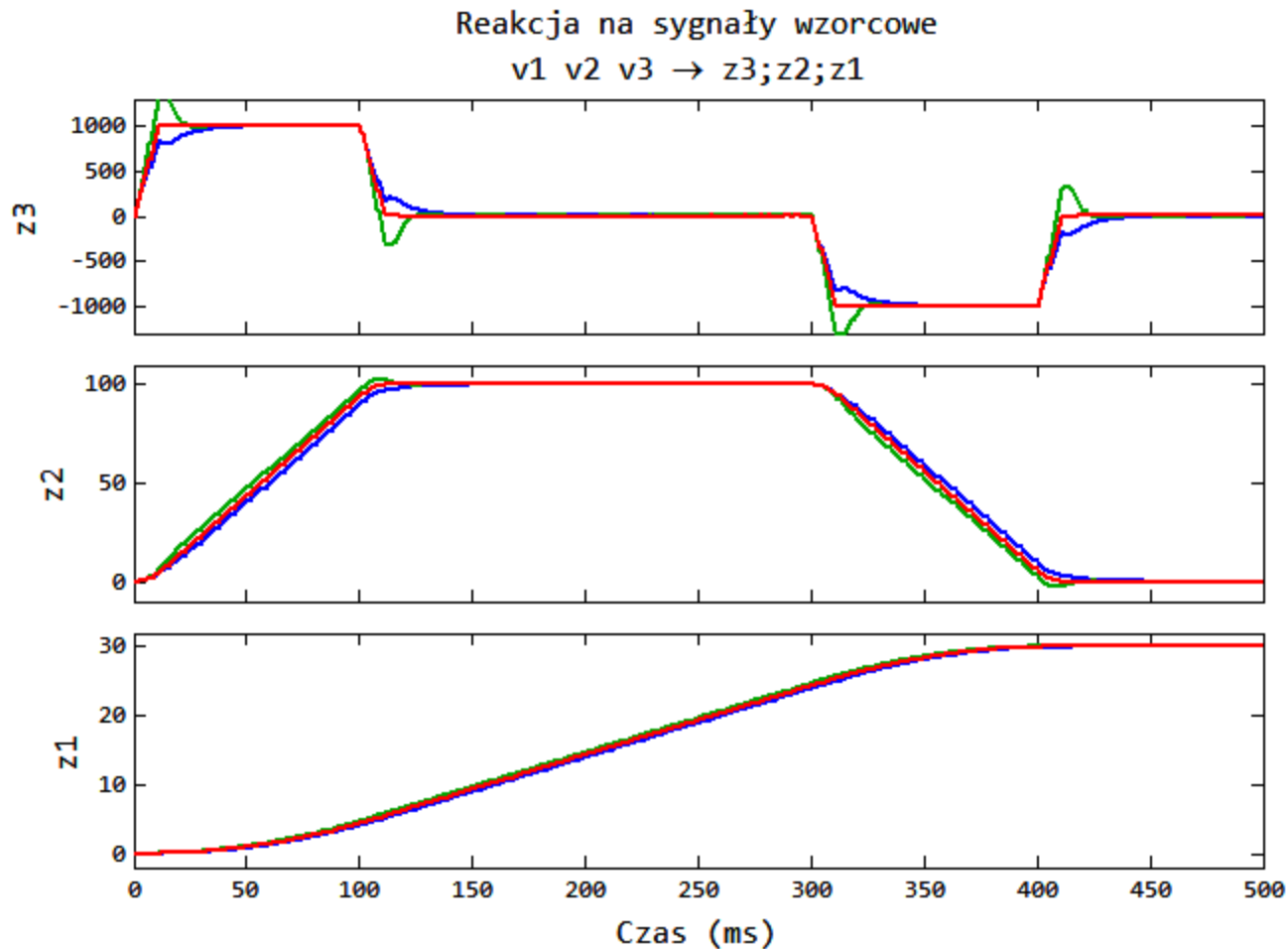
DM = 13.3

PM = 71.2

Idealne śledzenie wzorca; b. duże marginesy stabilności

Sterowanie serwonapędem z ADRC bez regulatora

$$(J_{max}/J_{min}=2)$$



TDE = LESO

h = 1ms

k2 = 0

k1 = 0

$\tau = 0.5$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

ph = 0

→ z3

ST < 429.4

Pk < 1.32e+03

IA < 2.11e+05

→ z2

ST < 405.8

Pk < 103

IA < 3.01e+04

GM > 3.3

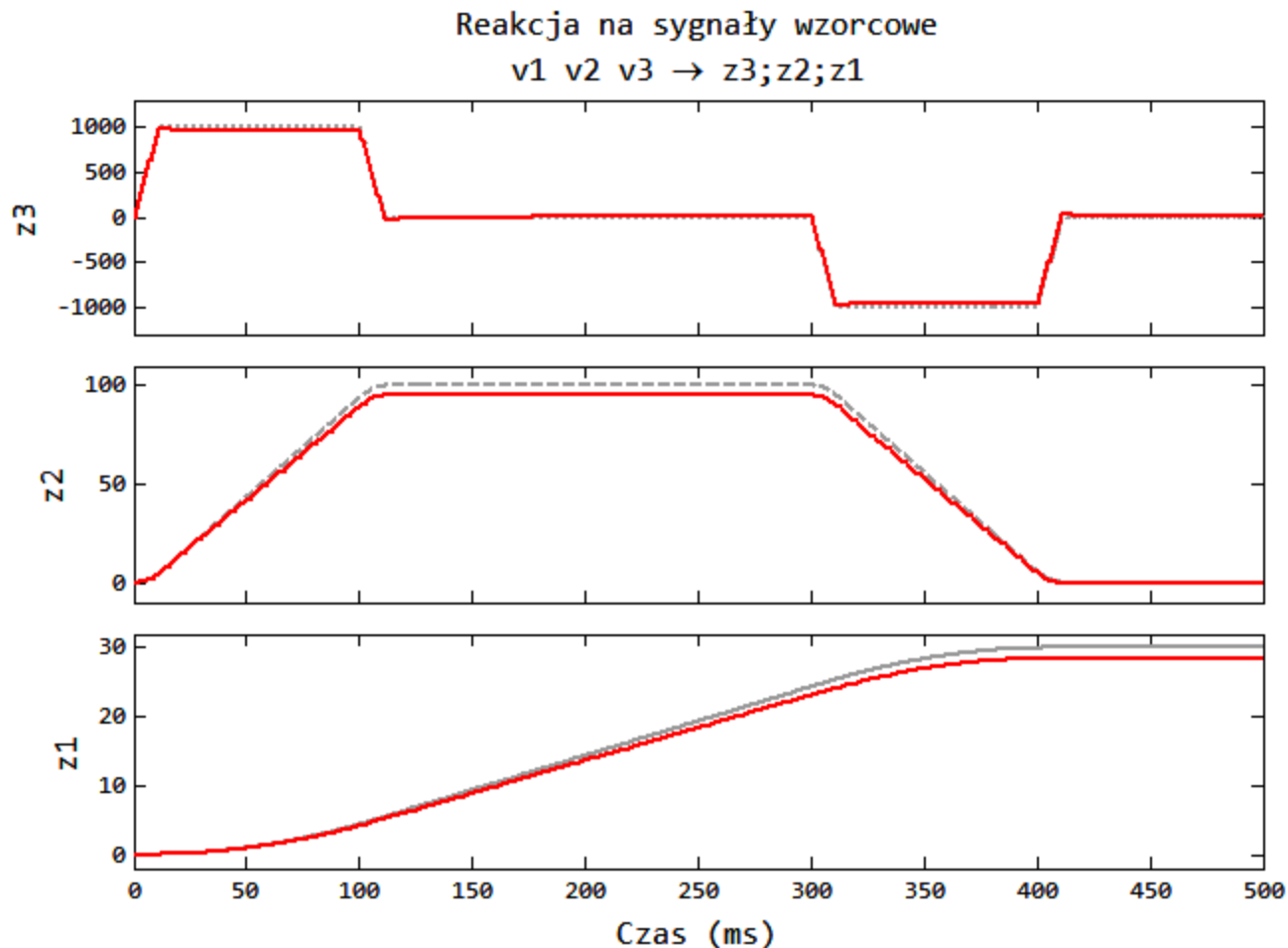
DM > 7.7

PM > 61.7

(uchyby – tylko dynamiczne)

Sterowanie serwonapędem z ADRC bez regulatora

(moment oporowy zależny od prędkości)



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 0$

$k1 = 0$

$\tau = 0.5$

$\kappa = 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow z3$

ST = 410.0

Pk = 987

IA = 1.91e+05

$\rightarrow z2$

ST = 400.4

Pk = 95.2

IA = 2.85e+04

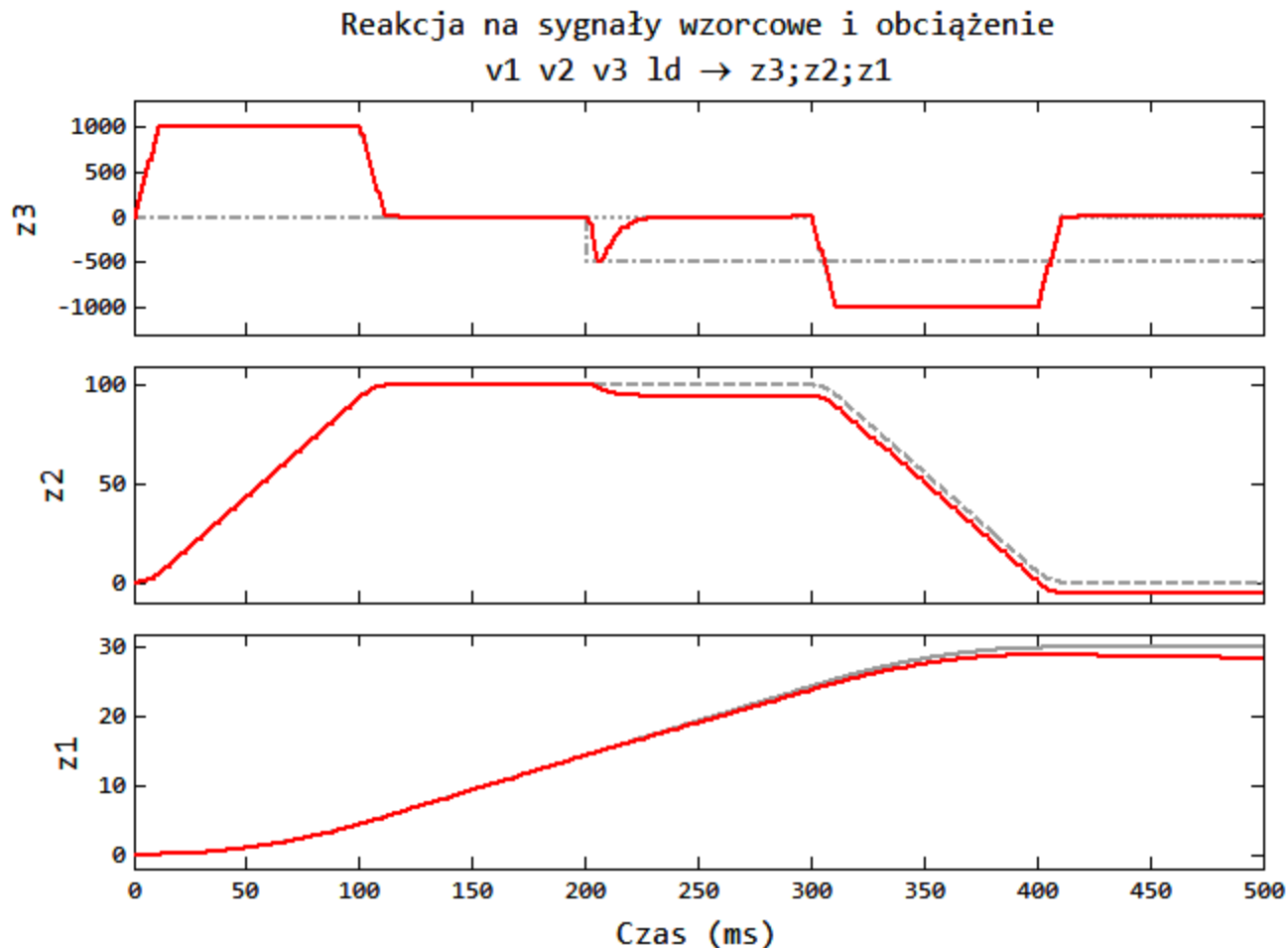
GM = 4.9

DM = 13.8

PM = 74.2

Sterowanie serwonapędem z ADRC bez regulatora

(skok czynnego momentu oporowego)



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 0$

$k1 = 0$

$\tau = 0.5$

$\kappa = 1$

$ph = 0$

$\rightarrow z3$

ST = 410.5

Pk = 1e+03

IA = 2.05e+05

$\rightarrow z2$

ST = 400.7

Pk = 100

IA = 2.95e+04

GM = 4.9

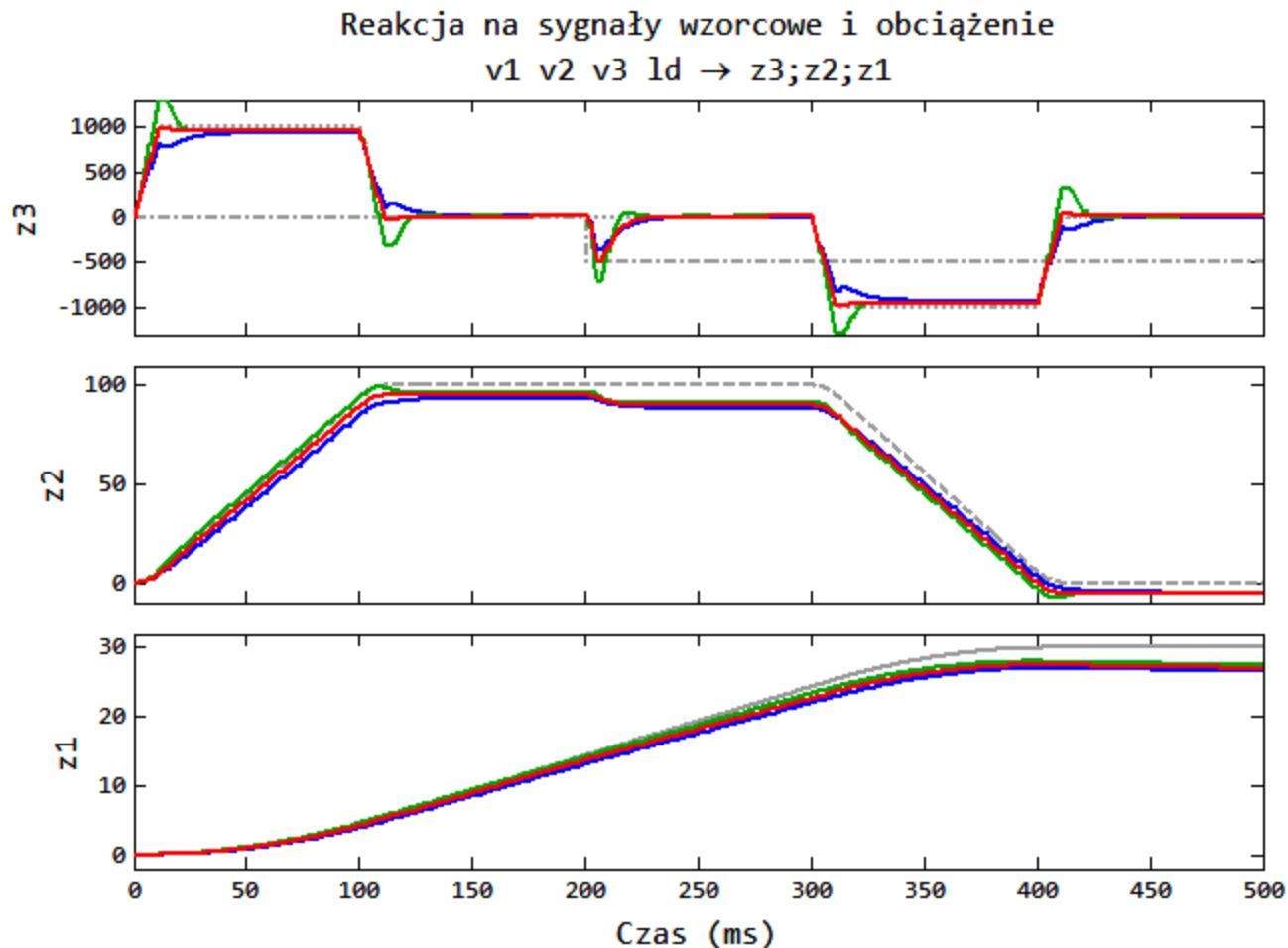
DM = 13.3

PM = 71.2

(uchyb ustalony prędkości, rosnący nieograniczenie uchyb położenia)

Sterowanie serwonapędem z ADRC bez regulatora

(wszystkie zakłócenia łącznie)



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 0$

$k1 = 0$

$\tau = 0.5$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow z3$

ST < 426.6

Pk < 1.29e+03

IA < 2.1e+05

$\rightarrow z2$

ST < 403.9

Pk < 99.2

IA < 2.85e+04

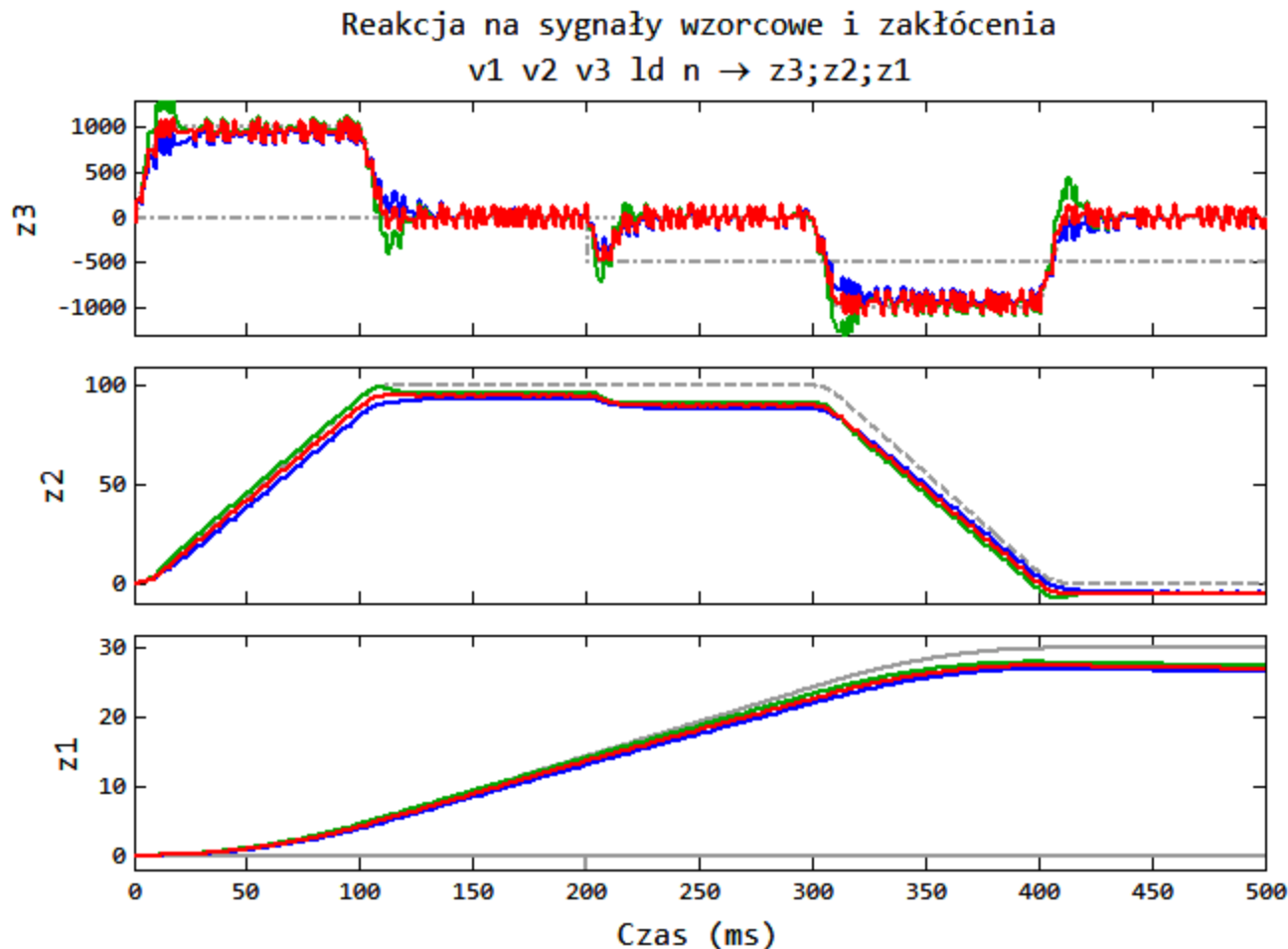
GM > 3.3

DM > 7.9

PM > 63.7

Sterowanie serwonapędem z ADRC bez regulatora

(wszystkie zakłócenia łącznie + szum pomiarowy)



TDE = LESO

h = 1ms

k2 = 0

k1 = 0

$\tau = 0.5$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

ph = -0.005

→ z3

ST < 499.5

Pk < 1.38e+03

IA < 2.24e+05

→ z2

ST < 404.1

Pk < 99.2

IA < 2.85e+04

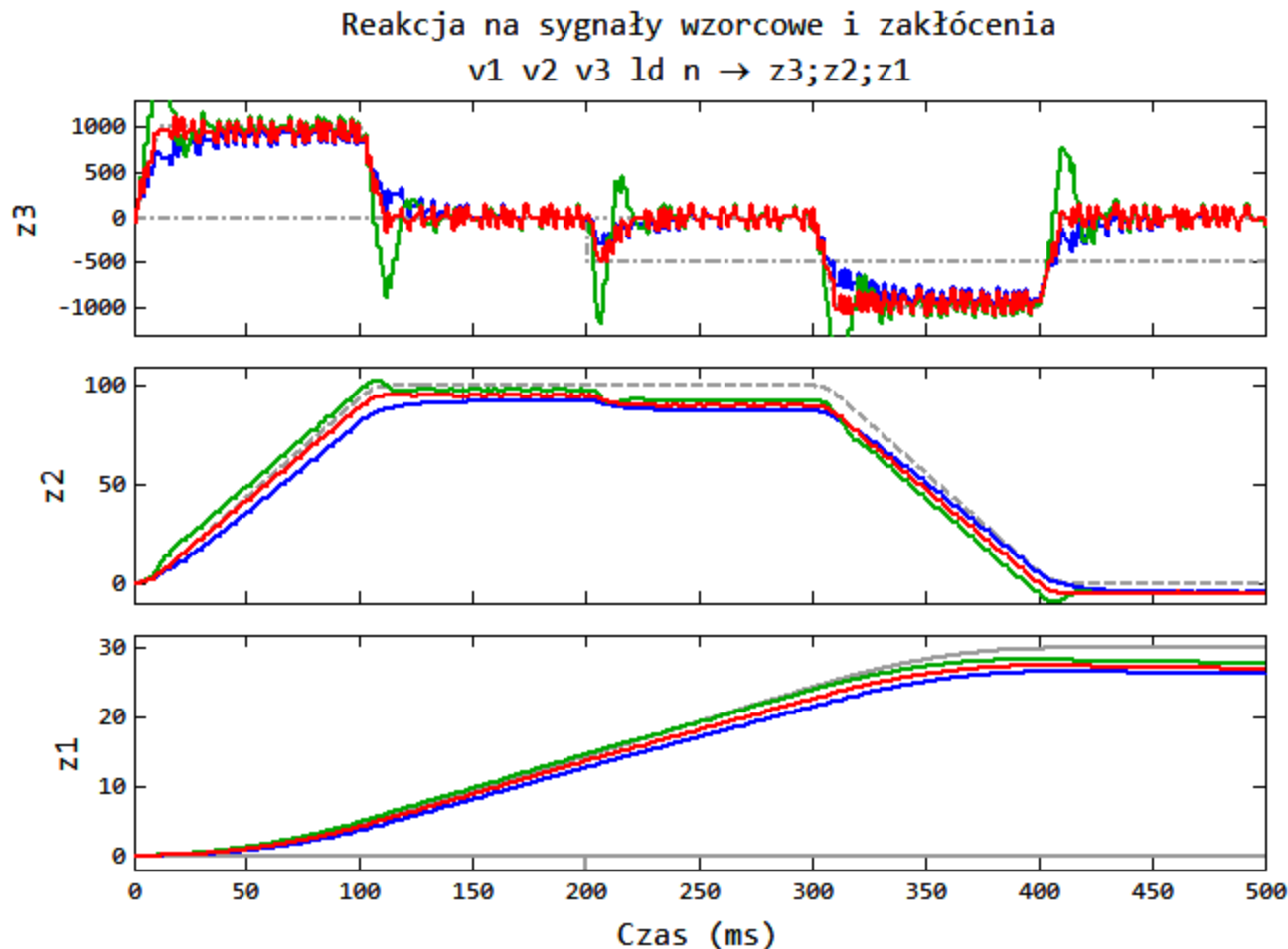
GM > 3.3

DM > 7.9

PM > 63.7

Sterowanie serwonapędem z ADRC bez regulatora

(wszystkie zakłócenia łącznie + szum pomiarowy; $J_{max}/J_{min} = 4$)



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 0$

$k1 = 0$

$\tau = 0.5$

$\kappa = .625; 2.5; 1$

$ph = -0.005$

→ $z3$

ST < 499.4

Pk < 1.8e+03

IA < 2.42e+05

→ $z2$

ST < 408.4

Pk < 103

IA < 2.9e+04

GM > 2.0

DM > 3.3

PM > 43.8

WNIOSKI: b. duża odporność; czas usuwania zakłóceń $\approx 23\text{ms}$

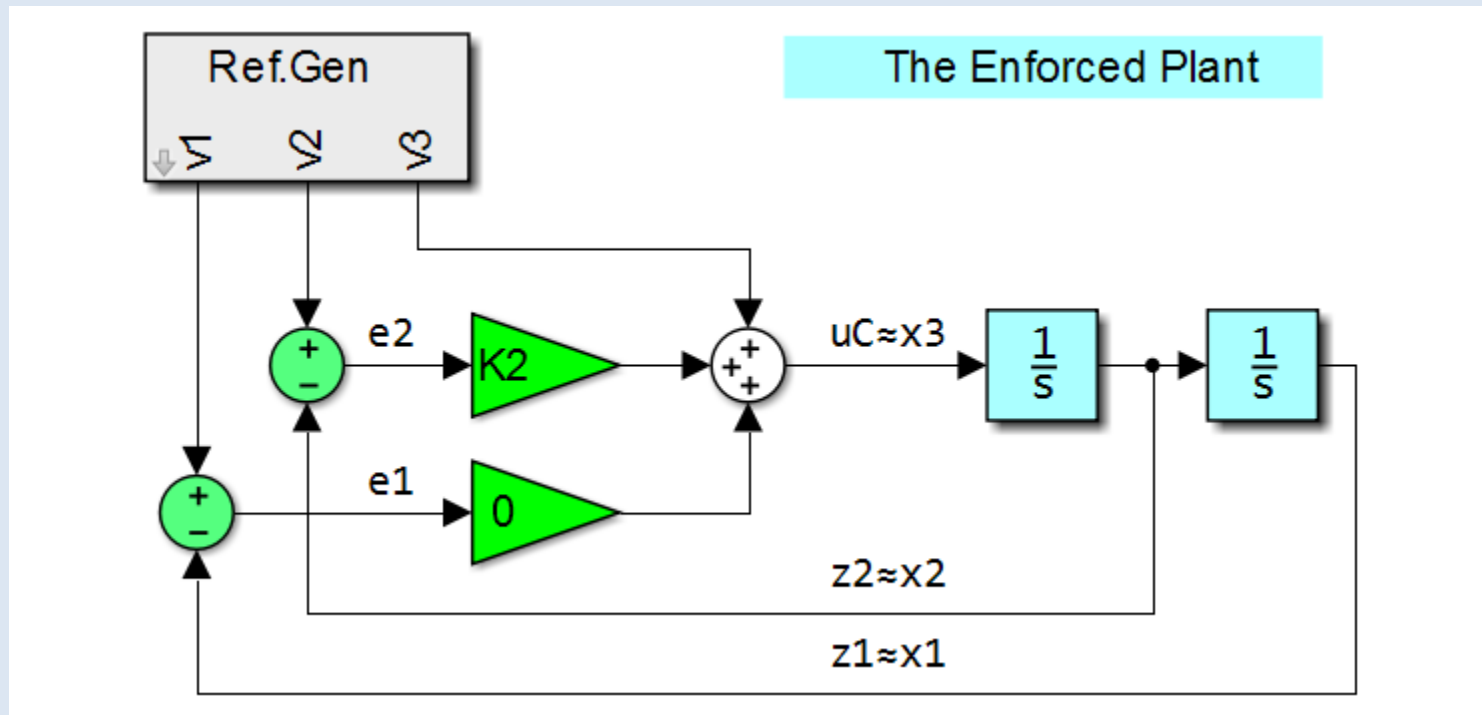
Plan wystąpienia

1. Motywacja
2. Co to jest ADRC ?
3. Przykład serwonapędu z ADRC
 - modele serwonapędu
 - praca bez regulatora
 - regulacja prędkości
 - regulacja położenia
4. Krótkie podsumowanie
5. Perspektywy, pytania, wątpliwości, zagadnienia szczegółowe



Przykład : regulacja prędkości

$K_2 = \text{var}$, $K_1 = 0$; wymuszenia jak poprzednio

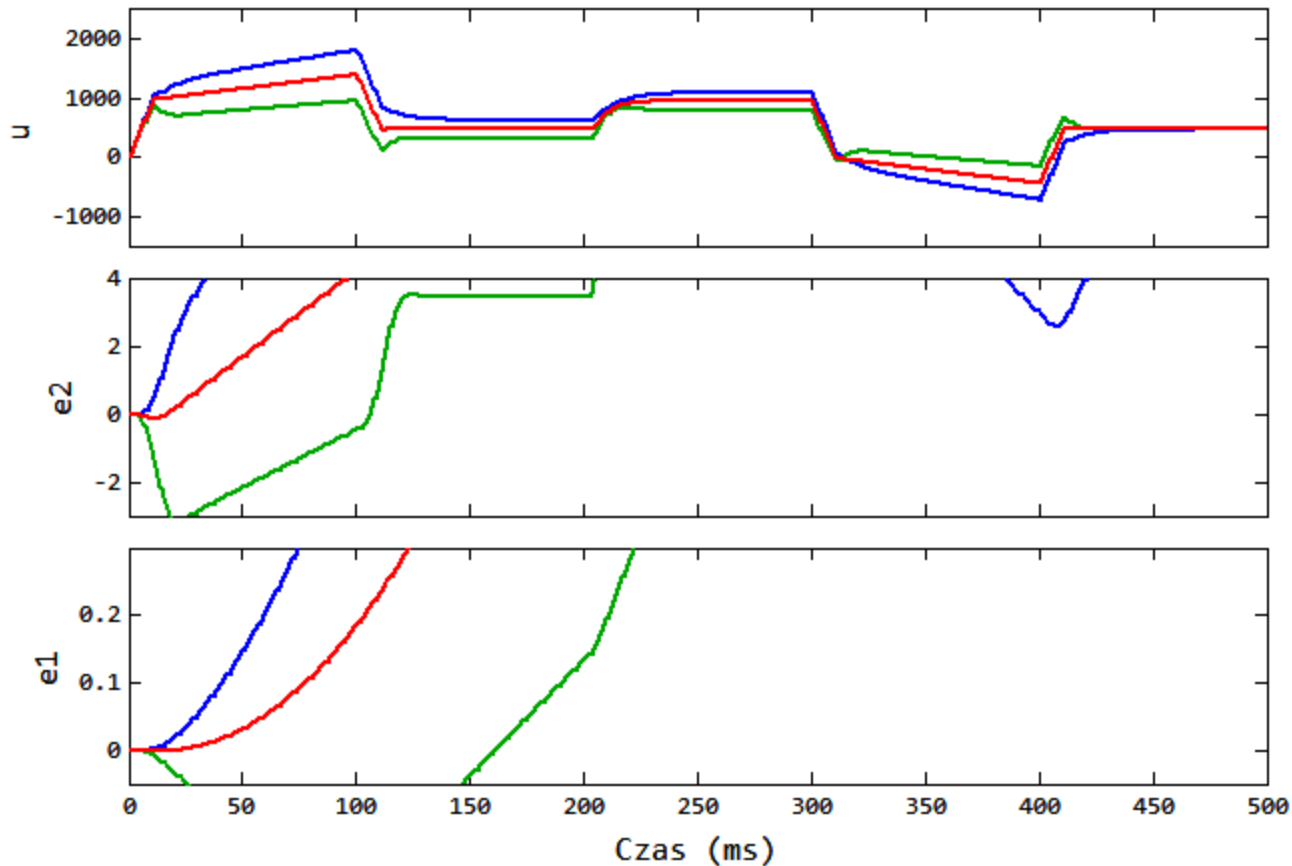


Człon inercyjny I rzędu; $1/K_2$ oznacza stałą czasową z jaką regulator będzie redukował pozostałości zakłóceń

Przykład : regulacja prędkości, $K_2=0$

uchyby e_2 , e_1 zamiast prędkości z_2 i położenia z_1 , u zamiast z_3

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie
 $v_1 \ v_2 \ v_3 \ l_d \rightarrow u; e_2; e_1$



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k_2 = 0$

$k_1 = 0$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e_2$

$P_k < 11.8$

$ST < 431.0$

$IA < 3.42e+03$

$\rightarrow e_1$

$P_k < 3.43$

$ST < 473.5$

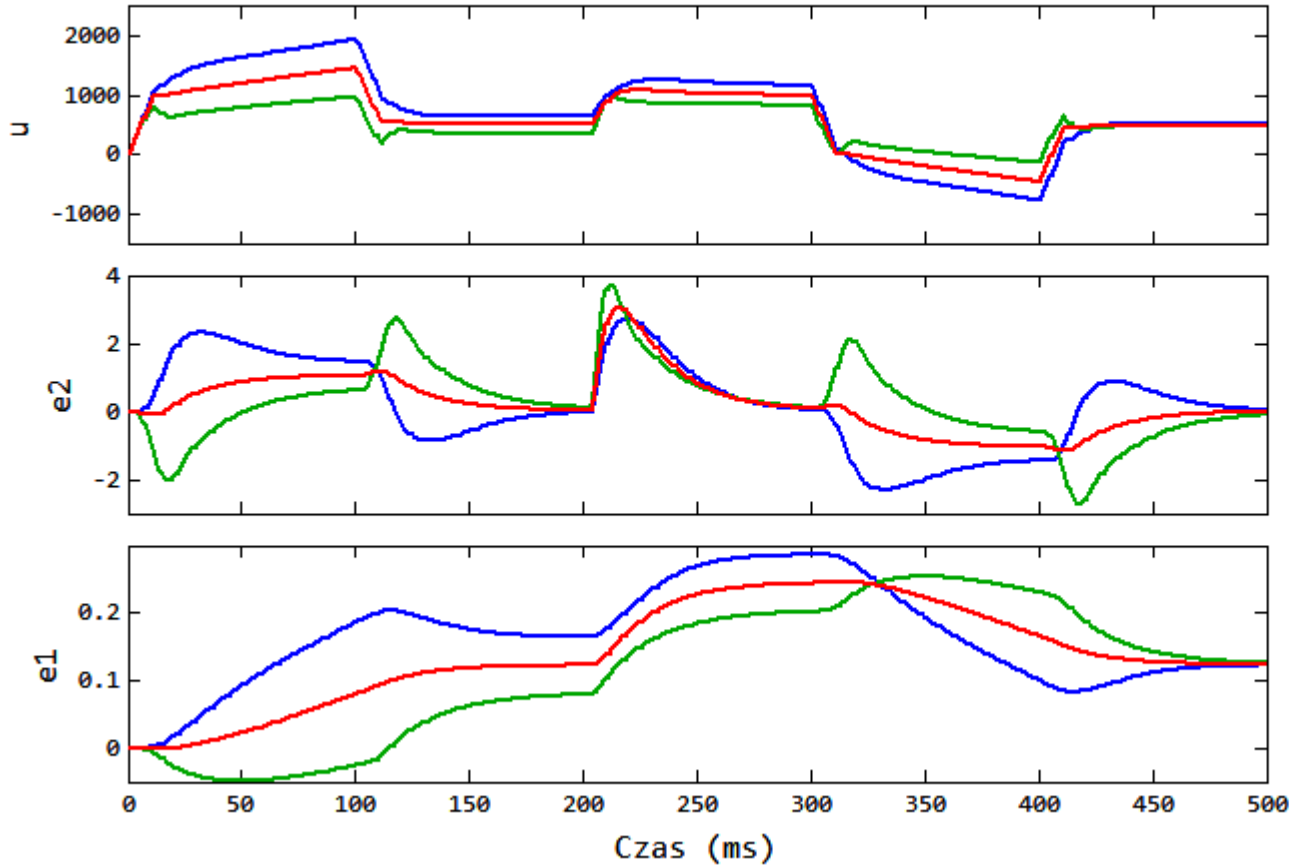
$GM > 3.6$

$DM > 8.2$

$PM > 65.7$

Regulacja prędkości $1/K_2=20\text{ms}$

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie
 $v_1 \ v_2 \ v_3 \ l_d \rightarrow u; e_2; e_1$



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k_2 = 0.05$

$k_1 = 0$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e_2$

$P_k < 3.73$

$ST < 475.1$

$IA < 527$

$\rightarrow e_1$

$P_k < 0.286$

$ST < 463.6$

$GM > 2.6$

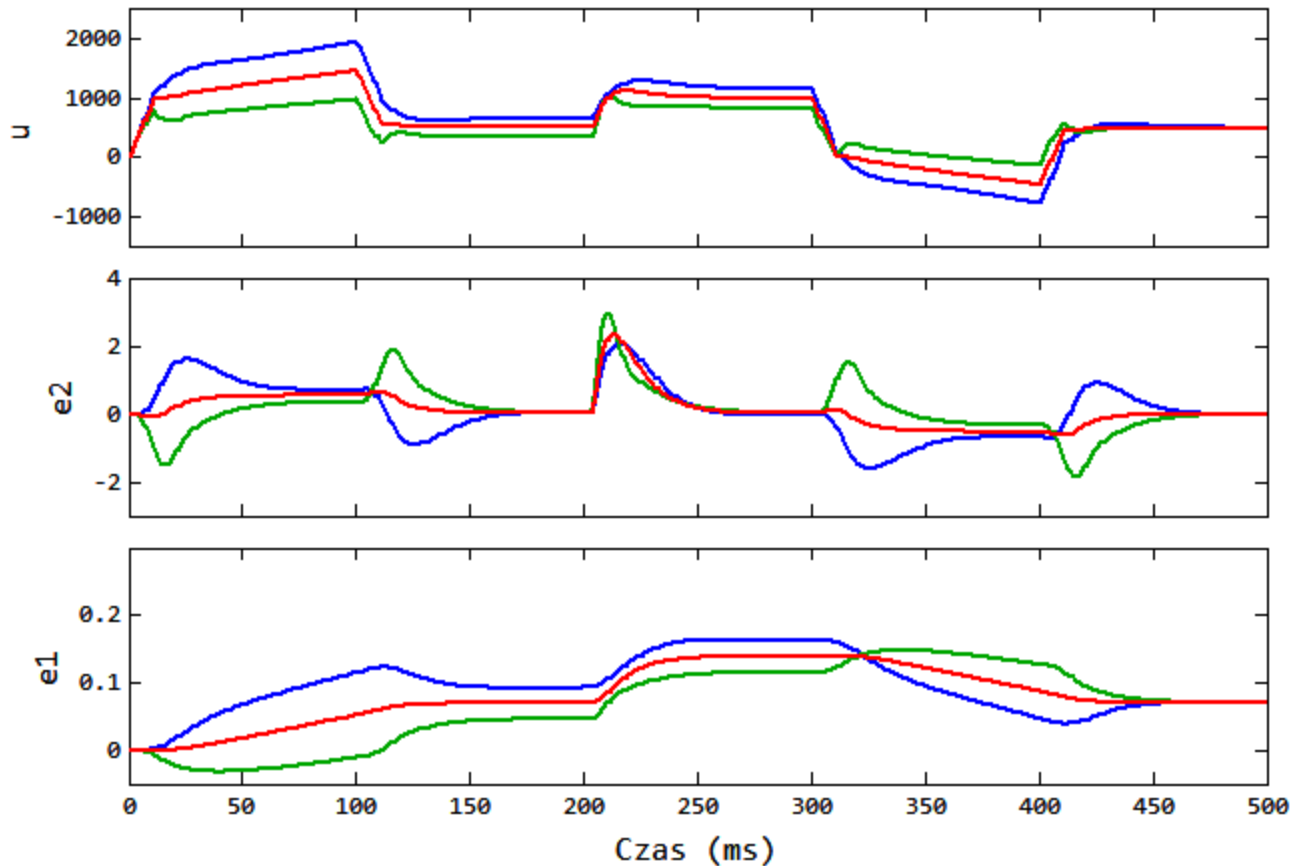
$DM > 4.5$

$PM > 48.9$

$$ST \approx 23 + 3/K_2 \approx 80\text{ms}$$

Regulacja prędkości $1/K_2=10\text{ms}$

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie
 $v_1 \ v_2 \ v_3 \ l_d \rightarrow u; e_2; e_1$



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k_2 = 0.1$

$k_1 = 0$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e_2$

$P_k < 2.91$

$ST < 457.6$

$IA < 292$

$\rightarrow e_1$

$P_k < 0.163$

$ST < 444.6$

$GM > 2.2$

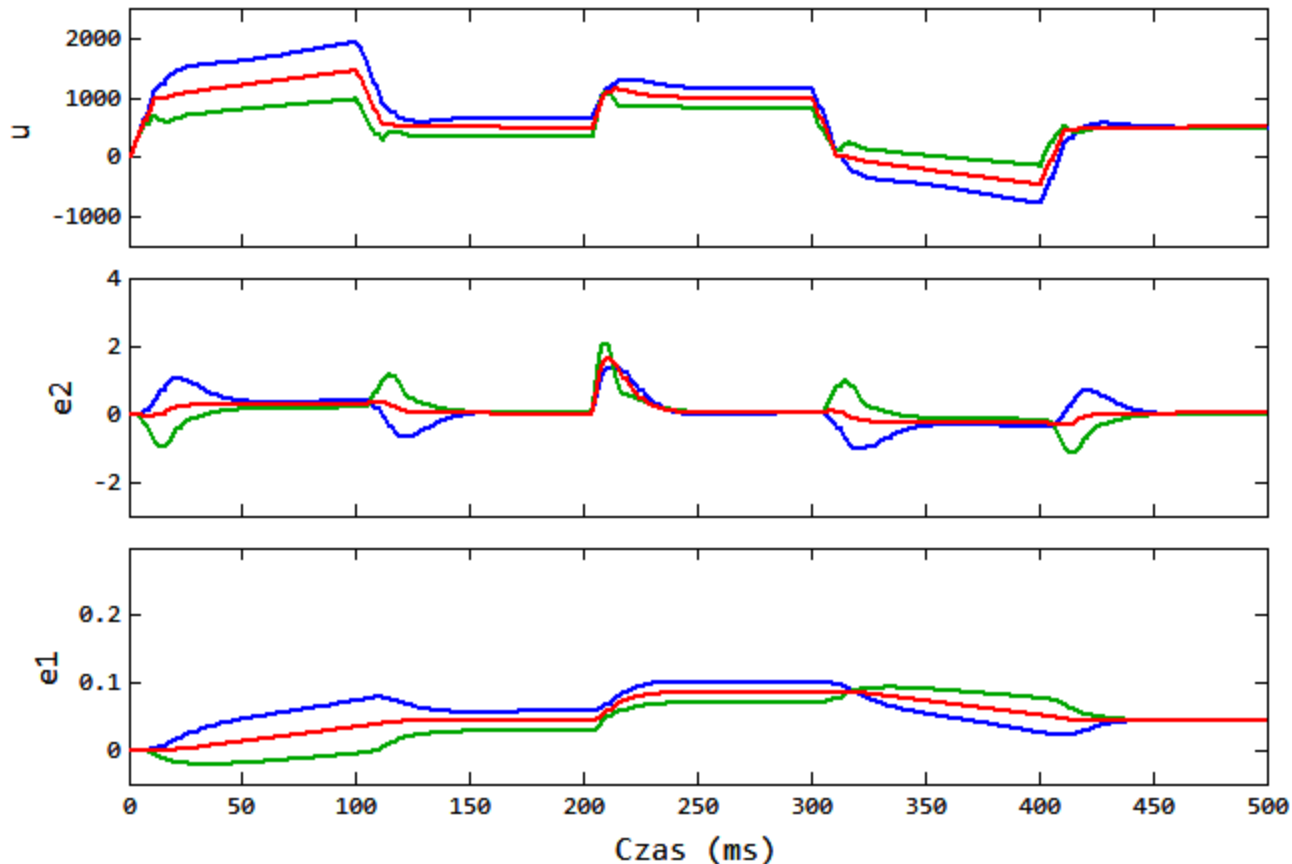
$DM > 3.3$

$PM > 42.2$

(marginesy i wskaźniki zbliżone do osiągalnych przy regulacji PI)

Regulacja prędkości $1/K_2=5\text{ms}$

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie
 $v_1 \ v_2 \ v_3 \ l_d \rightarrow u; e_2; e_1$



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k_2 = 0.2$

$k_1 = 0$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e_2$

$P_k < 2.1$

$ST < 444.5$

$IA < 153$

$\rightarrow e_1$

$P_k < 0.101$

$ST < 433.9$

$GM > 1.9$

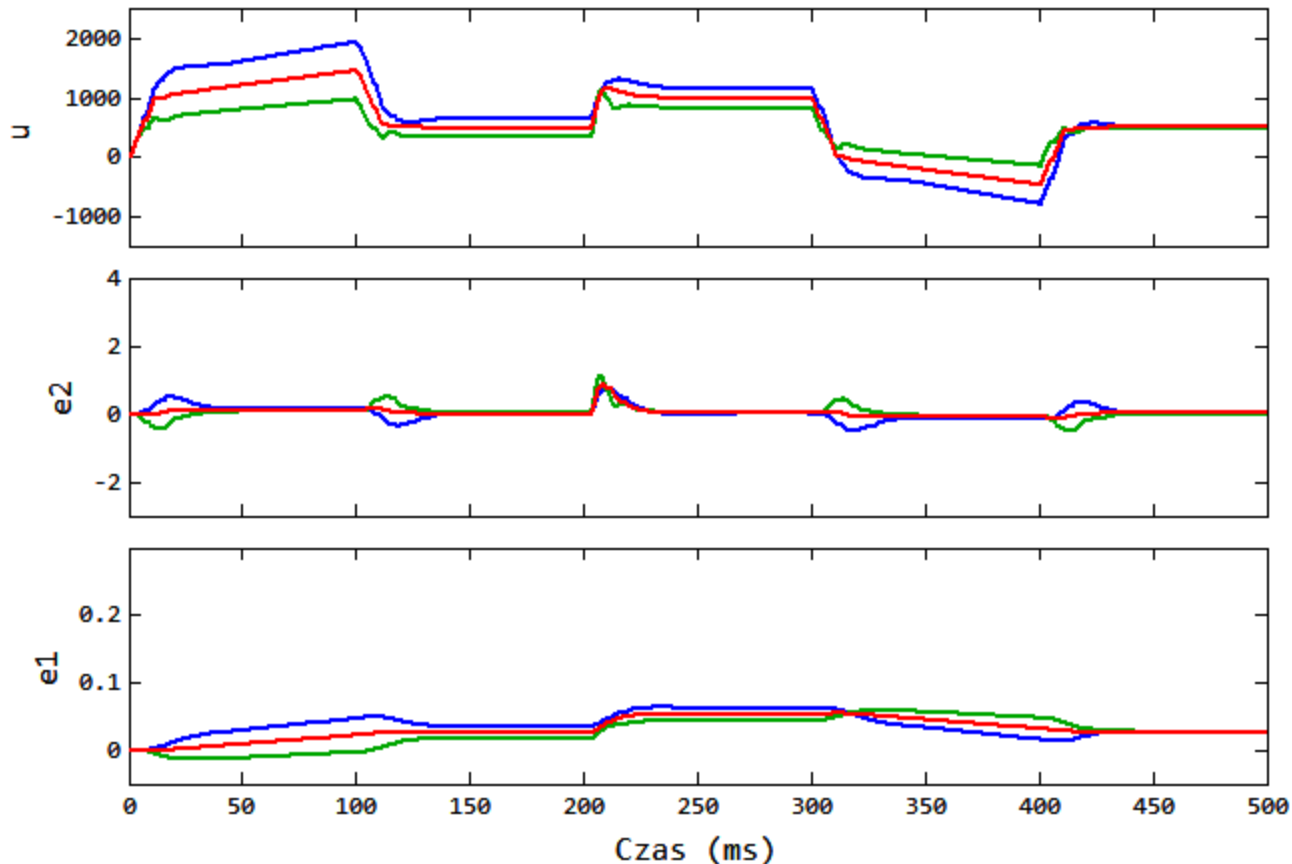
$DM > 2.3$

$PM > 36.6$

Mimo 2-krotnego zwiększenia wzmocnienia K_2 – marginesy zmalały niewiele!

Regulacja prędkości $1/K_2=2\text{ms}$

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie
 $v_1 \ v_2 \ v_3 \ l_d \rightarrow u; e_2; e_1$



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k_2 = 0.5$

$k_1 = 0$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e_2$

$P_k < 1.14$

$ST < 436.5$

$IA < 62.1$

$\rightarrow e_1$

$P_k < 0.0629$

$ST < 428.6$

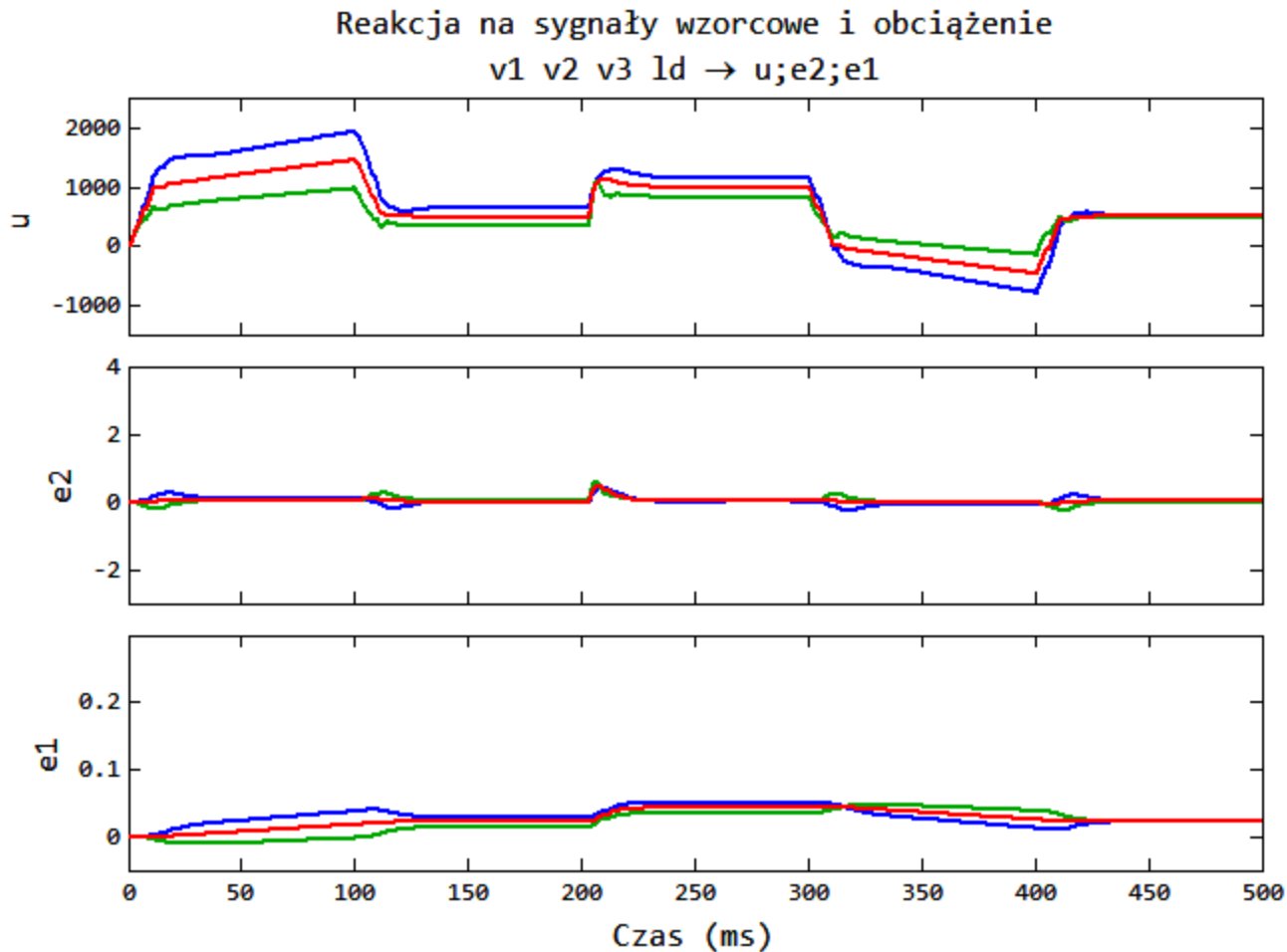
$GM > 1.6$

$DM > 1.6$

$PM > 33.8$

Wskaźniki poprawiają się radykalnie, marginesy kurczą nieznacznie!

Regulacja prędkości $1/K2=1\text{ms}$ (! dead-beat?)



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 1$

$k1 = 0$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e2$

$Pk < 0.619$

$ST < 434.1$

$IA < 31$

$\rightarrow e1$

$Pk < 0.0502$

$ST < 427.2$

$GM > 1.7$

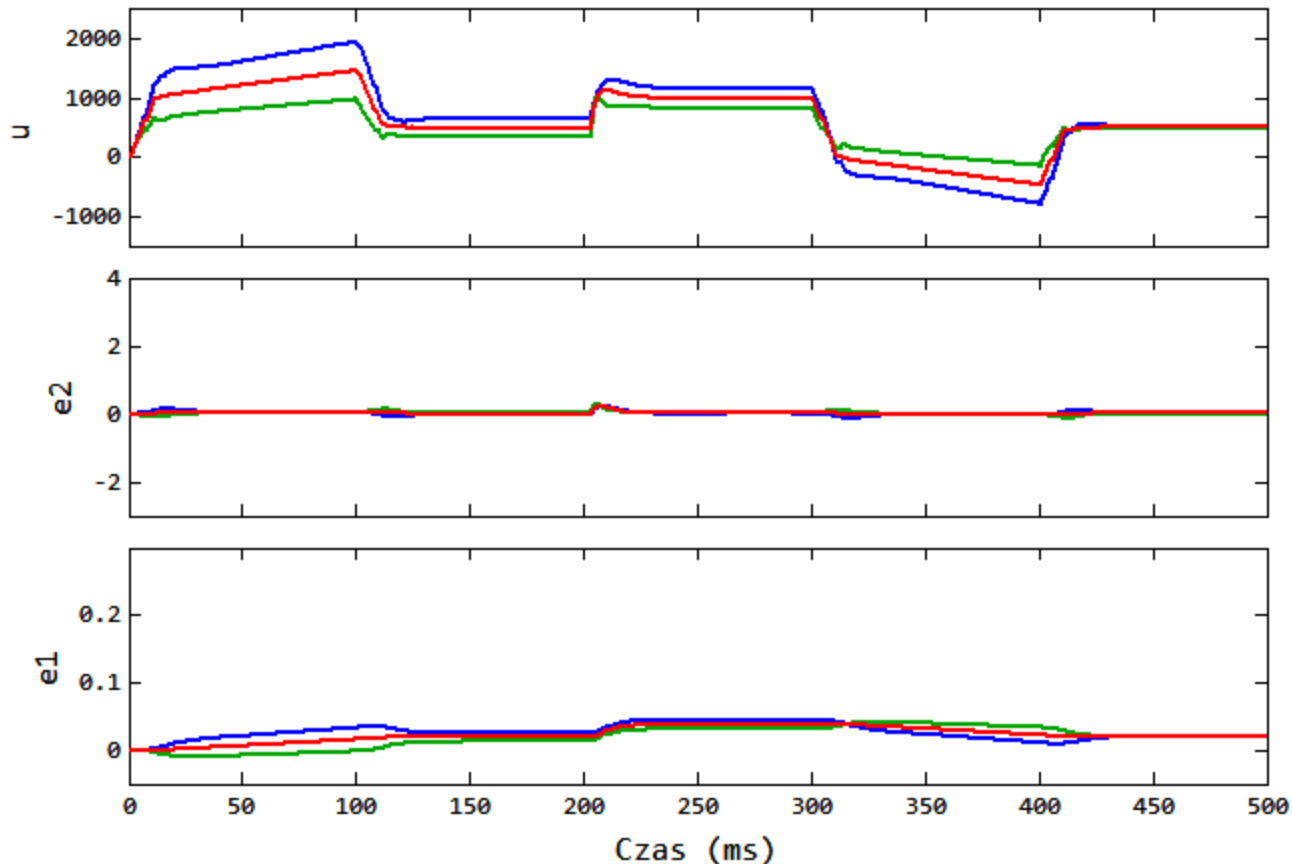
$DM > 1.5$

$PM > 35.8$

Dalsza wyraźna poprawa wskaźników, a marginesy nieznacznie wzrosły !?!

Regulacja prędkości $1/K2=0.5\text{ms}$ (!?)

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie
 $v1\ v2\ v3\ ld \rightarrow u; e2; e1$



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 2$

$k1 = 0$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e2$

$Pk < 0.292$

$ST < 432.9$

$IA < 15.5$

$\rightarrow e1$

$Pk < 0.0438$

$ST < 426.7$

$GM > 1.9$

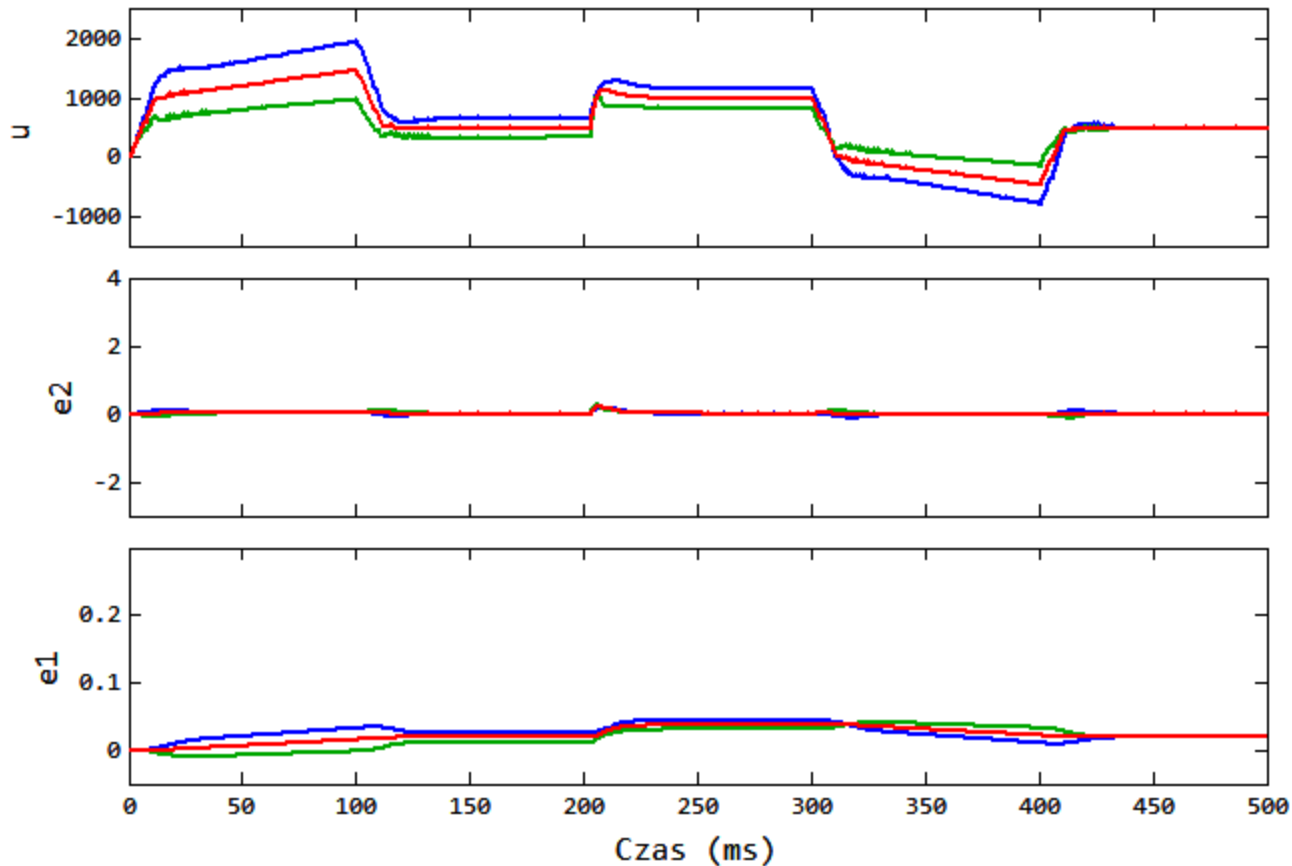
$DM > 1.5$

$PM > 39.0$

Dalsza poprawa wskaźników! Kiedy wreszcie uda się układ zdestabilizować?

Regulacja prędkości $1/K2=0.43\text{ms}$ (!?)

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie
 $v1\ v2\ v3\ ld \rightarrow u; e2; e1$



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 2.32$

$k1 = 0$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e2$

$Pk < 0.26$

$ST < 439.1$

$IA < 13.8$

$\rightarrow e1$

$Pk < 0.0429$

$ST < 426.7$

$GM > 1.9$

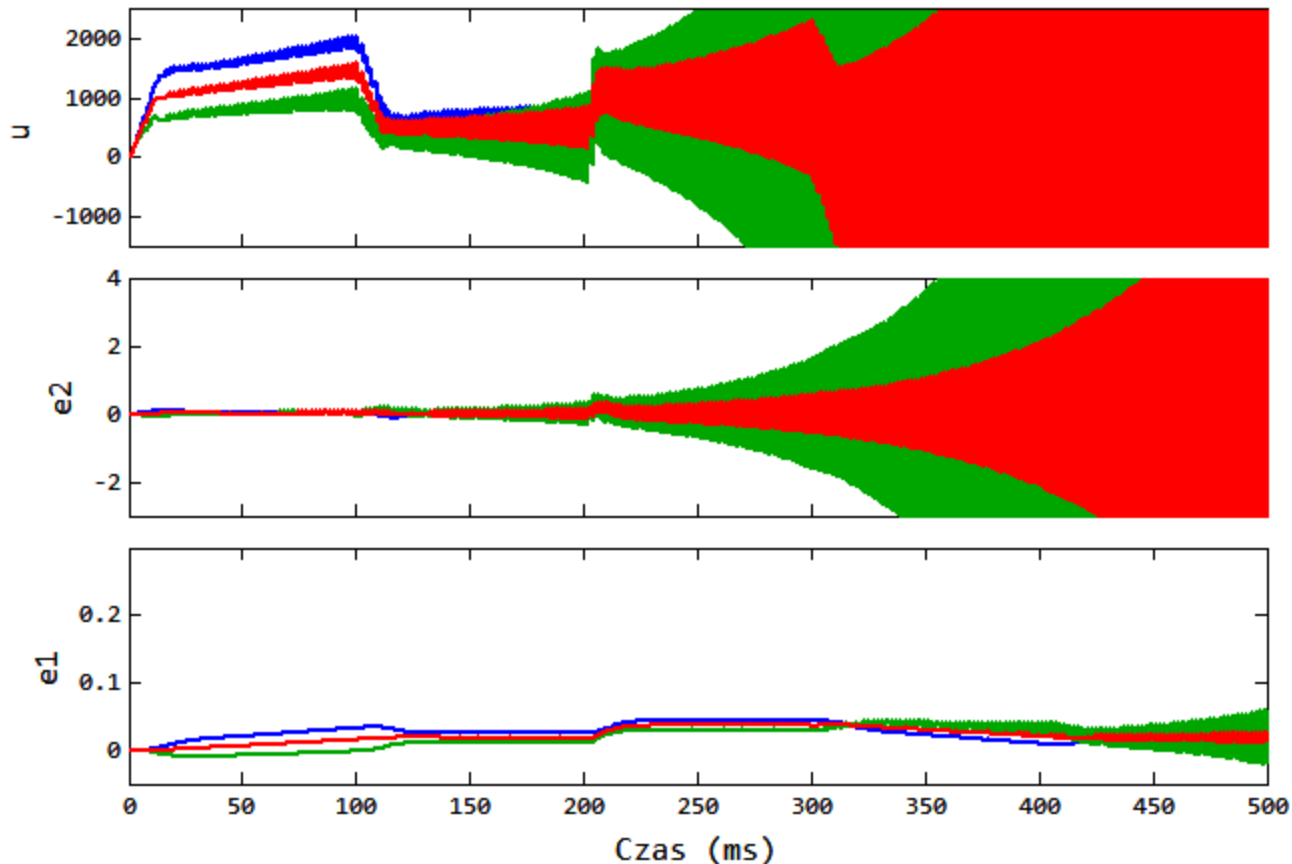
$DM > 1.5$

$PM > 39.6$

Jeszcze nie!

Regulacja prędkości $1/K2=0.427\text{ms}$

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie
 $v1\ v2\ v3\ ld \rightarrow u; e2; e1$



TDE = LESO
 $h = 1\text{ms}$
 $k2 = 2.34$
 $k1 = 0$

$\tau = 0.25$
 $\kappa = .75; 1.5; 1$
 $ph = -0.005$

$\rightarrow e2$
 $Pk < 41.8$
 $ST < 499.9$
 $IA < 2.56e+03$

$\rightarrow e1$
 $Pk < 0.0585$
 $ST < 499.9$

$GM < 1.0$
 $DM < 0.0$
 $PM < 0.0$

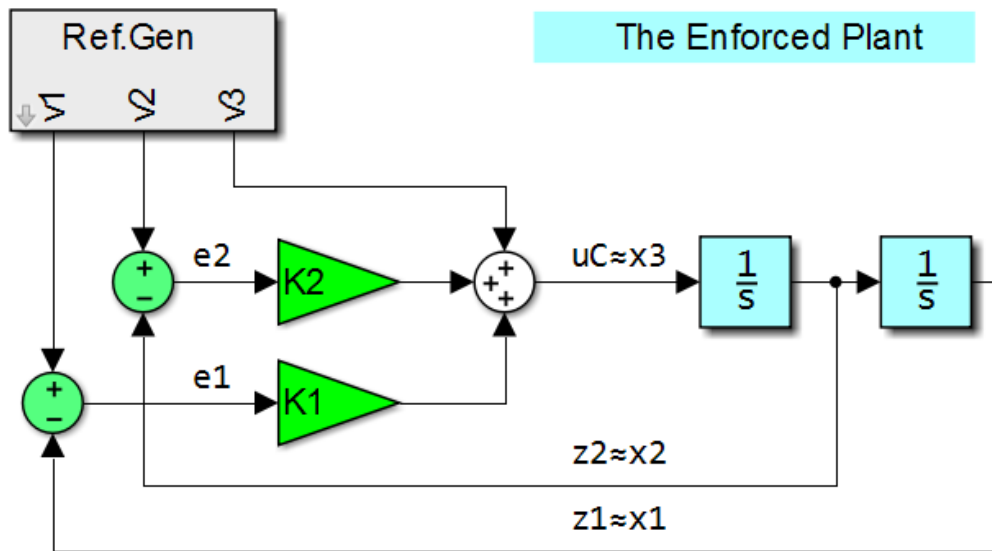
Oscylacje o okresie 2h, wzbudzają się niezależnie od parametrów obiektu

Plan wystąpienia

1. Motywacja
2. Co to jest ADRC ?
3. Przykład serwonapędu z ADRC
 - modele serwonapędu
 - praca bez regulatora
 - regulacja prędkości
 - regulacja położenia
4. Krótkie podsumowanie
5. Perspektywy, pytania, wątpliwości, zagadnienia szczegółowe



Regulacja położenia – model 2-go rzędu



równanie charakterystyczne :

$$s^2 + K_2 s + K_1 = 0$$

bieguny :

$$s_{1,2} = -\frac{K_2}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4K_1}{K_2^2}} \right)$$

wsp. tłumienia :

$$\sigma = \omega_0 \zeta = \frac{K_2}{2}; \quad \zeta = \frac{K_2}{2 \cdot \sqrt{K_1}}$$

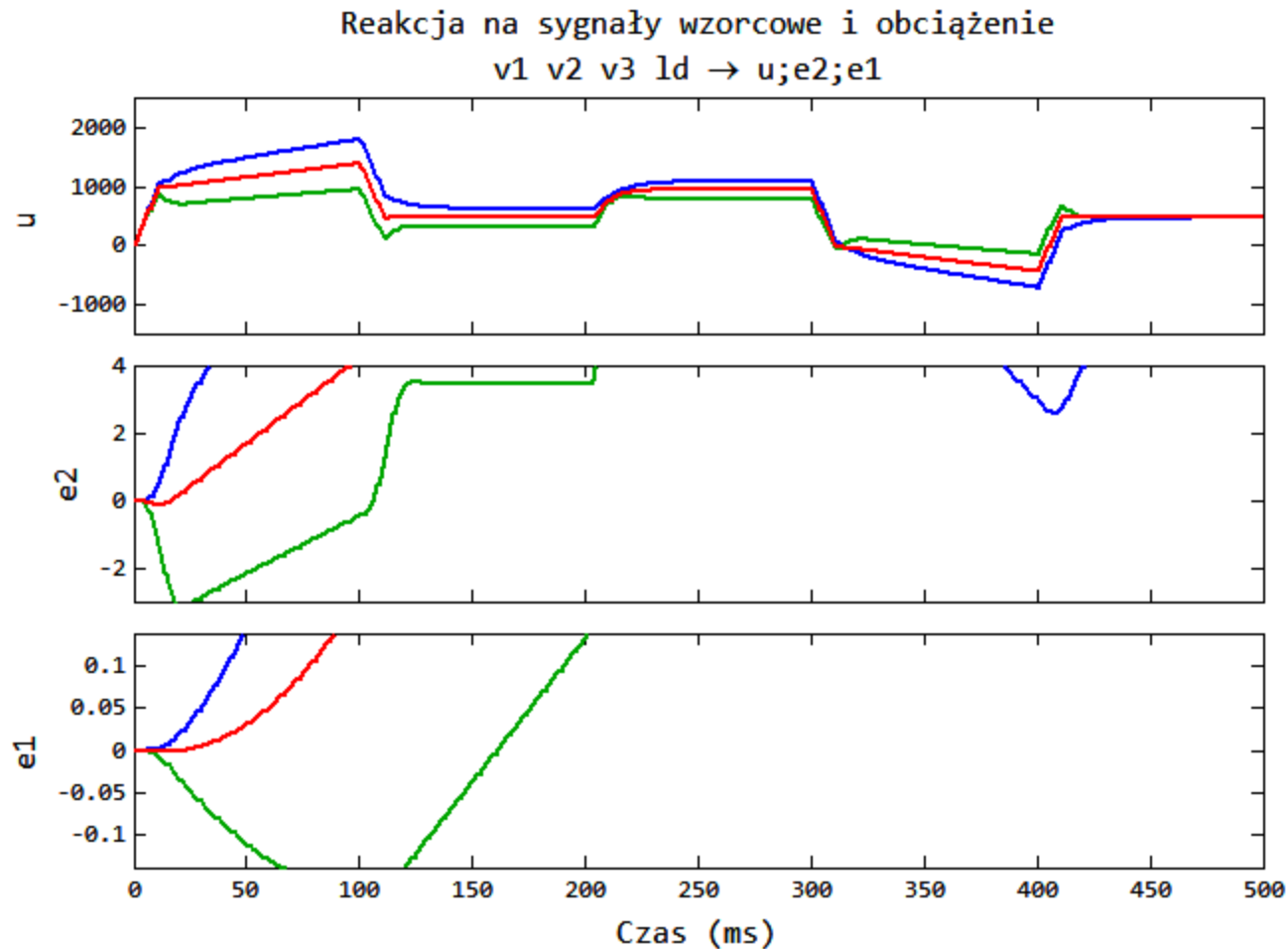
Zakładamy tłumienie krytyczne:

$$\zeta = 1 \quad \Rightarrow \quad K_1 = K_2^2 / 4$$

Współczynnik wzmocnienia K_2 pozostaje jedynym nastawialnym parametrem – tak dla regulacji prędkości, jak i położenia

Regulacja położenia; punkt wyjścia ($K_2=0$; $K_1=0$)

(sygnały te same, co dla regulacji prędkości)



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k_2 = 0$

$k_1 = 0$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

→ e2

$P_k < 11.8$

$ST < 431.0$

→ e1

$P_k < 3.43$

$ST < 473.5$

$IA < 871$

$GM > 3.6$

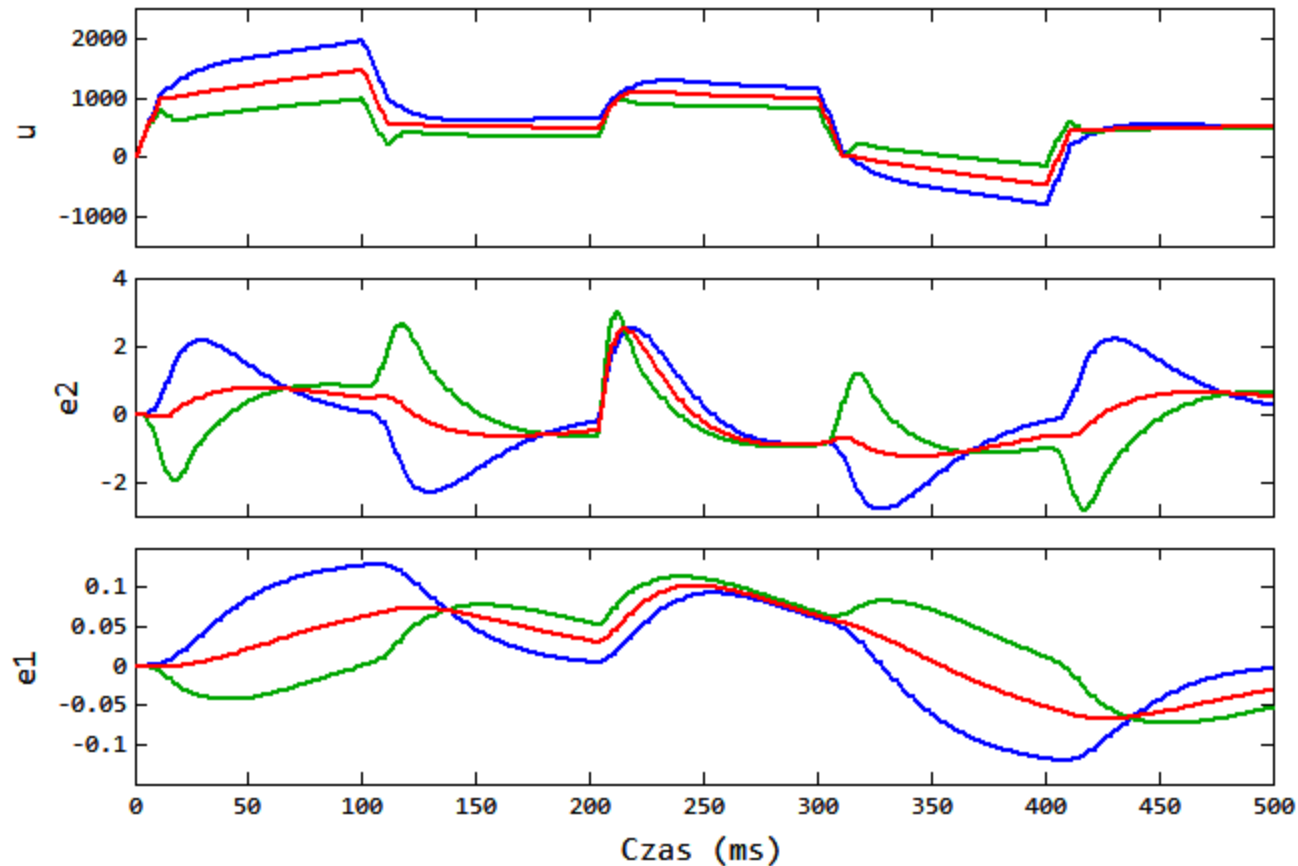
$DM > 8.2$

$PM > 65.7$

Oceniany będzie głównie uchyb położenia e1

Regulacja położenia; $1/K2 = 20\text{ms}$

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie
 $v1 \ v2 \ v3 \ ld \rightarrow u; e2; e1$



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 0.05$

$k1 = 0.000625$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e2$

$Pk < 2.95$

$ST < 488.9$

$\rightarrow e1$

$Pk < 0.128$

$ST < 487.6$

$IA < 31.7$

$GM > 2.6$

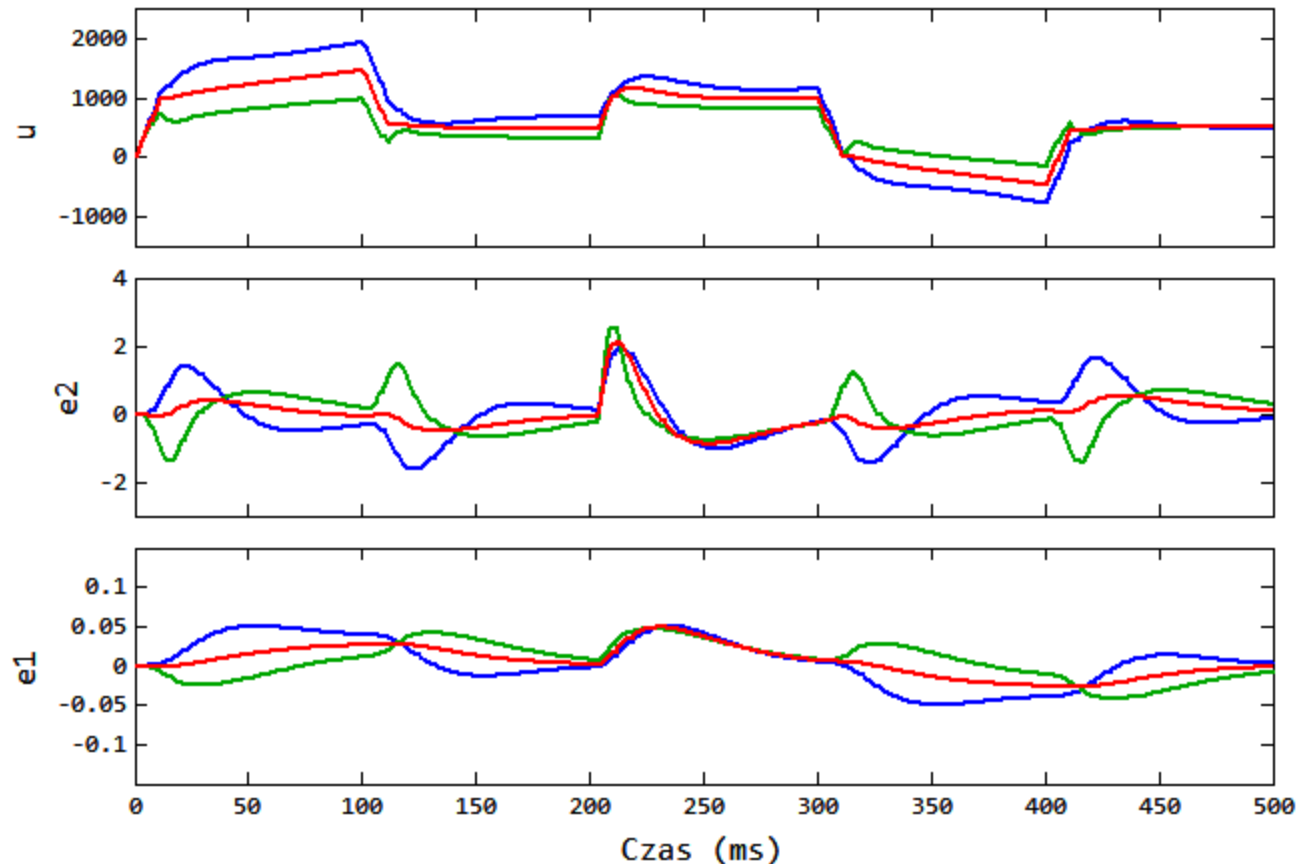
$DM > 4.4$

$PM > 47.8$

(czasy ustalania większe niż dla reg. prędkości – układ II rzędu)

Regulacja położenia; $1/K2 = 10\text{ms}$

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie
 $v1 \ v2 \ v3 \ ld \rightarrow u; e2; e1$



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 0.1$

$k1 = 0.0025$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e2$

$Pk < 2.56$

$ST < 488.1$

$\rightarrow e1$

$Pk < 0.0505$

$ST < 491.7$

$IA < 12.3$

$GM > 2.1$

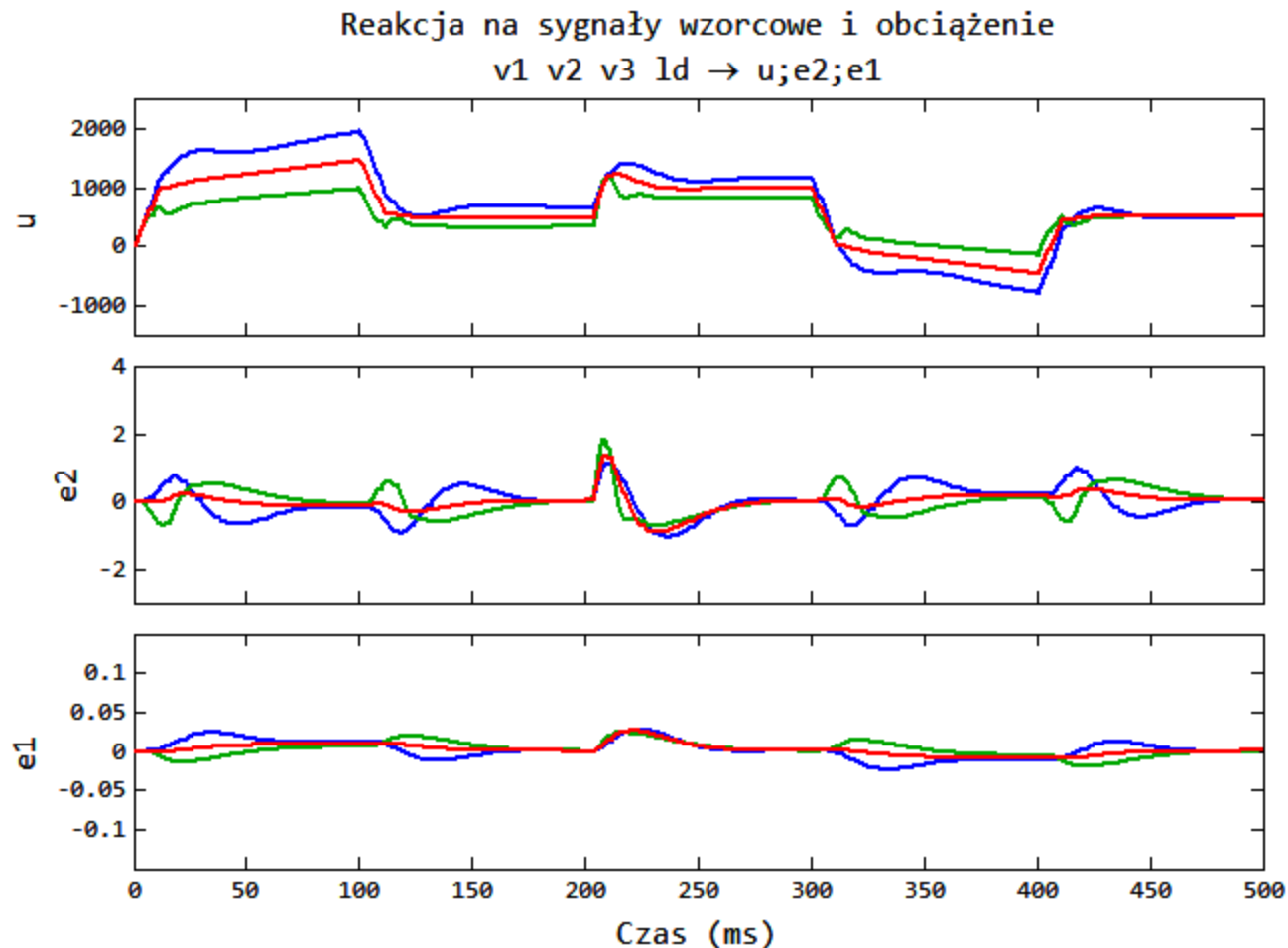
$DM > 3.0$

$PM > 39.3$

(marginesy i wskaźniki porównywalne z regulatorem P-PI)

P-PI: $Pk < 0.058$, $ST < 486$, $IA < 9.5$ $GM > 1.8$, $DM > 1.4$ $PM > 30.4$

Regulacja położenia $1/K2 = 5\text{ms}$



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 0.2$

$k1 = 0.01$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

→ $e2$

$Pk < 1.83$

$ST < 475.9$

→ $e1$

$Pk < 0.028$

$ST < 475.8$

$IA < 4.46$

$GM > 1.7$

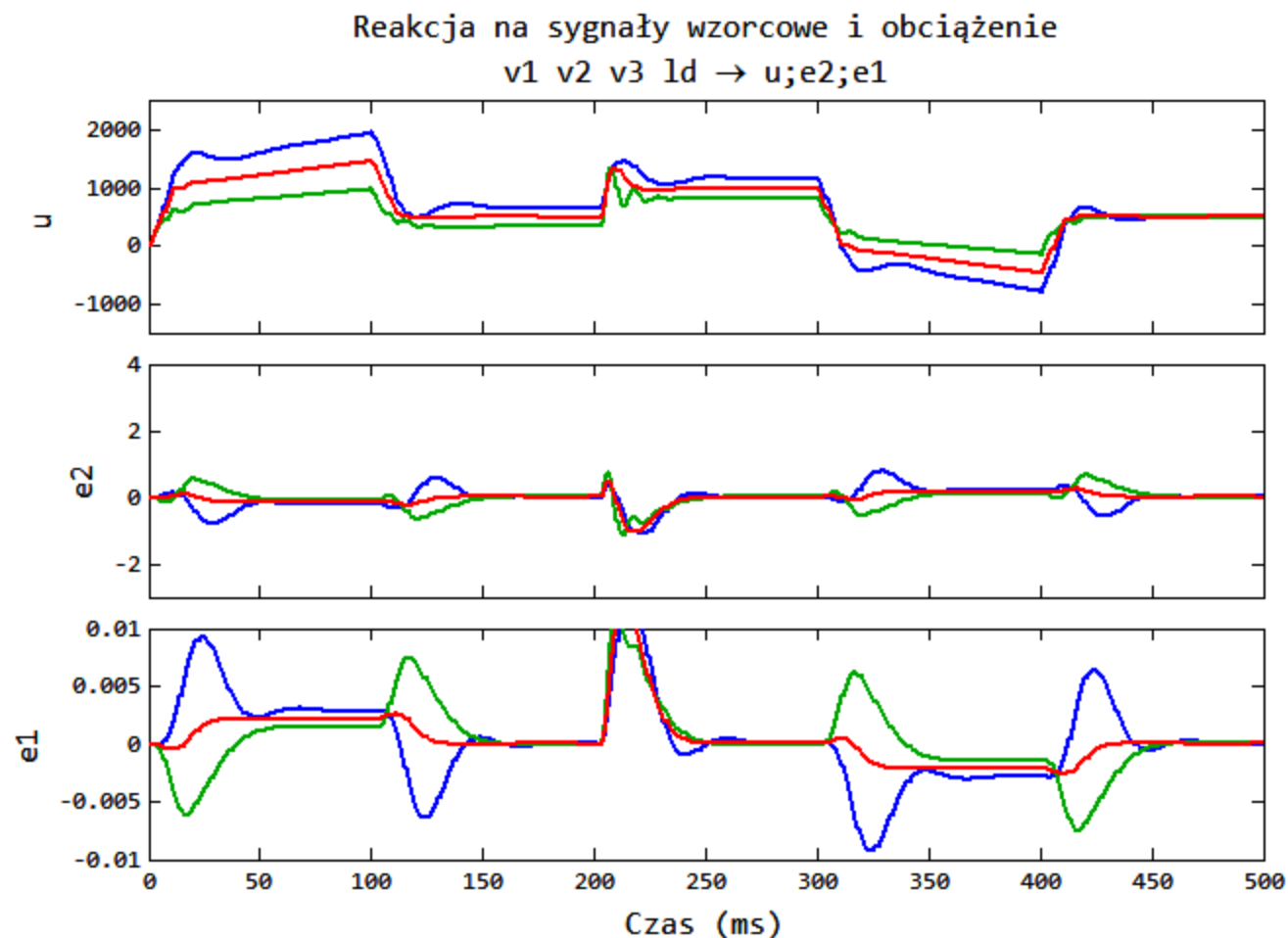
$DM > 1.8$

$PM > 30.6$

(marginesy i wskaźniki porównywalne z regulatorem P-PI) ($T3=4.3$, $T2=11.5$, $T1=40$
P-PI: $Pk < 0.058$, $ST < 486$, $IA < 9.5$ $GM > 1.8$, $DM > 1.4$ $PM > 30.4$

Regulacja położenia; $1/K2 = 2\text{ms}$

Zmiana skali e1!



TDE = LESO

h = 1ms

k2 = 0.5

k1 = 0.0625

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

ph = -0.005

→ e2

Pk < 1.16

ST < 449.2

→ e1

Pk < 0.0125

ST < 445.8

IA < 1.24

GM > 1.3

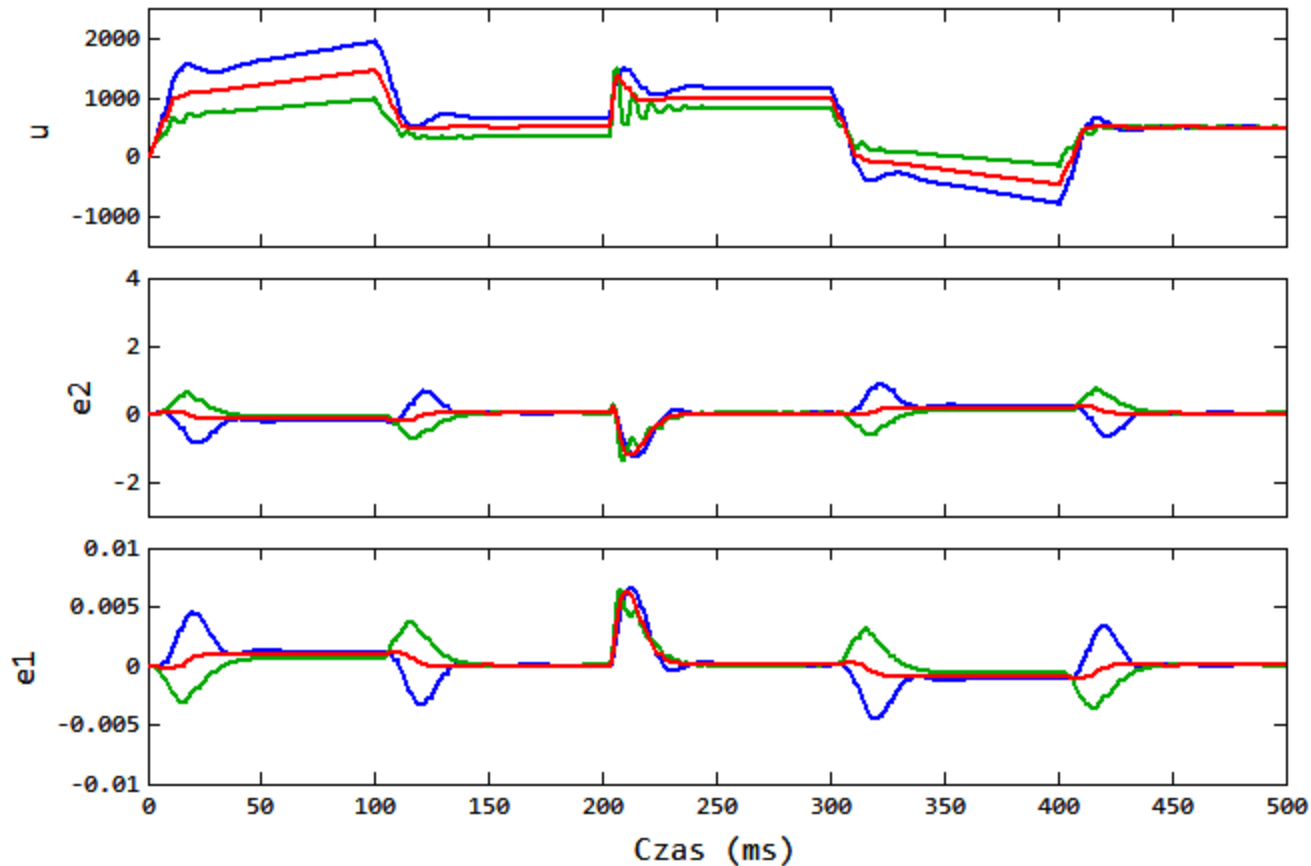
DM > 0.8

PM > 21.0

Pojawiają się pierwsze oscylacje w przebiegu sygnału sterującego (dla $\kappa=1.5$)

Regulacja położenia; $1/K_2 = 1\text{ms}$

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie
 $v_1 \ v_2 \ v_3 \ l_d \rightarrow u; e_2; e_1$



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k_2 = 1$

$k_1 = 0.25$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e_2$

$P_k < 1.4$

$ST < 437.6$

$\rightarrow e_1$

$P_k < 0.0066$

$ST < 436.8$

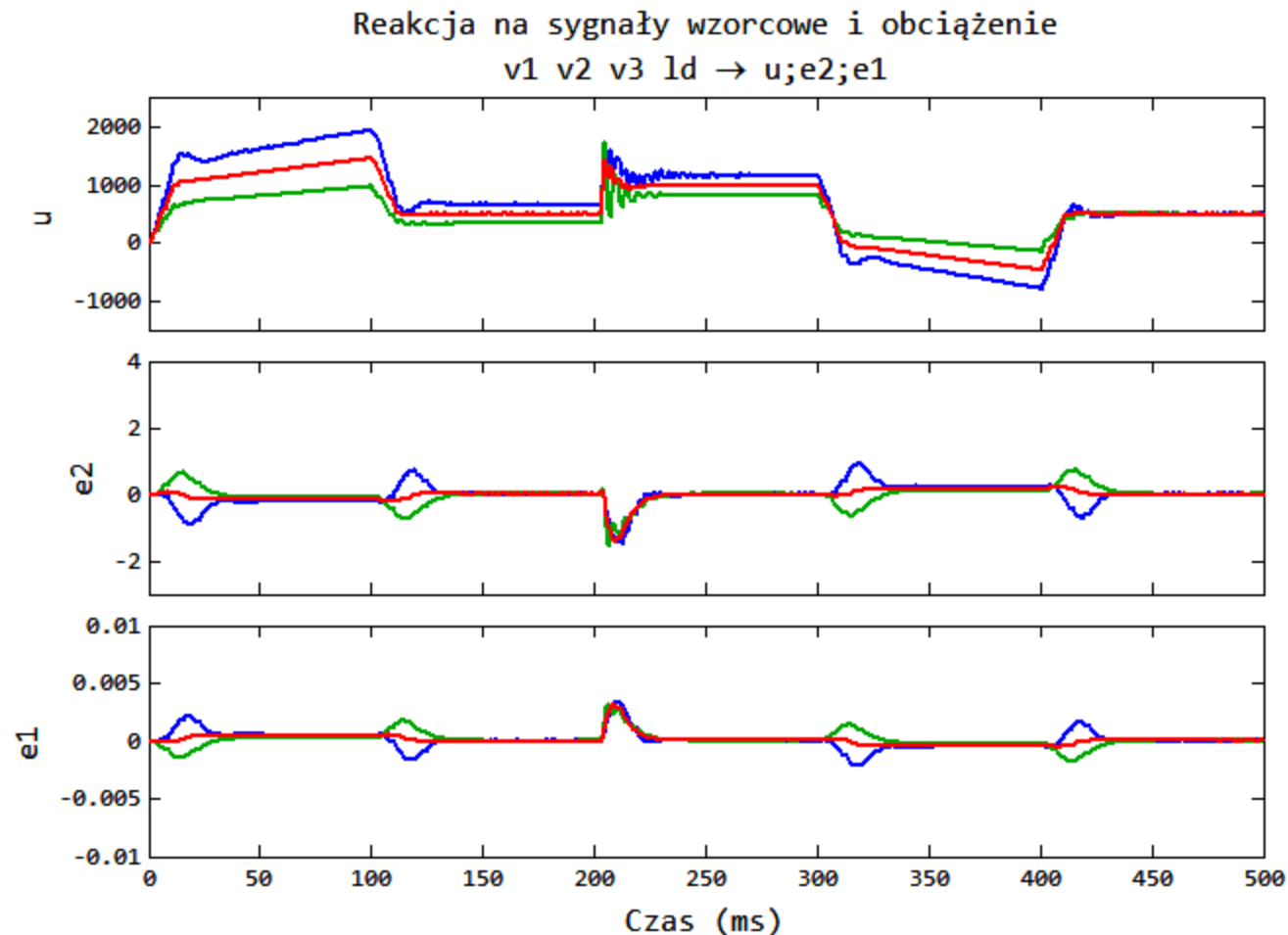
$IA < 0.501$

$GM > 1.2$

$DM > 0.5$

$PM > 17.3$

Regulacja położenia; $1/K_2 = 0.5\text{ms}$



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k_2 = 2$

$k_1 = 1$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e_2$

$P_k < 1.54$

$ST < 432.9$

$\rightarrow e_1$

$P_k < 0.00334$

$ST < 432.9$

$IA < 0.216$

$GM > 1.1$

$DM > 0.3$

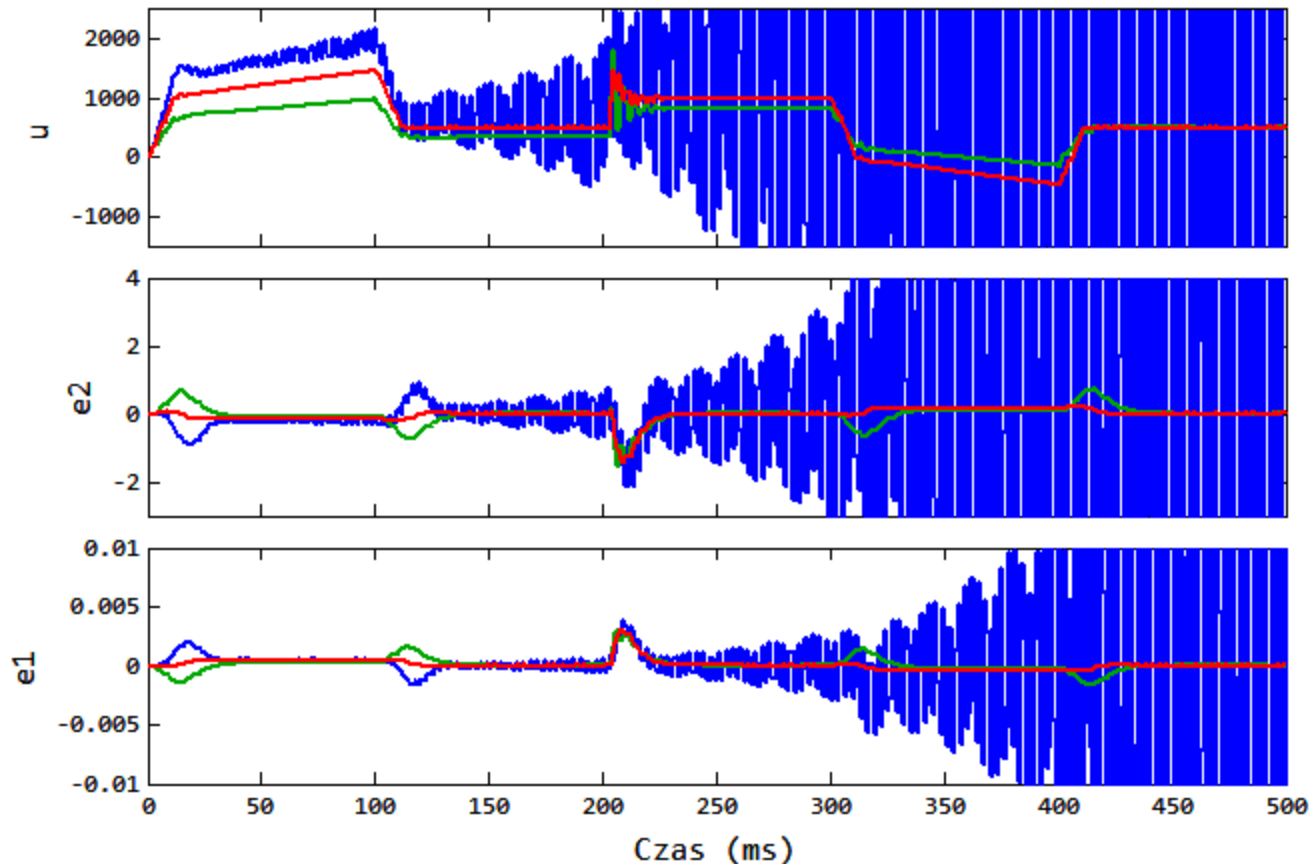
$PM > 19.5$

b. małe marginesy stabilności, szybkie oscylacje dla $\kappa=0.5$ (?)

Regulacja położenia; $1/K2 = 0.48\text{ms}$

niestabilność (dla $\kappa=0.75$!)

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie
v1 v2 v3 ld → u;e2;e1



TDE = LESO

h = 1ms

k2 = 2.1

k1 = 1.1

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

ph = -0.005

→ e2

Pk < 71.5

ST < 499.8

→ e1

Pk < 0.0673

ST < 499.9

IA < 2.91

GM < 1.0

DM < 0.0

PM < 0.0



Plan wystąpienia

1. Motywacja
2. Co to jest ADRC ?
3. Przykład serwonapędu z ADRC
4. Krótkie podsumowanie
5. Perspektywy, pytania, wątpliwości, zagadnienia szczegółowe



Krótkie podsumowanie

Zalety:

- **struktura** (rozłożenie zadań na 3 podzespoły)
- **prostota** (tylko jeden istotny parametr obiektu i jeden regulatora)
- **odporność**
- **łatwość nastawiania**
- (*mniej problemów i lepsze wyniki niż PID*)
- **duże możliwości rozwoju** (w każdym z podzespołów)

Trudności:

- **metoda jak dotąd mało znana**
- **konieczność radykalnej zmiany sposobu myślenia**

Plan wystąpienia

1. Motywacja
2. Co to jest ADRC ?
3. Przykład serwonapędu z ADRC
4. Krótkie podsumowanie
5. Perspektywy, pytania, wątpliwości, zagadnienia szczegółowe



Zagadnienia szczegółowe;

1. Jak są zbudowane i jak działają bloki RG , LESO , I2DT
2. Szkic metodyki projektowania ADRC i oceny jakości
3. Wyjaśnienie odporności na wielkie wartości K_2
4. Charakterystyki obciążeniowe serwonapędu
5. Czy konieczne jest sterowanie z użyciem v_3 ?
6. Co z ograniczaniem sygnału sterującego?
7. Przemilczenia, niedopowiedzenia, wątpliwości
8. Całkujący regulator przyspieszenia jako 'rejector' ADRC
9. Zagadnienia ogólne, perspektywy rozwoju



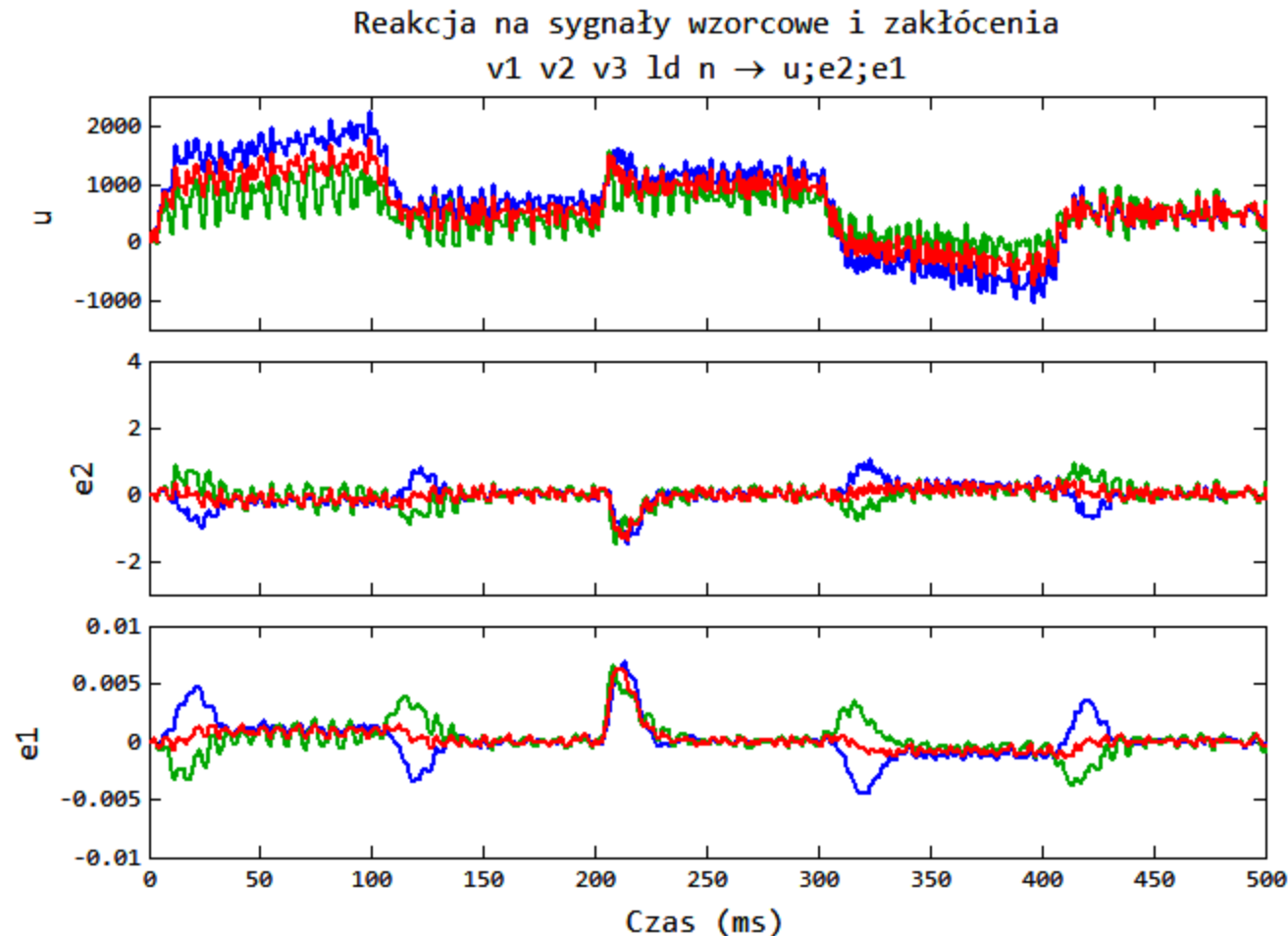
Zagadnienia szczegółowe

1. Jak są zbudowane i jak działają bloki RG , LESO , I2DT
2. Szkic metodyki projektowania ADRC i oceny jakości
3. Wyjaśnienie odporności na wielkie wartości K_2
4. Charakterystyki obciążeniowe serwonapędu
5. Czy konieczne jest sterowanie z użyciem v_3 ?
6. Przemilczenia, niedopowiedzenia, wątpliwości
7. Całkujący regulator przyspieszenia jako rejector w ADRC
8. Zagadnienia ogólne, perspektywy rozwoju



Ze wzrostem wzmocnień rośnie poziom szumów w sygnale u

(regulacja położenia, $1/K_2=1\text{ms}$)



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k_2 = 1$

$k_1 = 0.25$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e_2$

$P_k < 1.5$

$ST < 499.8$

$\rightarrow e_1$

$P_k < 0.00685$

$ST < 499.1$

$IA < 0.532$

$GM > 1.2$

$DM > 0.5$

$PM > 17.3$

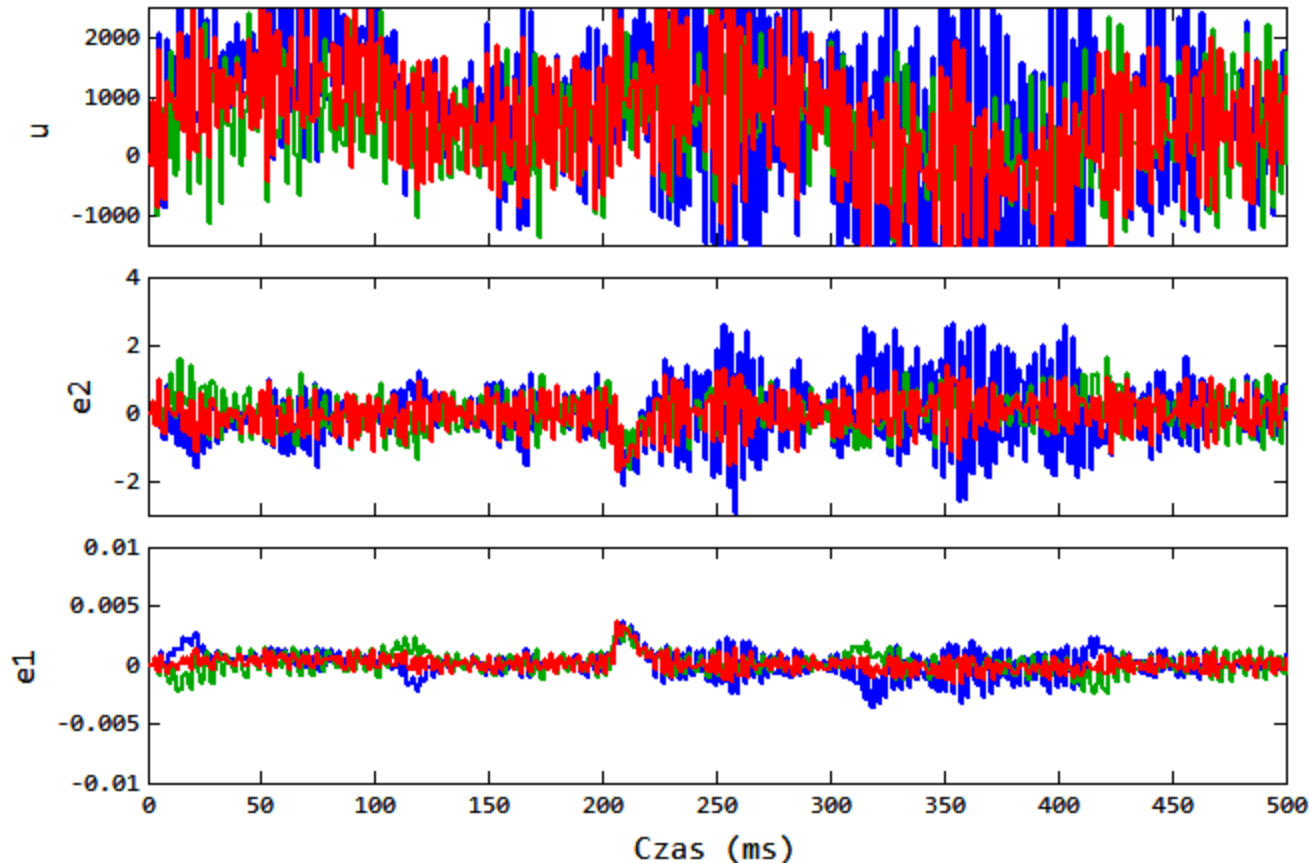
(szum w sygnale 'u' znaczny, być może akceptowalny)

Ze wzrostem wzmocnień rośnie poziom szumów w sygnale u

(regulacja położenia, $1/K_2=0.5\text{ms}$)

Reakcja na sygnały wzorcowe i zakłócenia

v1 v2 v3 ld n $\rightarrow$ u; e2; e1



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k_2 = 2$

$k_1 = 1$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e_2$

$P_k < 2.99$

$ST < 499.9$

$\rightarrow e_1$

$P_k < 0.00367$

$ST < 499.9$

$IA < 0.433$

$GM > 1.1$

$DM > 0.3$

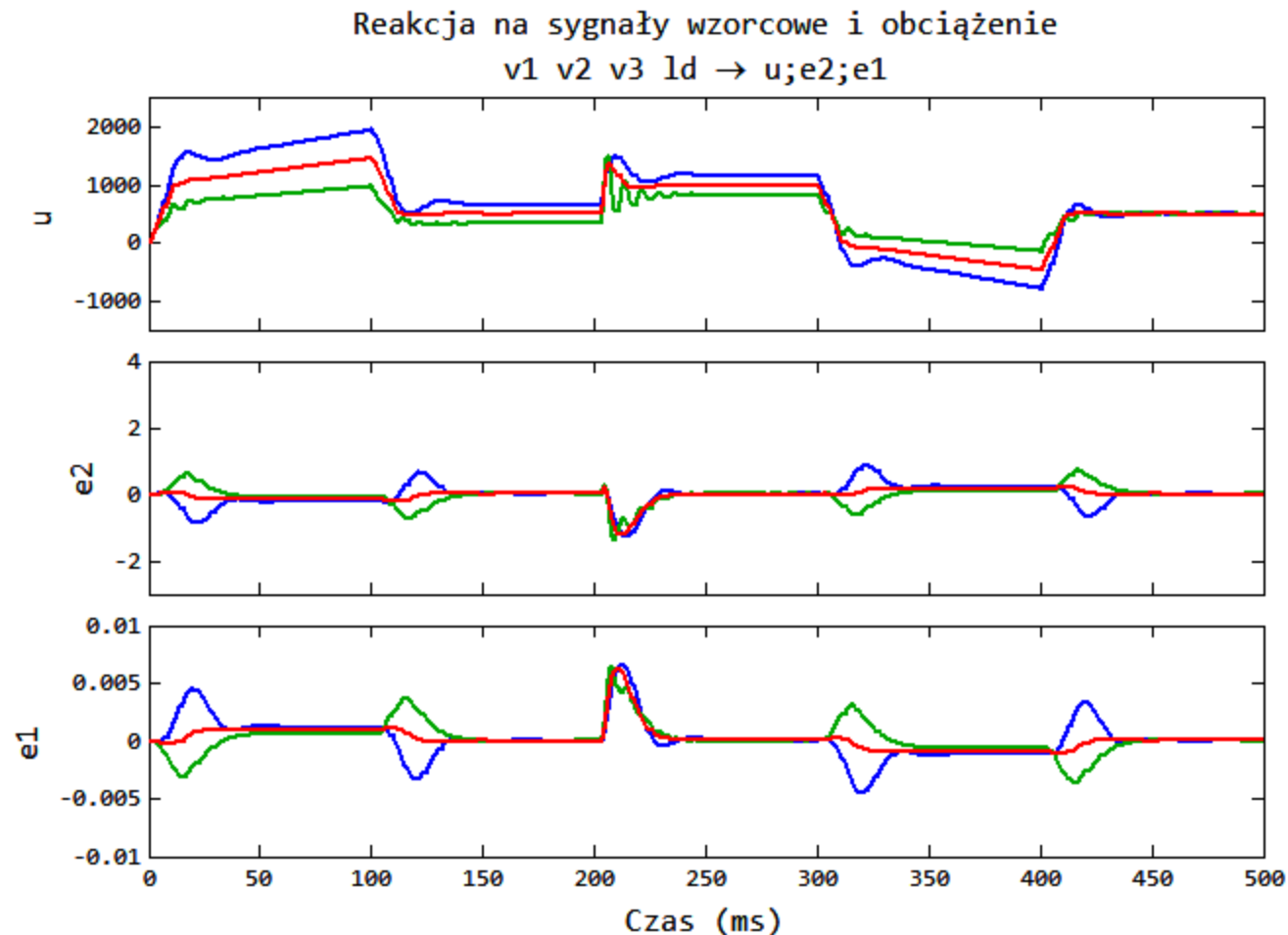
$PM > 19.5$

Poziom szumu, u_{Pk} , jest nieliniową funkcją obu wzmocnień:

$$u_{Pk} \approx 2 \cdot n_{\max} \cdot h^{-2} \cdot \left(\frac{1}{32} + \frac{1}{3k_2} + \frac{1}{k_1} \right)$$

Uchyb $e1x=v1-x1$ jest większy niż $e1=v1-z1$

(regulacja położenia, $1/K2=1ms$, wykresy u , $e2,e1$)



TDE = LESO

$h = 1ms$

$k2 = 1$

$k1 = 0.25$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e2$

$Pk < 1.4$

$ST < 437.6$

$\rightarrow e1$

$Pk < 0.0066$

$ST < 436.8$

$IA < 0.501$

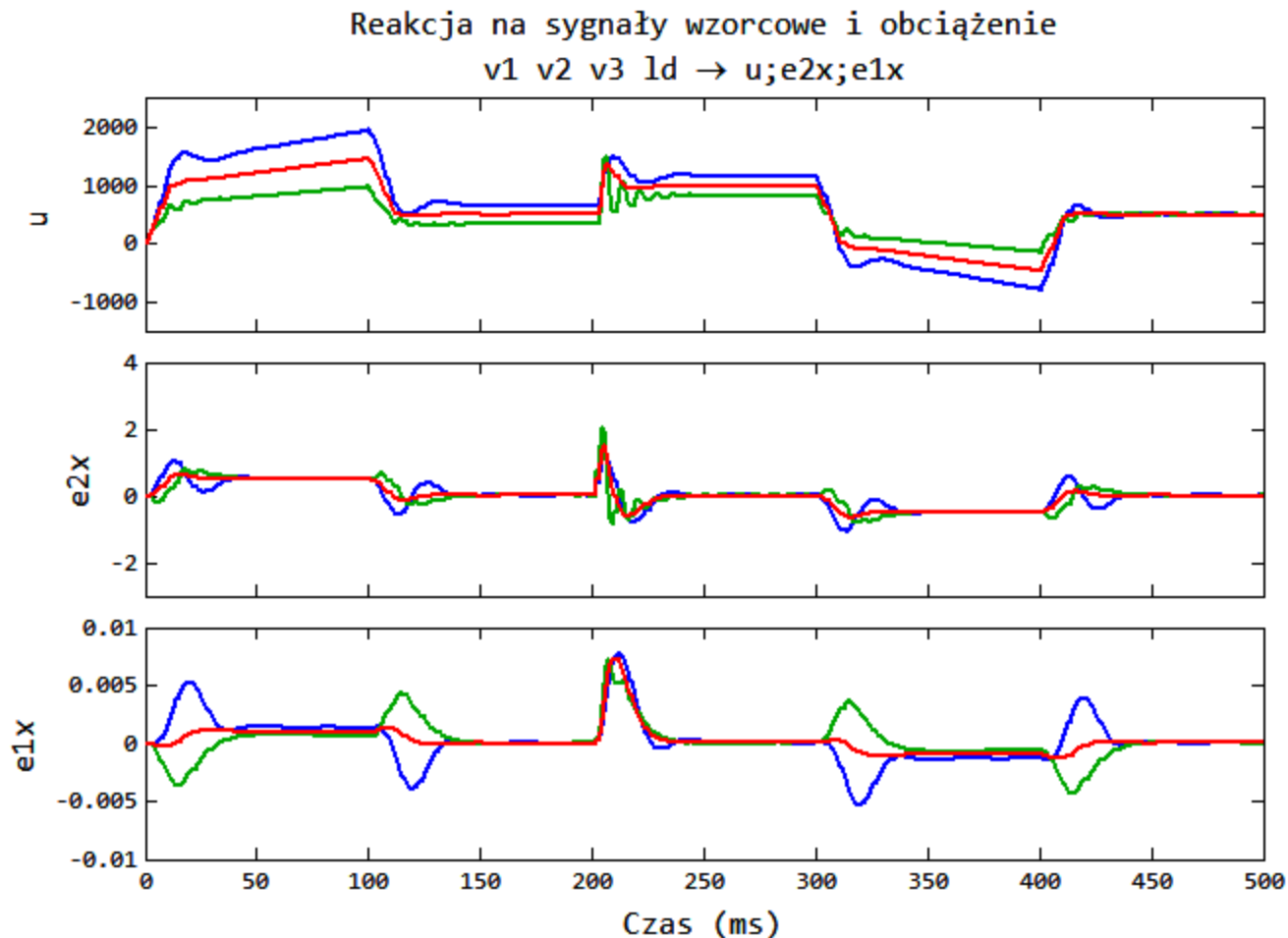
$GM > 1.2$

$DM > 0.5$

$PM > 17.3$

Uchyb $e1x=v1-x1$ jest większy niż $e1=v1-z1$

(regulacja położenia, $1/K2=1ms$, wykresy u , $e2x$, $e1x$)



TDE = LESO

$h = 1ms$

$k2 = 1$

$k1 = 0.25$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e2x$

$Pk < 2.03$

$ST < 435.5$

$\rightarrow e1x$

$Pk < 0.00776$

$ST < 436.6$

$IA < 0.594$

$GM > 1.2$

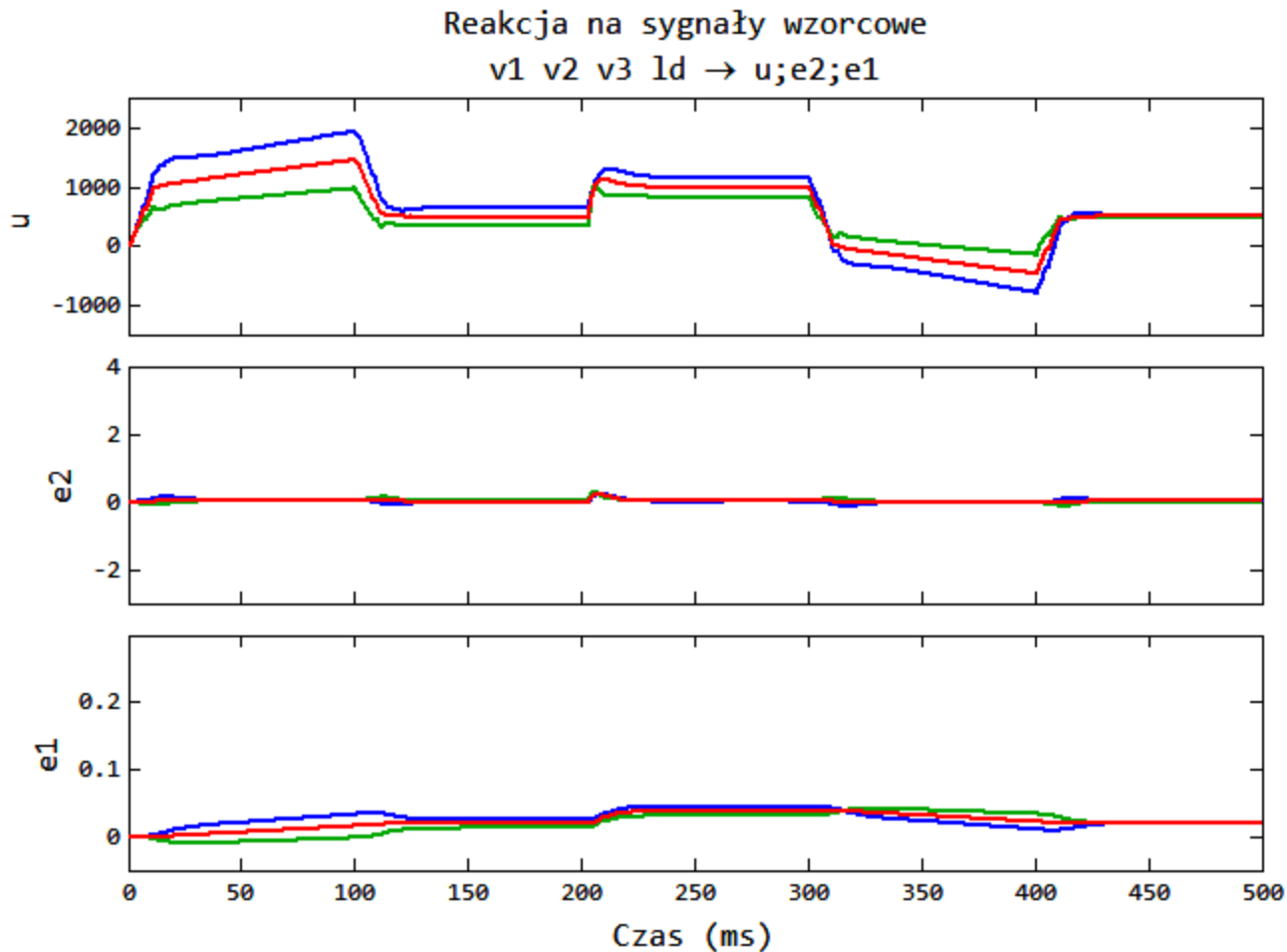
$DM > 0.5$

$PM > 17.3$

(różnice stają się zauważalne tylko przy dużych wartościach wzmocnień)

Uchyb $e2x=v2-x2$ może być znacznie większy niż $e2$

(regulacja prędkości, $k2=2$, wykresy u , $e2$, $e1$)



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 2$

$k1 = 0$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e2$

$Pk < 0.292$

$ST < 432.9$

$IA < 15.5$

$\rightarrow e1$

$Pk < 0.0438$

$ST < 426.7$

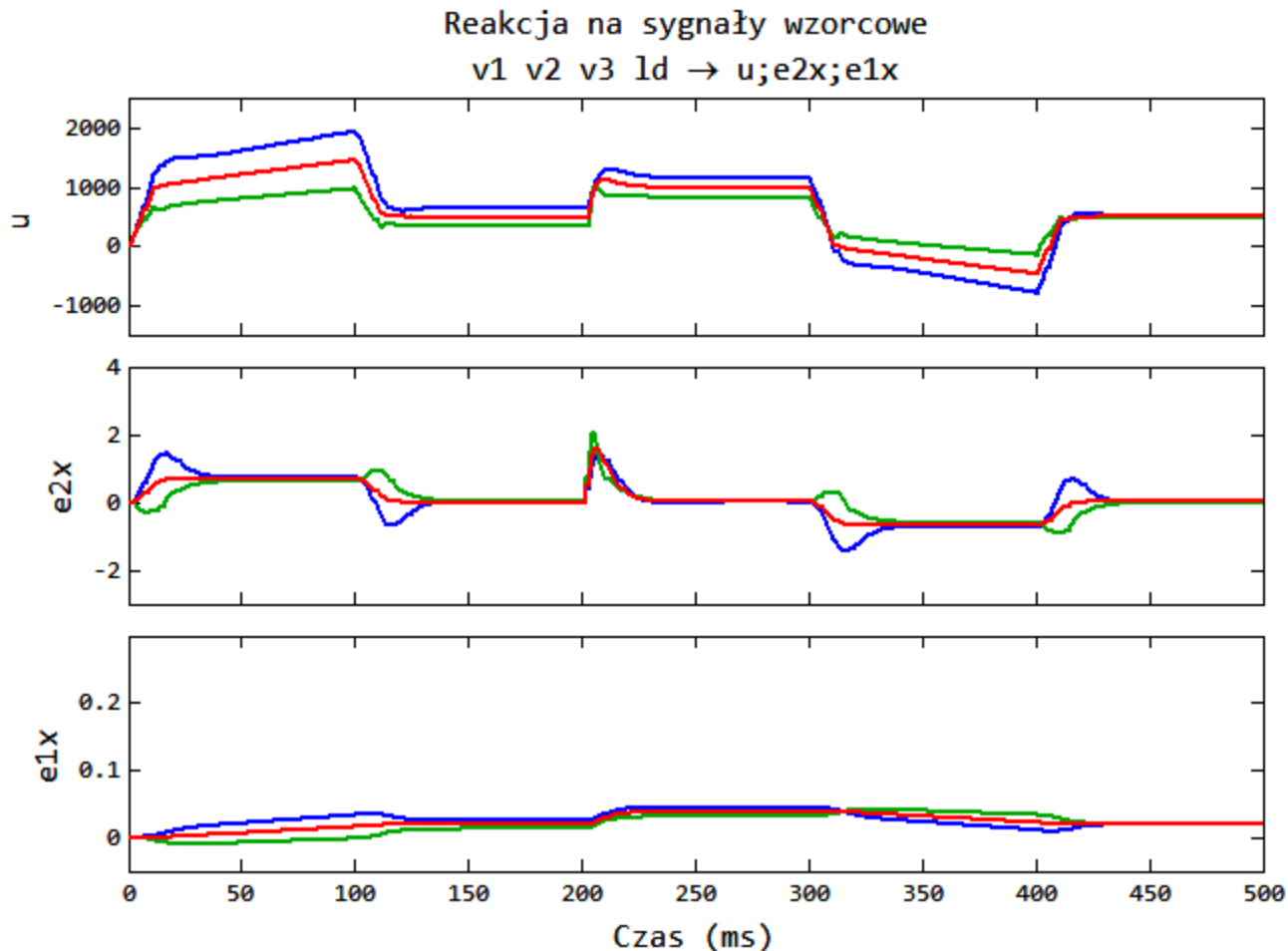
$GM > 1.9$

$DM > 1.5$

$PM > 39.0$

Uchyb $e_{2x}=v_2-x_2$ może być znacznie większy niż e_2

(regulacja prędkości, $k_2=2$, wykresy u , e_{2x} , e_{1x})



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k_2 = 2$

$k_1 = 0$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e_{2x}$

$P_k < 2$

$ST < 432.1$

$IA < 207$

$\rightarrow e_{1x}$

$P_k < 0.0438$

$ST < 425.9$

$GM > 1.9$

$DM > 1.5$

$PM > 39.0$

Wartość szczytowa e_{2x} jest 7 razy większa niż e_2 ! (różnice maleją dla mniejszych k_2)

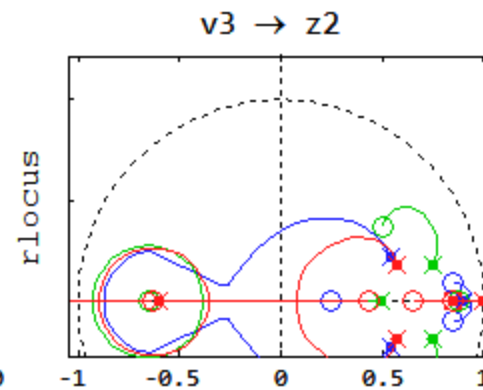
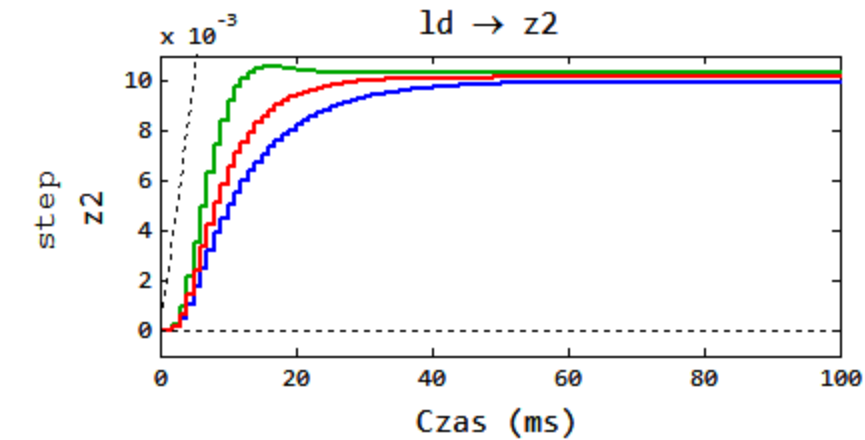


Pusty slajd



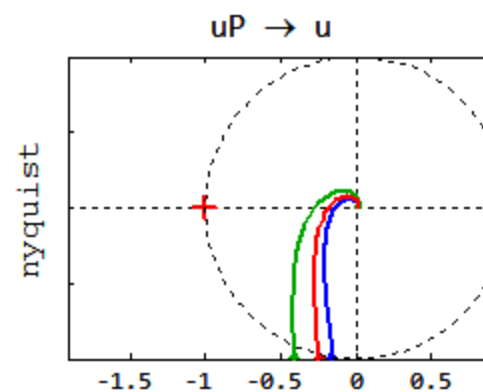
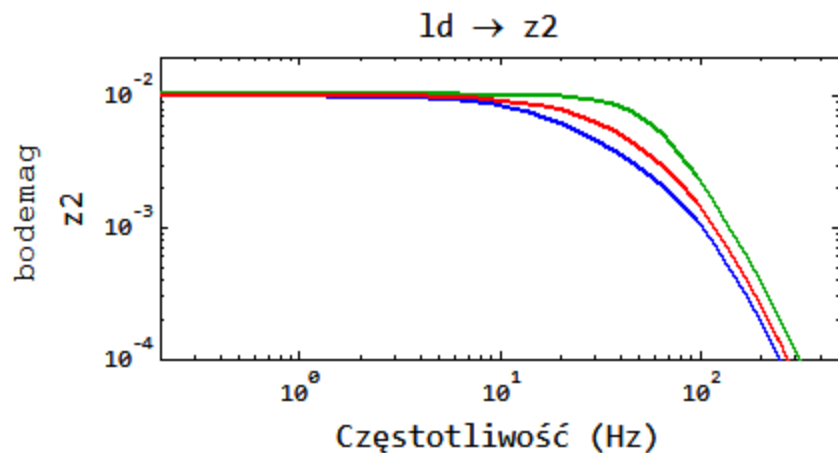
Wpływ K2 na char. obciążeniowe i stabilność

Punkt wyjścia: bez regulatora



TDE = LES0 v0
h = 1ms
k3 = 1
k2 = 0
k1 = 0

$\kappa = .75; 1.5; 1$
 $\tau = 0.25$
ph = -0.005

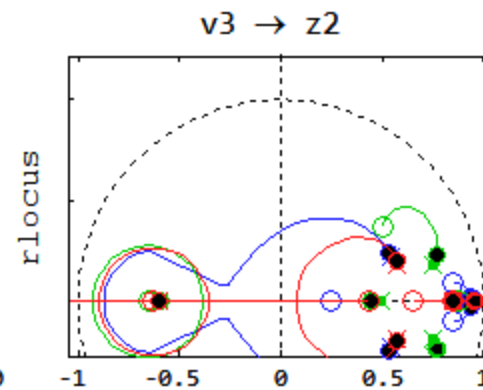
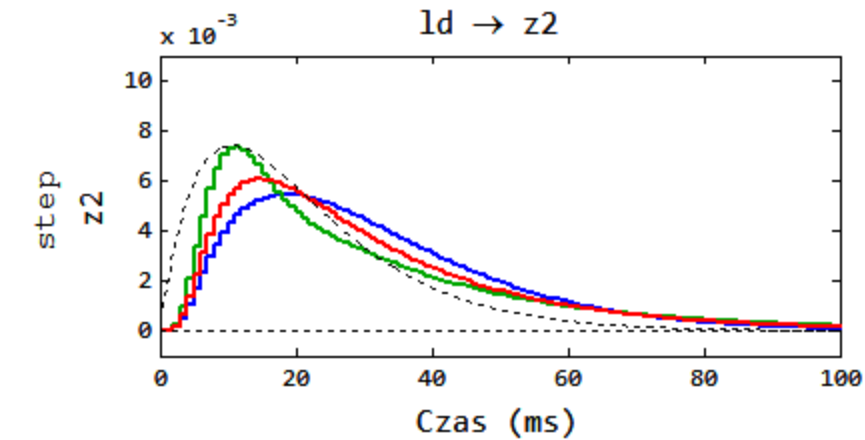


$\rightarrow$ z2
Pk < 0.0106
ST < 33.0
IA < 1.03

GM > 3.6
DM > 8.2
PM > 65.7

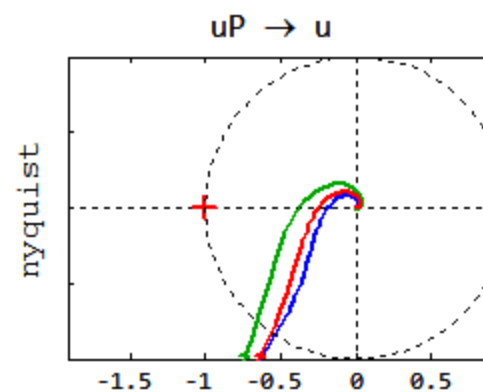
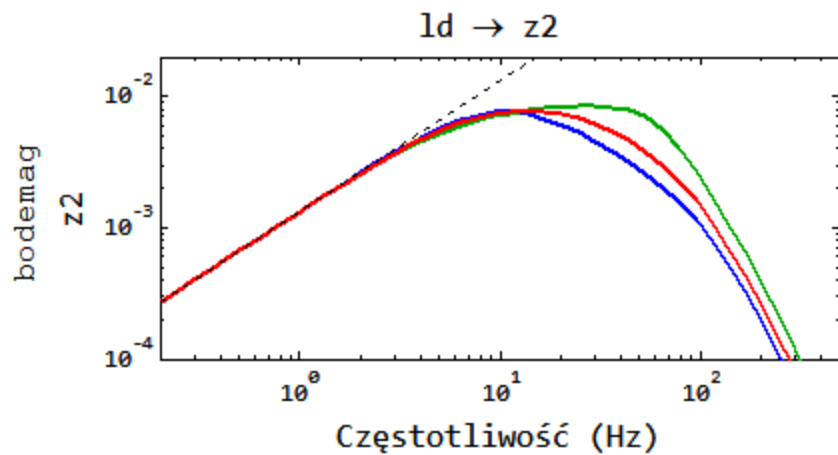
rlocus : dotyczy zmiany k2 (pętla otwarta w regulatorze);
nyquist: dotyczy pętli otwartej wewnątrz obiektu

Wpływ K2 na char. obciążeniowe i stabilność $k_2=0.05$



TDE = LES0 v0
h = 1ms
k3 = 1
k2 = 0.05
k1 = 0

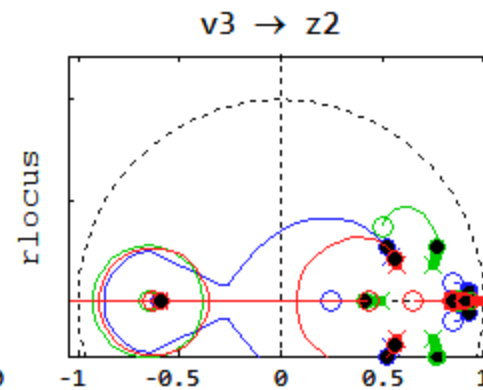
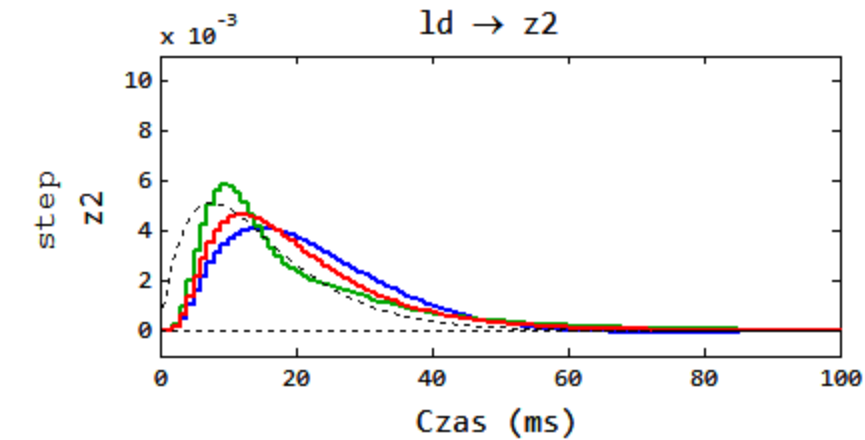
$\kappa = .75; 1.5; 1$
 $\tau = 0.25$
ph = -0.005



$\rightarrow$ z2
Pk < 0.00733
ST < 85.0
IA < 0.000213

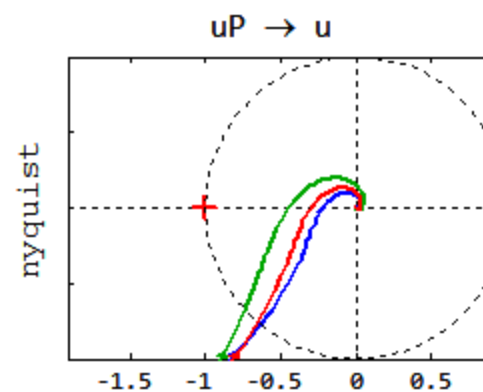
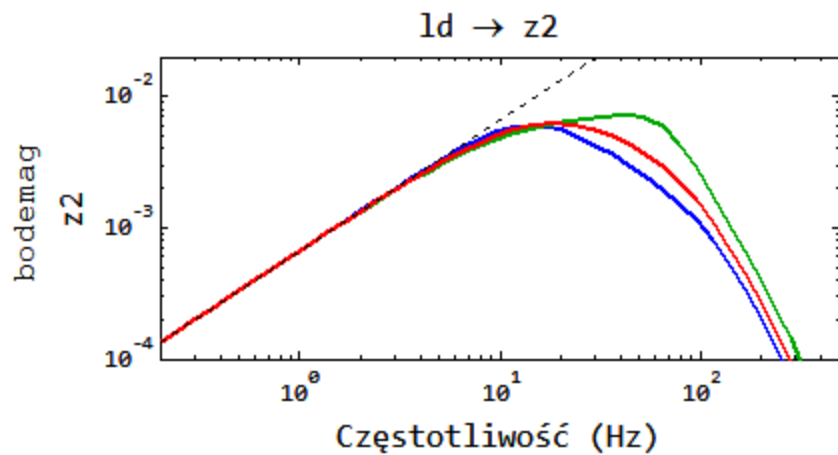
GM > 2.6
DM > 4.5
PM > 48.9

Wpływ K2 na char. obciążeniowe i stabilność $k_2=0.1$



TDE = LES0 v0
h = 1ms
k3 = 1
k2 = 0.1
k1 = 0

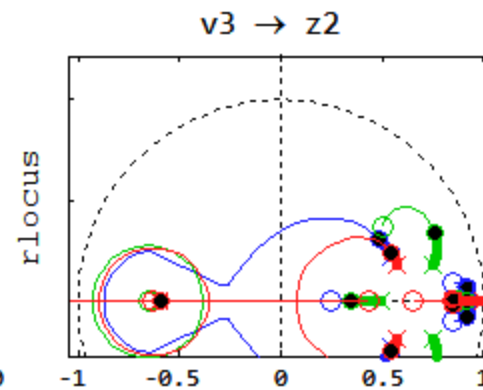
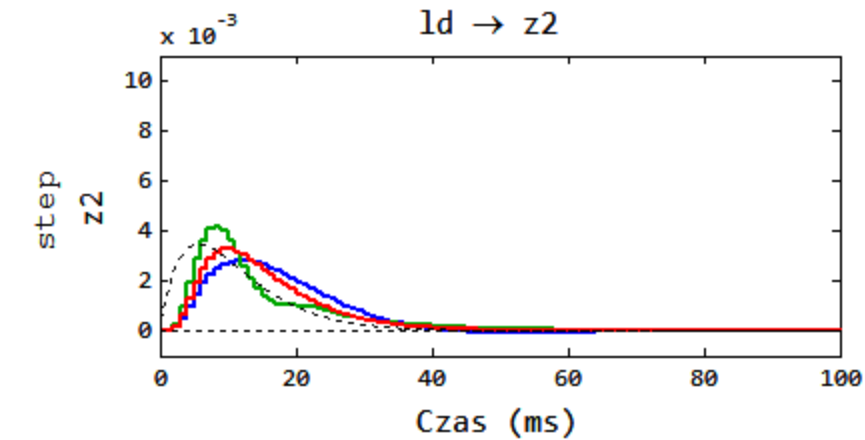
$\kappa = .75; 1.5; 1$
 $\tau = 0.25$
ph = -0.005



$\rightarrow$ z2
Pk < 0.00582
ST < 54.0
IA < 0.00011

GM > 2.2
DM > 3.3
PM > 42.2

Wpływ K2 na char. obciążeniowe i stabilność $k_2=0.2$



TDE = LES0 v0

$h = 1\text{ms}$

$k_3 = 1$

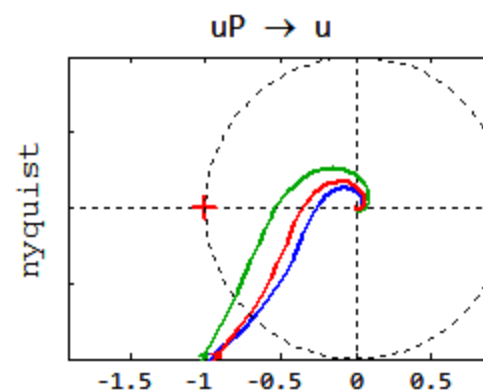
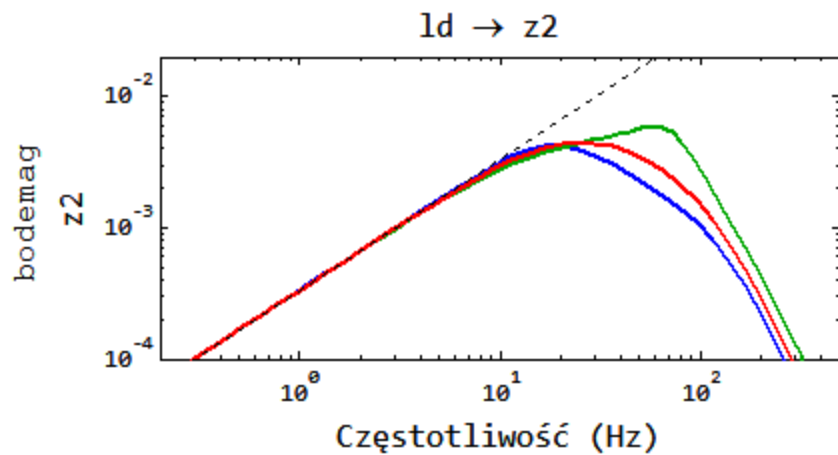
$k_2 = 0.2$

$k_1 = 0$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$\tau = 0.25$

$ph = -0.005$



$\rightarrow z2$

$P_k < 0.00419$

$ST < 39.0$

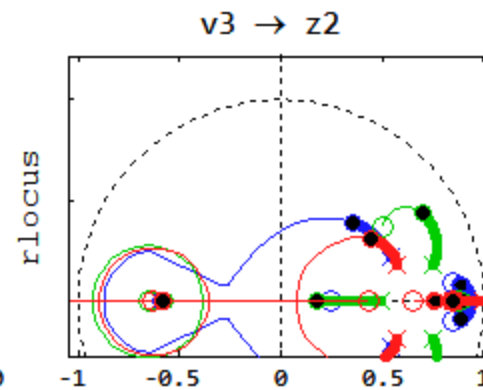
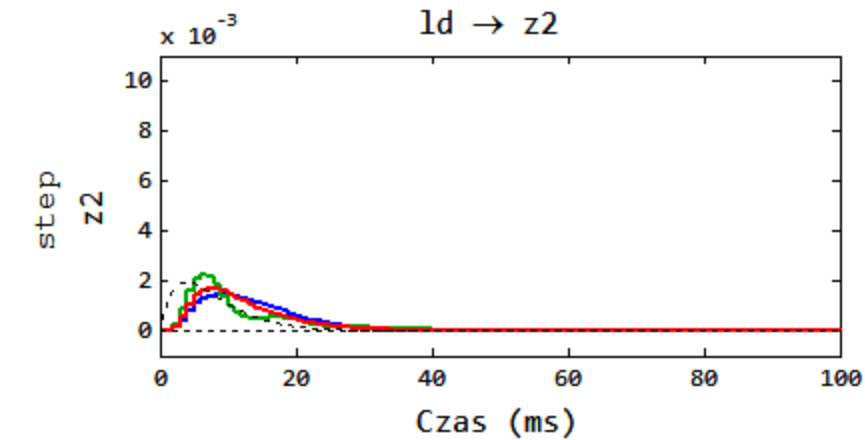
$IA < 5.65e-05$

$GM > 1.9$

$DM > 2.3$

$PM > 36.6$

Wpływ K2 na char. obciążeniowe i stabilność $k_2=0.5$



TDE = LES0 v_0

$h = 1\text{ms}$

$k_3 = 1$

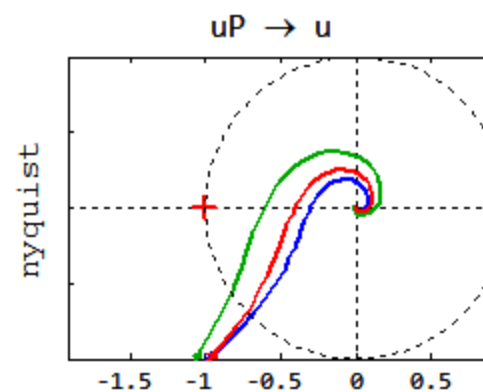
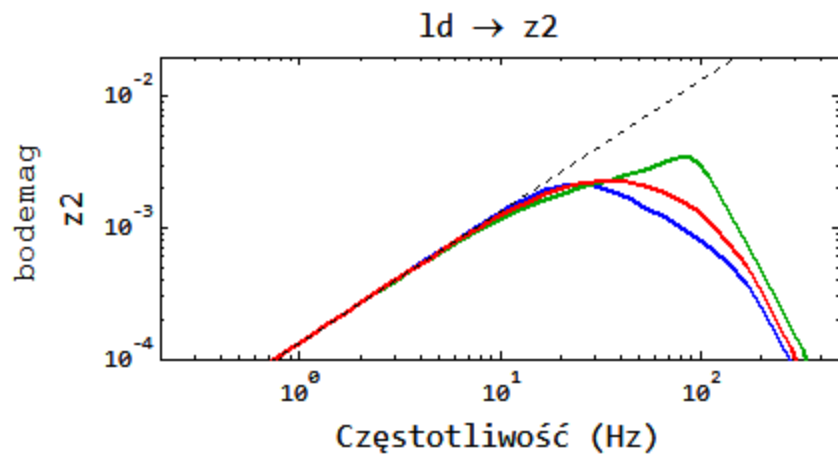
$k_2 = 0.5$

$k_1 = 0$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$\tau = 0.25$

$ph = -0.005$



$\rightarrow z_2$

$P_k < 0.00228$

$ST < 31.0$

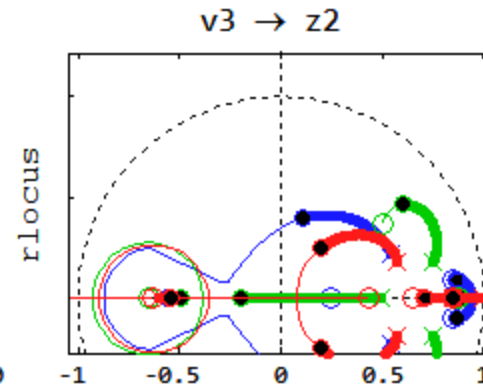
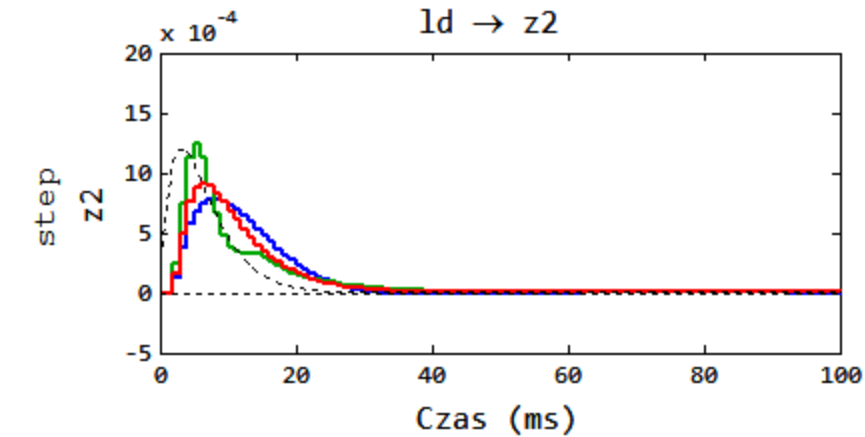
$IA < 2.24e-05$

$GM > 1.6$

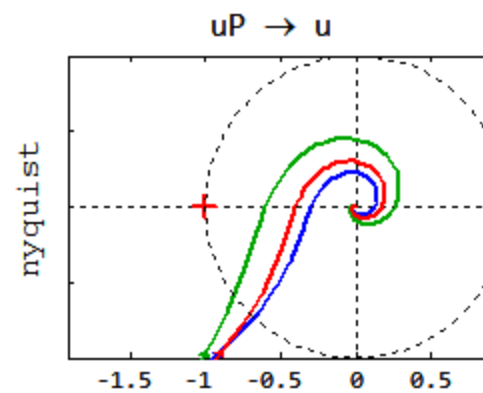
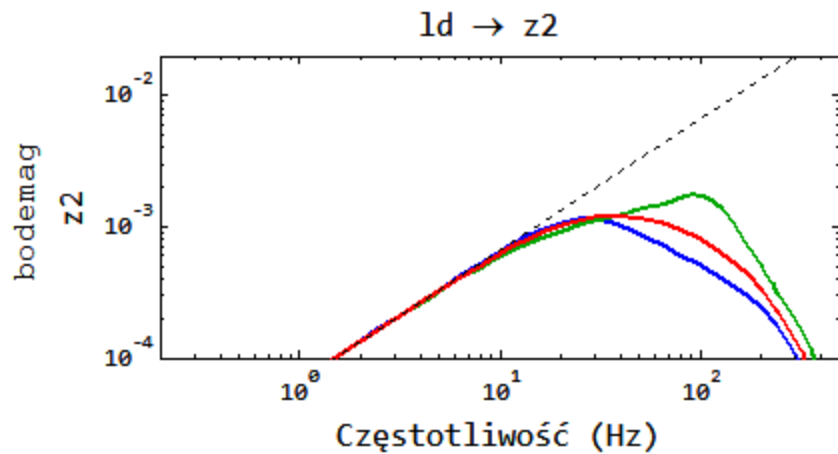
$DM > 1.6$

$PM > 33.8$

Wpływ K2 na char. obciążeniowe i stabilność $k_2=1$



TDE = LES0 v0
h = 1ms
k3 = 1
k2 = 1
k1 = 0

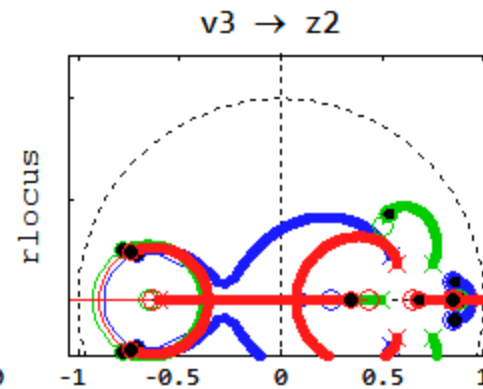
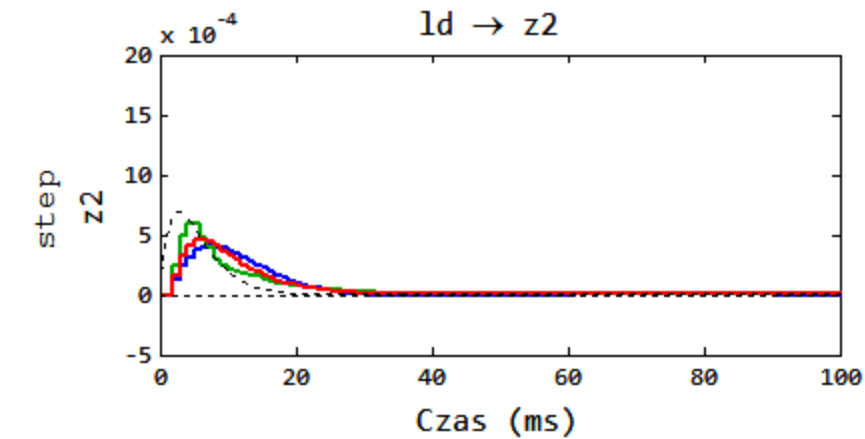


$\kappa = .75; 1.5; 1$
 $\tau = 0.25$
ph = -0.005

$\rightarrow$ z2
Pk < 0.00124
ST < 28.0
IA < 1.11e-05

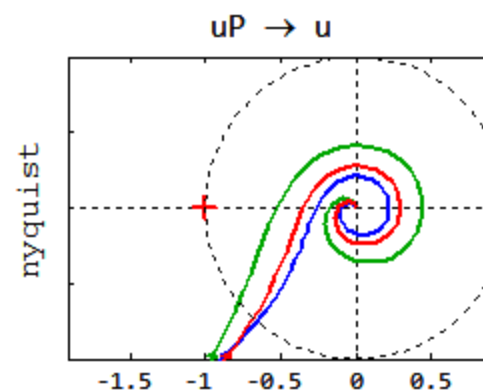
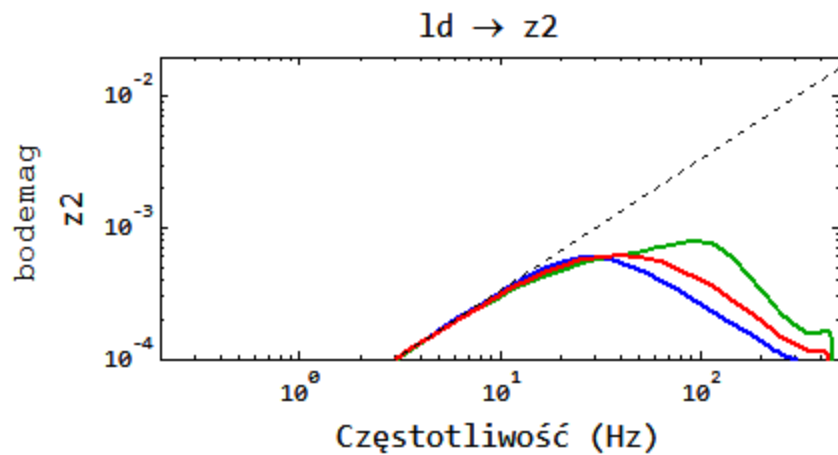
GM > 1.7
DM > 1.5
PM > 35.8

Wpływ K2 na char. obciążeniowe i stabilność $k_2=2$



TDE = LES0 v0
 $h = 1\text{ms}$
 $k_3 = 1$
 $k_2 = 2$
 $k_1 = 0$

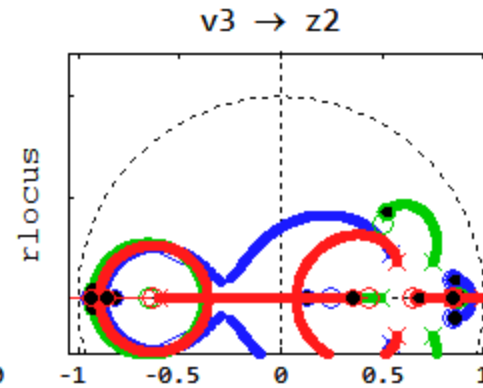
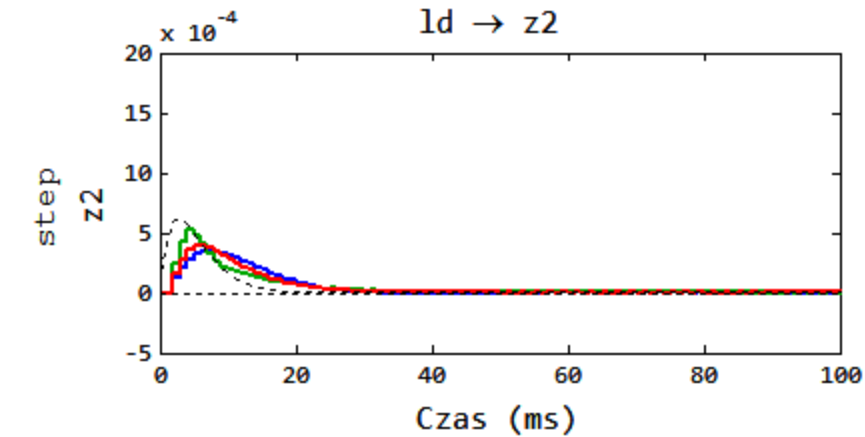
$\kappa = .75; 1.5; 1$
 $\tau = 0.25$
 $ph = -0.005$



$\rightarrow z2$
 $P_k < 0.000584$
 $ST < 28.0$
 $IA < 5.48e-06$

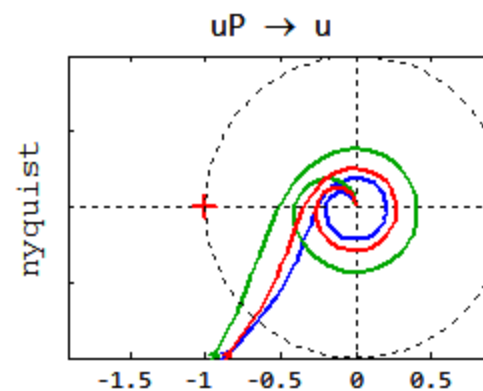
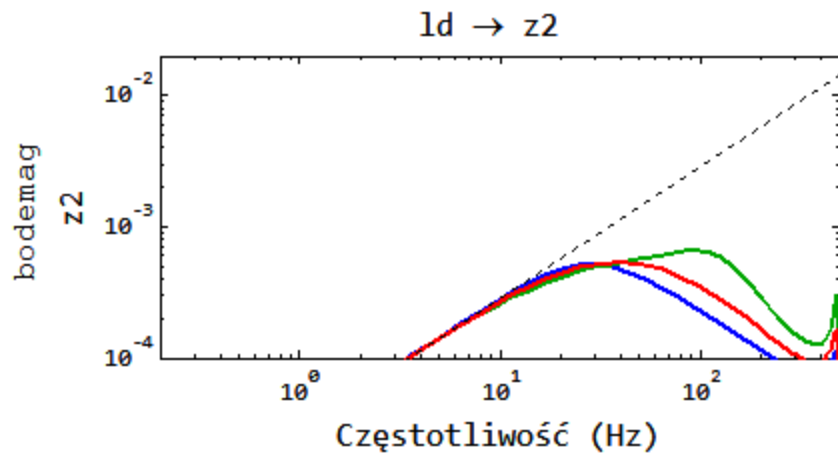
$GM > 1.9$
 $DM > 1.5$
 $PM > 39.0$

Wpływ K2 na char. obciążeniowe i stabilność $k_2=2.31$



TDE = LES0 v0
 $h = 1\text{ms}$
 $k_3 = 1$
 $k_2 = 2.31$
 $k_1 = 0$

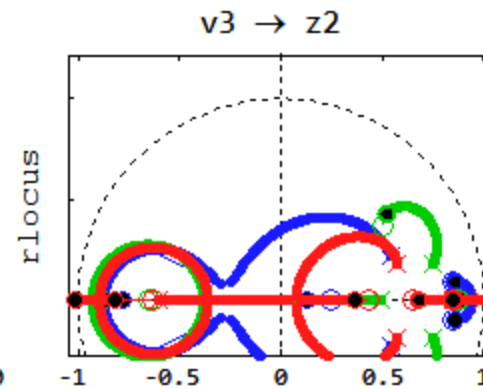
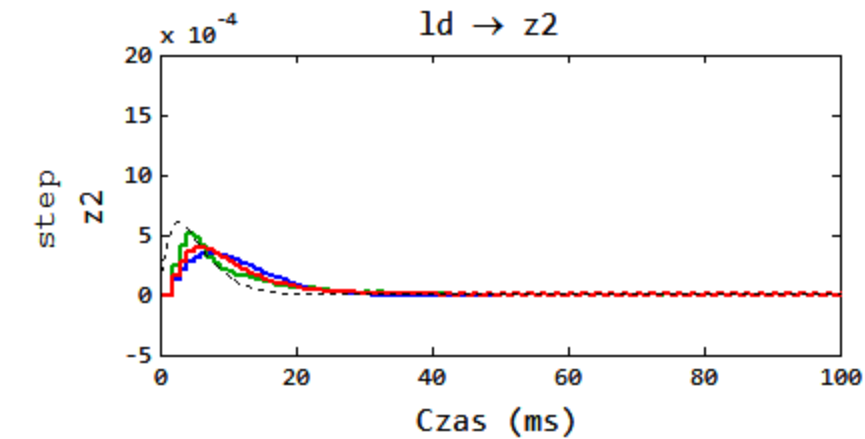
$\kappa = .75; 1.5; 1$
 $\tau = 0.25$
 $ph = -0.005$



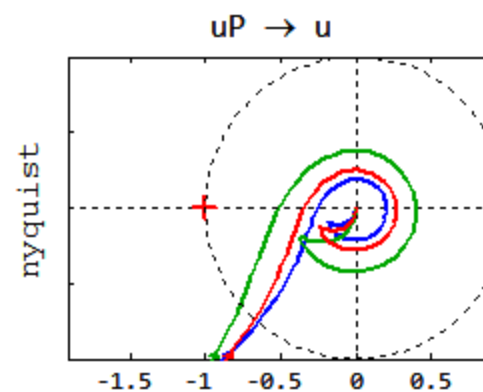
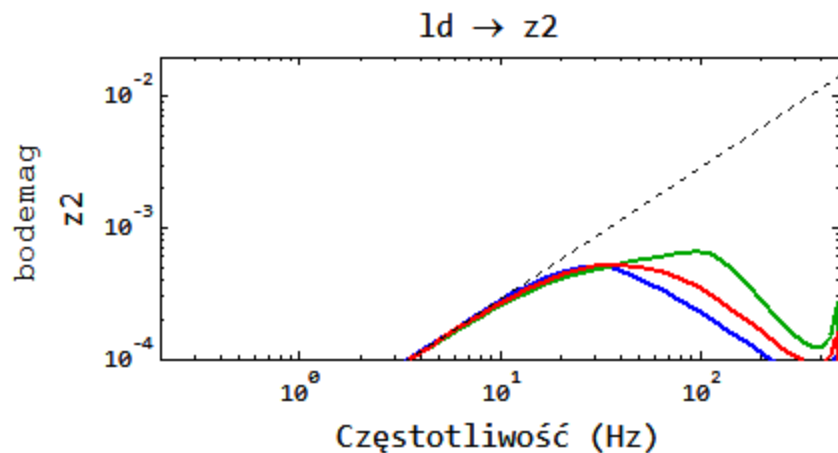
$\rightarrow z_2$
 $P_k < 0.00052$
 $ST < 28.0$
 $IA < 4.74e-06$

$GM > 1.9$
 $DM > 1.5$
 $PM > 39.6$

Wpływ K2 na char. obciążeniowe i stabilność $k_2=2.34$



TDE = LES0 v0
h = 1ms
k3 = 1
k2 = 2.34
k1 = 0



$\kappa = .75; 1.5; 1$
 $\tau = 0.25$
ph = -0.005

$\rightarrow$ z2
Pk < Inf
ST < 0.0
IA < 0

GM < 1.0
DM < 0.0
PM < 0.0

Przekroczona granica stabilności w pobliżu -1

Wpływ K_2 na char. obciążeniowe i stabilność

Wniosek:

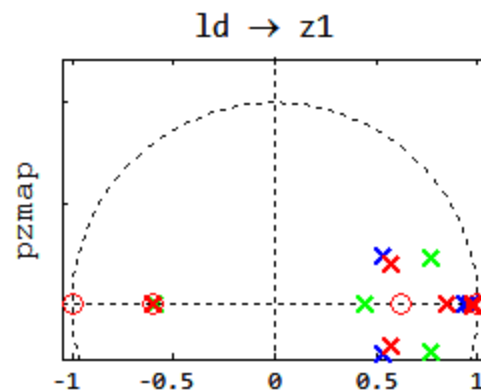
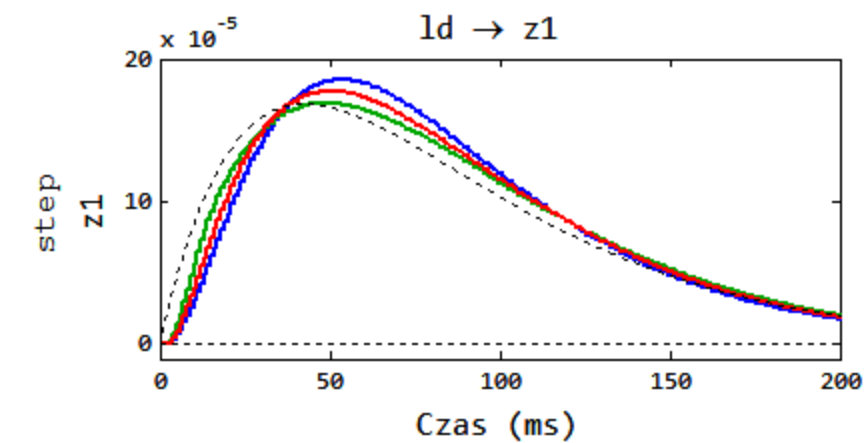
*Tajemnica tkwi w takim zaprojektowaniu estymatora,
że – dzięki odpowiednim położeniom zer – linie
pierwiastkowe nie wychodzą z okręgu jednostkowego*



Pusty slajd

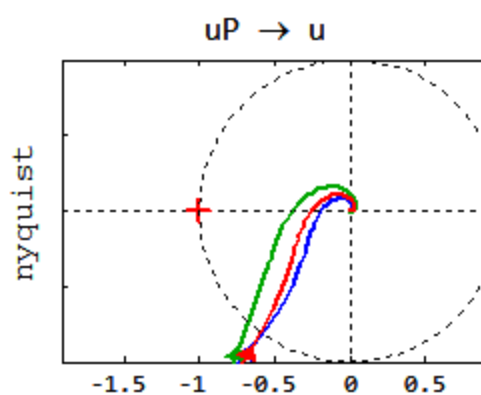
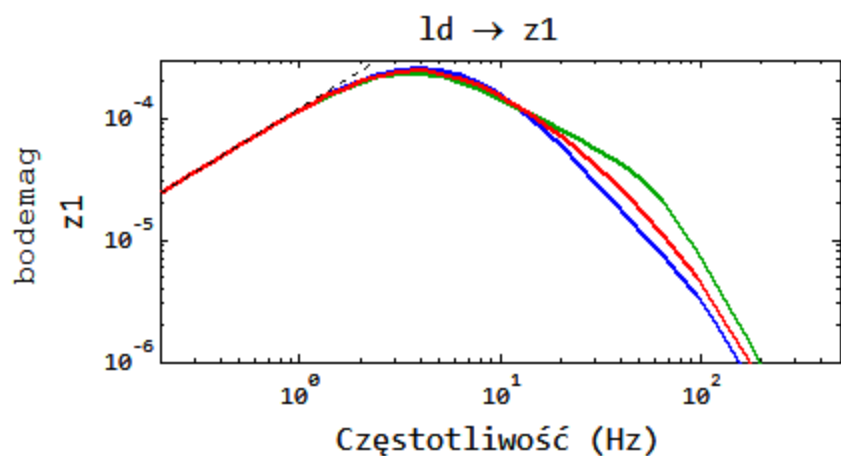


Char. obciążeniowe reg. położenia $1/K_2=20\text{ms}$ ($\zeta=1$)



TDE = LESO v0
 $h = 1\text{ms}$
 $k_3 = 1$
 $k_2 = 0.05$
 $k_1 = 0.000625$

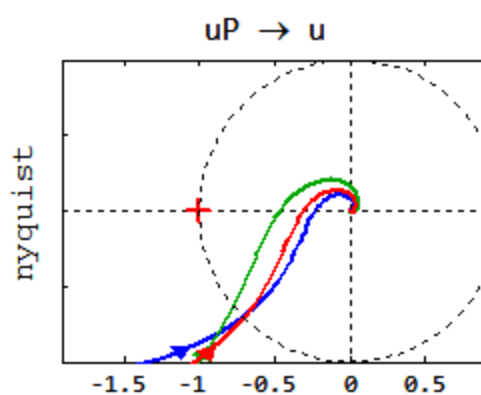
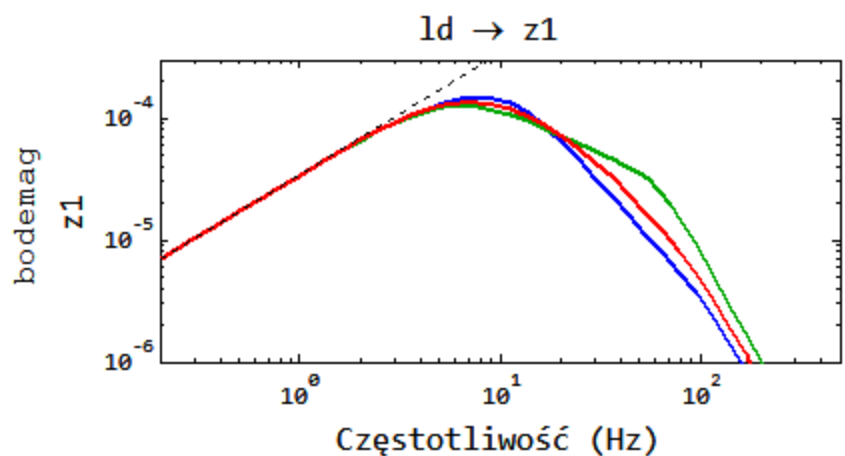
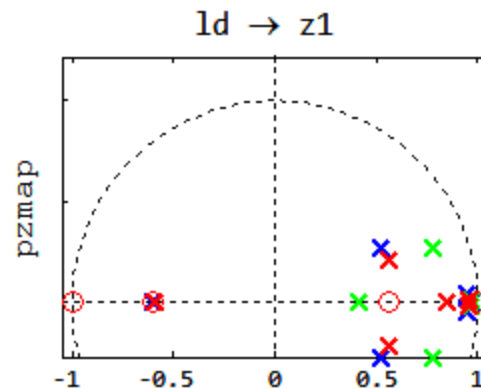
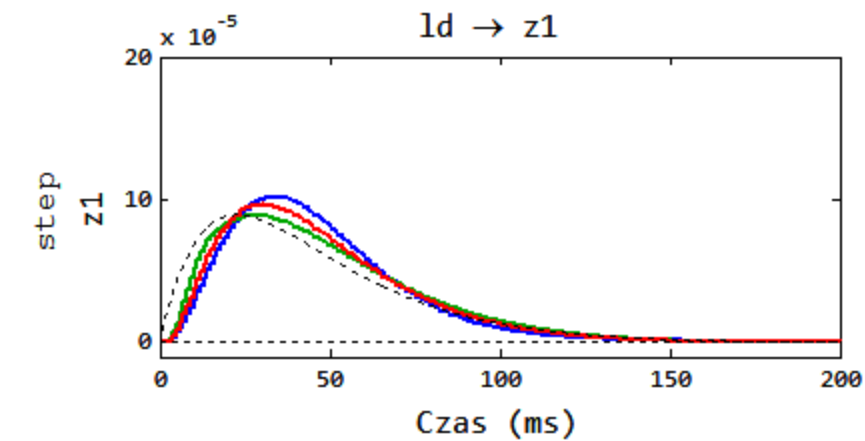
$\kappa = .75; 1.5; 1$
 $\tau = 0.25$
 $ph = -0.005$



$\rightarrow z1$
 $P_k < 0.000185$
 $ST < 240.0$
 $IA < 1.96e-05$

$GM > 2.6$
 $DM > 4.4$
 $PM > 47.8$

Regulacja położenia $1/K_2=10\text{ms}$ ($\zeta=1$)



TDE = LESO v0

h = 1ms

k3 = 1

k2 = 0.1

k1 = 0.0025

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$\tau = 0.25$

ph = -0.005

$\rightarrow$ z1

Pk < 0.000102

ST < 128.0

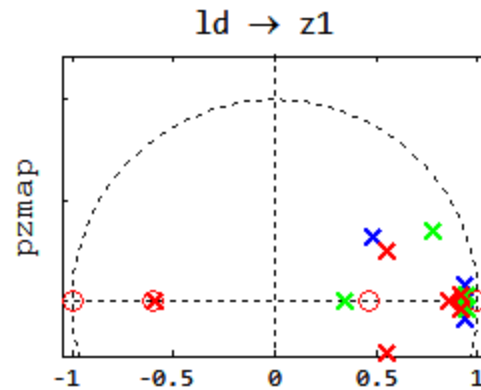
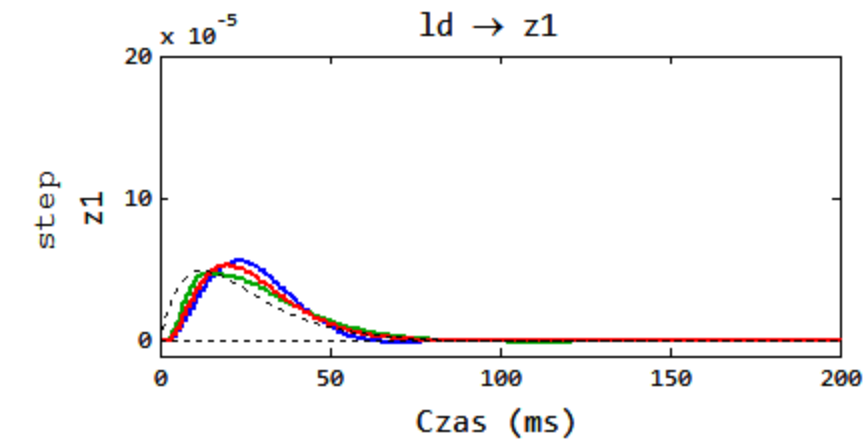
IA < 5.56e-06

GM > 2.1

DM > 3.0

PM > 39.3

Regulacja położenia $1/K_2=5\text{ms}$ ($\zeta=1$)



TDE = LESO v0

$h = 1\text{ms}$

$k_3 = 1$

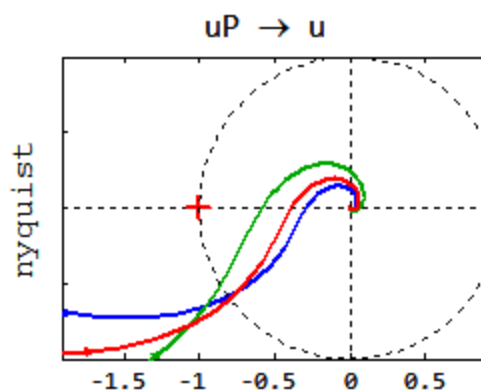
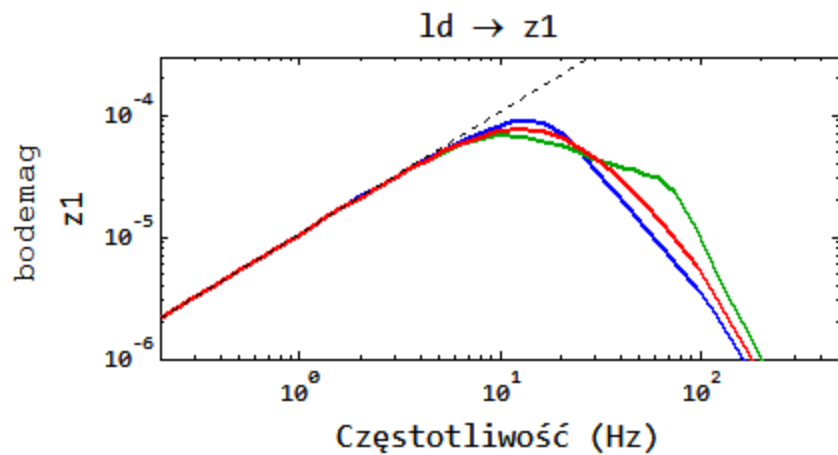
$k_2 = 0.2$

$k_1 = 0.01$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$\tau = 0.25$

$ph = -0.005$



$\rightarrow z1$

$P_k < 5.61\text{e-}05$

$ST < 73.0$

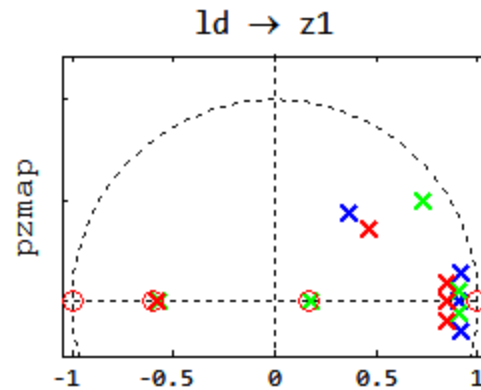
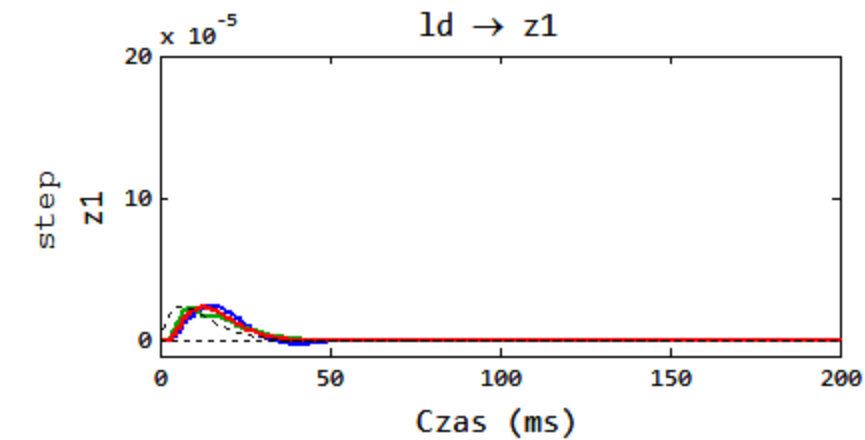
$IA < 1.72\text{e-}06$

$GM > 1.7$

$DM > 1.8$

$PM > 30.6$

Regulacja położenia $1/K_2=2\text{ms}$ ($\zeta=1$)



TDE = LESO v0

$h = 1\text{ms}$

$k_3 = 1$

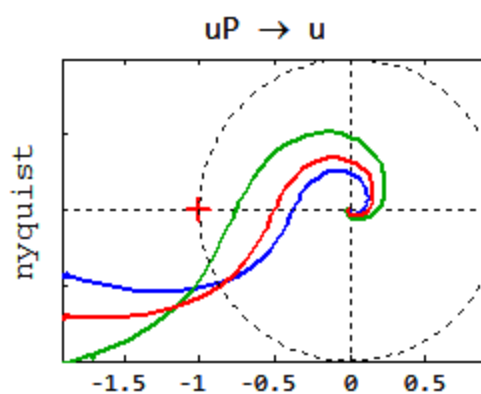
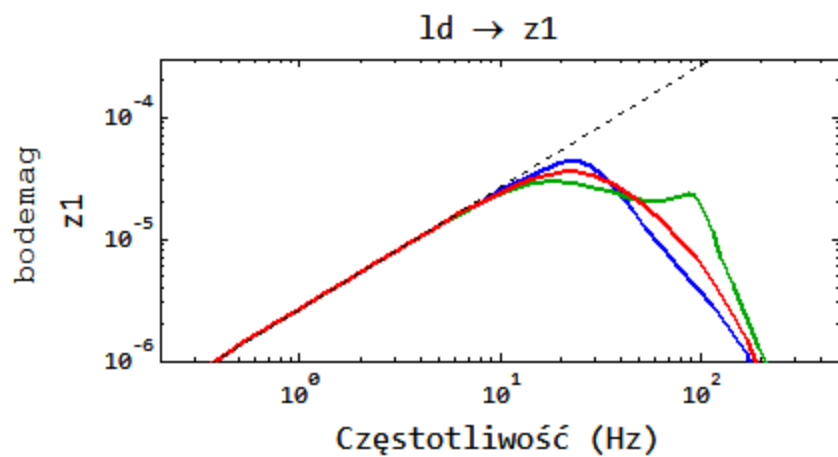
$k_2 = 0.5$

$k_1 = 0.0625$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$\tau = 0.25$

$\text{ph} = -0.005$



$\rightarrow z1$

$P_k < 2.5e-05$

$ST < 45.0$

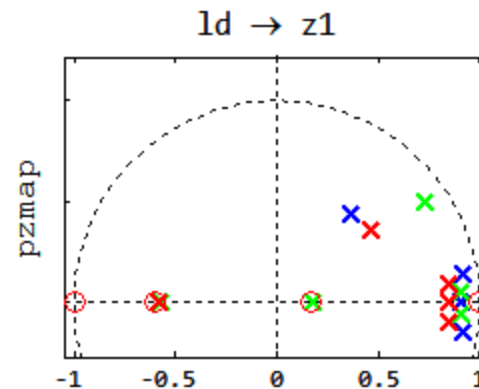
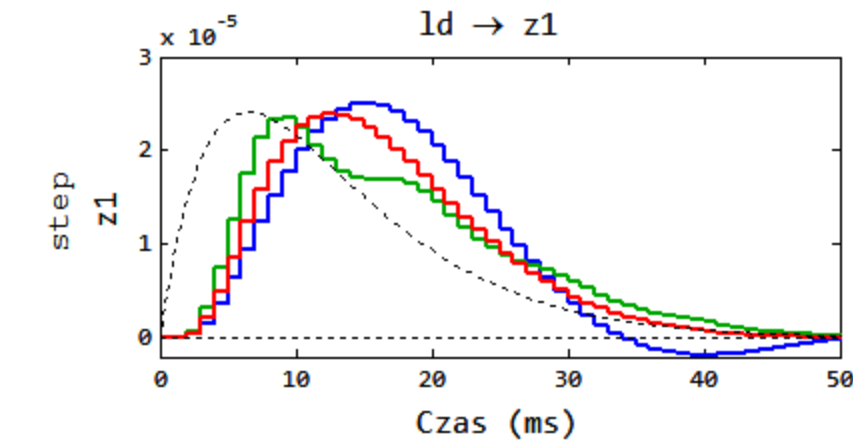
$IA < 4.66e-07$

$GM > 1.3$

$DM > 0.8$

$PM > 21.0$

Regulacja położenia $1/K_2=2\text{ms}$ ($\zeta=1$)



TDE = LESO v0

$h = 1\text{ms}$

$k_3 = 1$

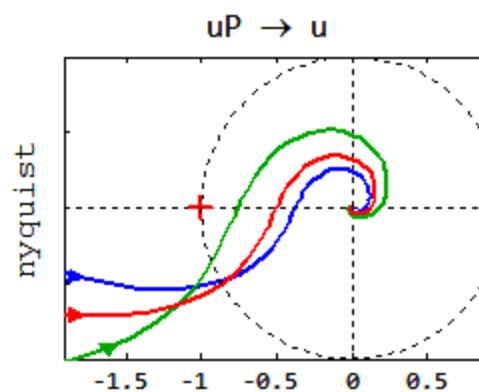
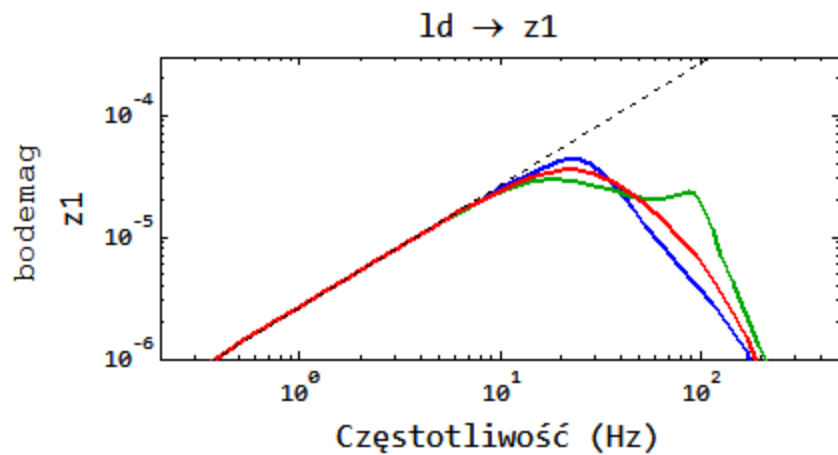
$k_2 = 0.5$

$k_1 = 0.0625$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$\tau = 0.25$

$\text{ph} = -0.005$



$\rightarrow z1$

$P_k < 2.5e-05$

$ST < 45.0$

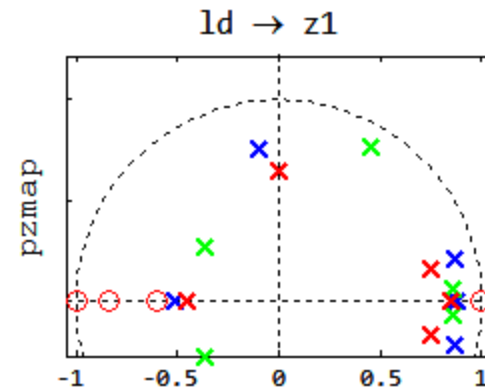
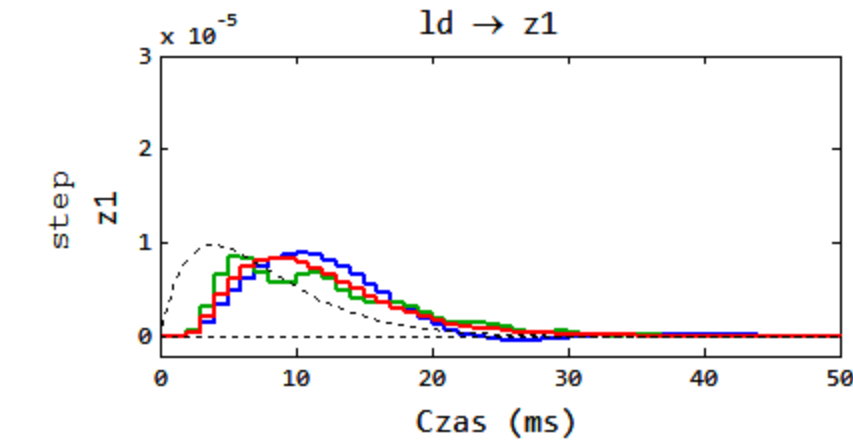
$IA < 4.66e-07$

$GM > 1.3$

$DM > 0.8$

$PM > 21.0$

Regulacja położenia $1/K_2=0.67\text{ms}$ ($\zeta=1$)



TDE = LESO v0

$h = 1\text{ms}$

$k_3 = 1$

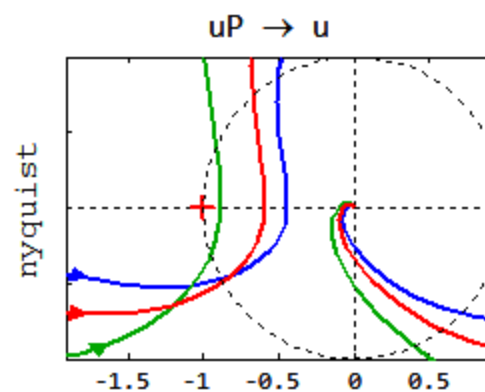
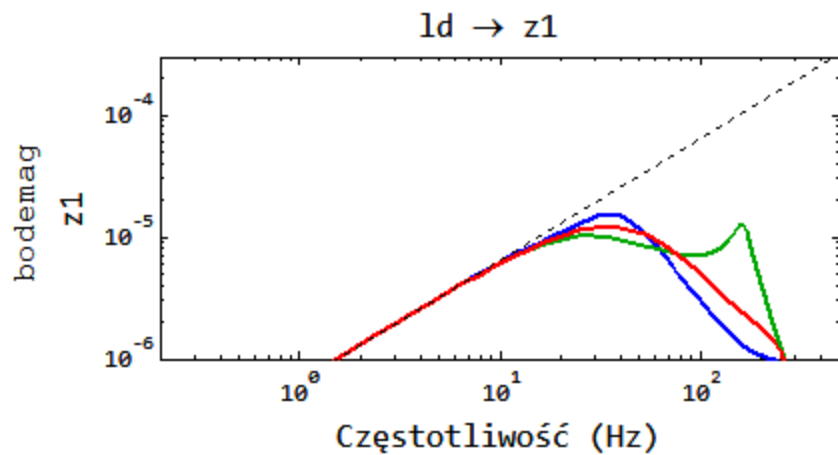
$k_2 = 1.5$

$k_1 = 0.563$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$\tau = 0.25$

$\text{ph} = -0.005$



$\rightarrow z1$

$P_k < 8.91\text{e-}06$

$ST < 31.0$

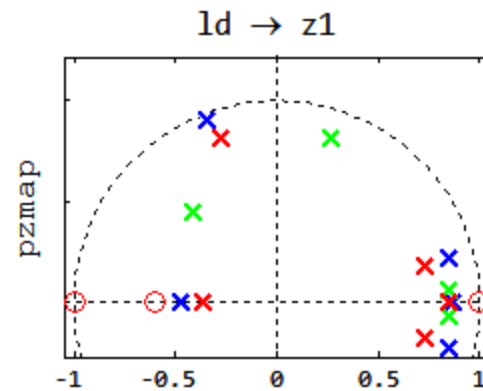
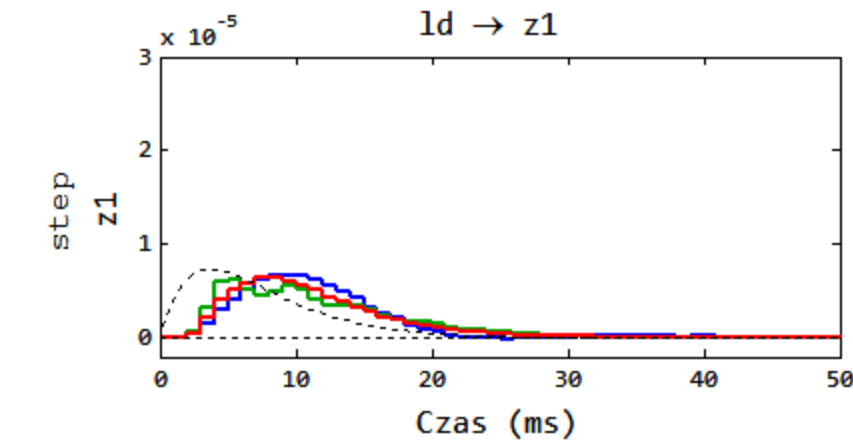
$IA < 1.08\text{e-}07$

$GM > 1.1$

$DM > 0.4$

$PM > 17.7$

Regulacja położenia $1/K_2=0.5\text{ms}$ ($\zeta=1$)



TDE = LESO v0

$h = 1\text{ms}$

$k_3 = 1$

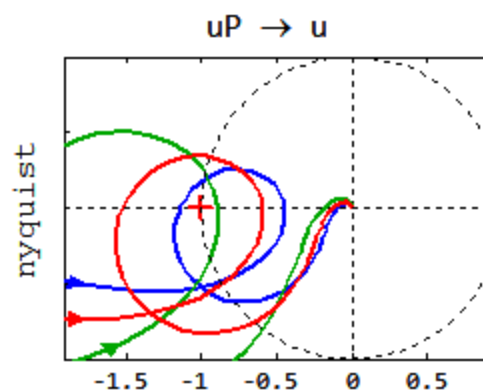
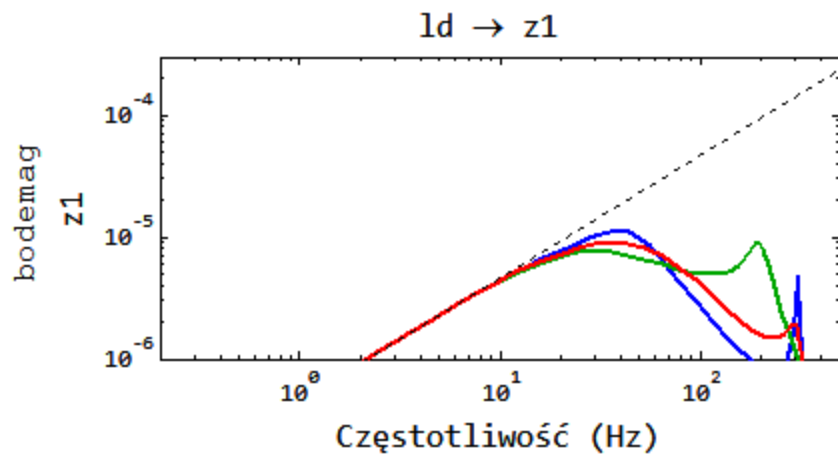
$k_2 = 2$

$k_1 = 1$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$\tau = 0.25$

$\text{ph} = -0.005$



$\rightarrow z1$

$P_k < 6.68\text{e-}06$

$ST < 28.0$

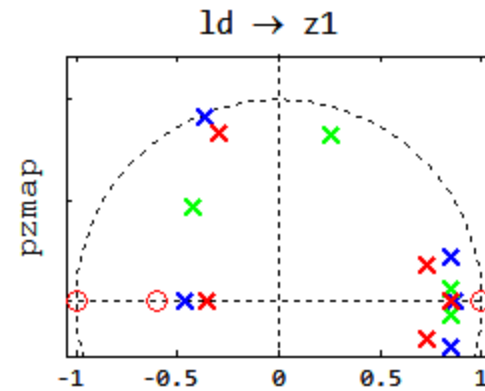
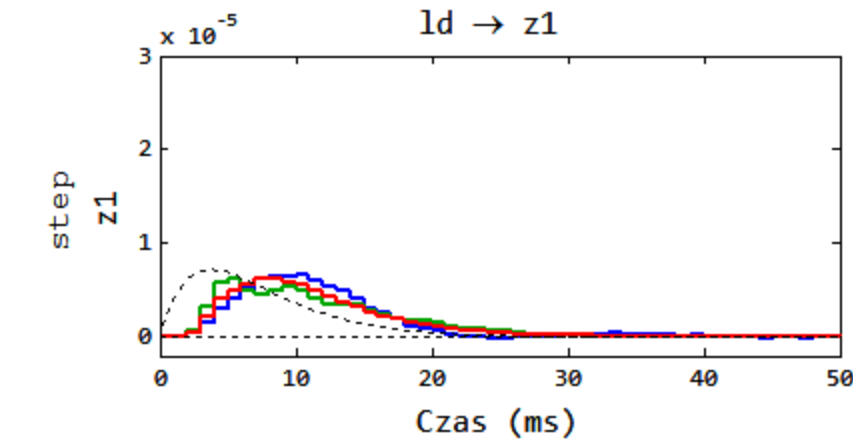
$IA < 7.61\text{e-}08$

$GM > 1.1 < 0.9$

$DM > 0.3$

$PM > 19.5$

Regulacja położenia $1/K_2=0.49\text{ms}$ ($\zeta=1$)



TDE = LESO v0

$h = 1\text{ms}$

$k_3 = 1$

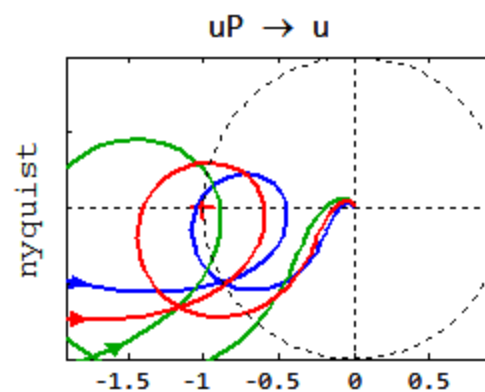
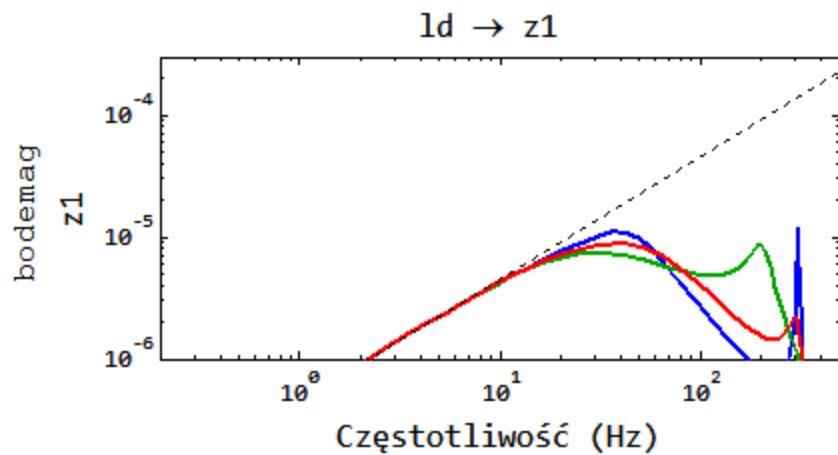
$k_2 = 2.04$

$k_1 = 1.04$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$\tau = 0.25$

$\text{ph} = -0.005$



$\rightarrow z1$

$P_k < 6.56\text{e-}06$

$ST < 34.0$

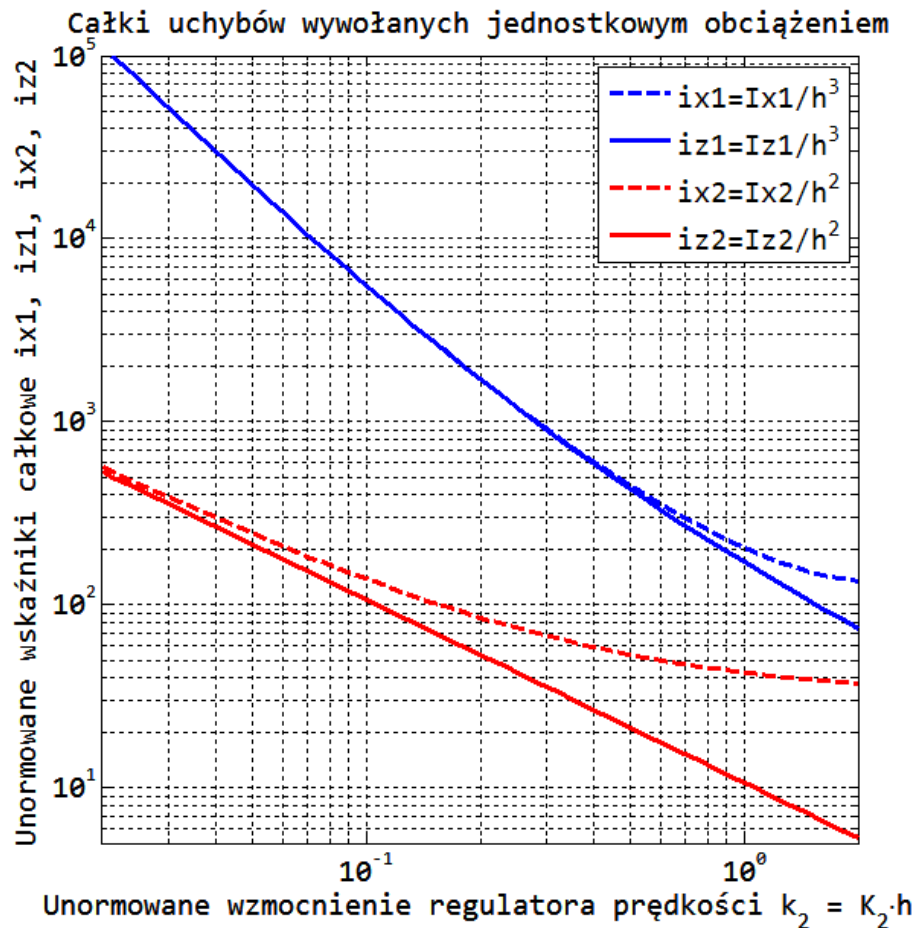
$IA < 7.93\text{e-}08$

$GM > 1.1 < 1.0$

$DM > 0.2$

$PM > 19.7$

Wskaźniki całkowite związane z obciążeniem Ld



$$I_{z1} = \frac{32h^3}{3k_1}(1 + 3k_2)$$

$$I_{z2} = \frac{32h^2}{3k_2}; (k_1 = 0)$$

$$I_{x1} \approx I_{z1}(1 + 0.8k_1)$$

$$I_{x2} \approx I_{z2}(1 + 3k_2)$$

Całka z uchybu $\Delta y(t)$ wywołanego zmianą obciążenia o ΔLd :

$$\int_0^{\infty} \Delta y(t) dt = \Delta Ld \cdot I_y; \quad y = z_1, z_2, x_1, x_2$$

$$\Delta y(t) \approx \Delta Ld \cdot D_y t e^{-\left(\sqrt{\frac{D_y}{I_y}}\right)t}, \quad D_y = \dots$$

$$Pk_{\Delta y} \approx \dots, \quad ST_{\Delta y} \approx \dots$$

Amplituda Y_m uchybu wywołanego obciążeniem o amplitudzie Ld_m :

$$Y_m = Ld_m \cdot I_y \cdot 2\pi f, \quad f < \dots$$



Pusty slajd

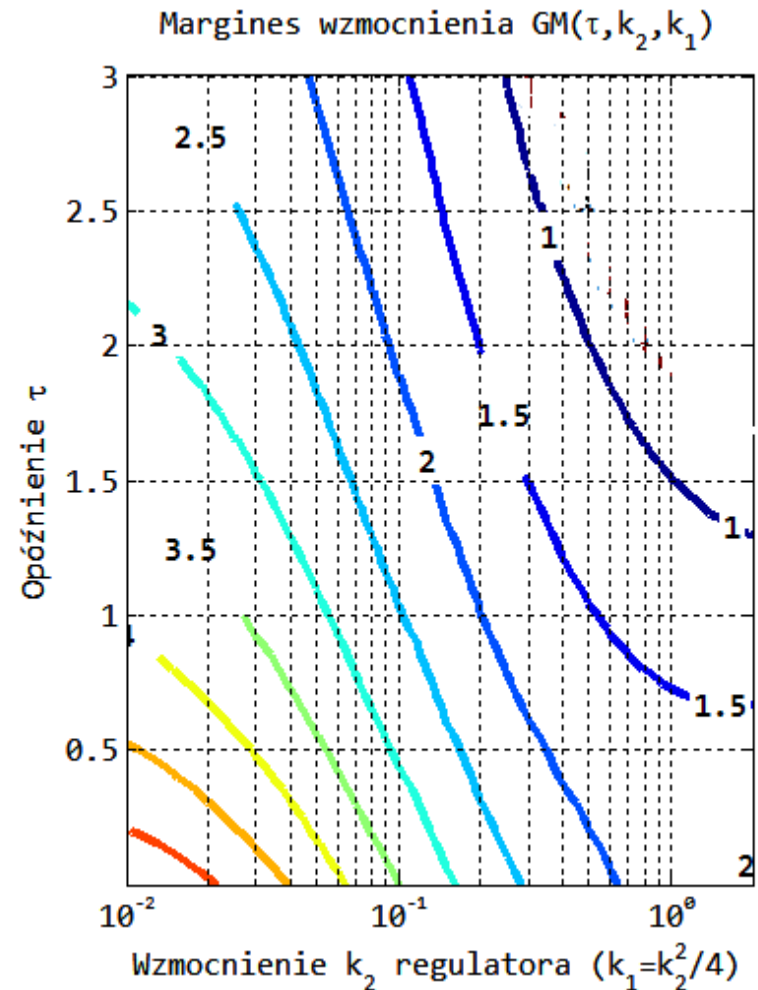
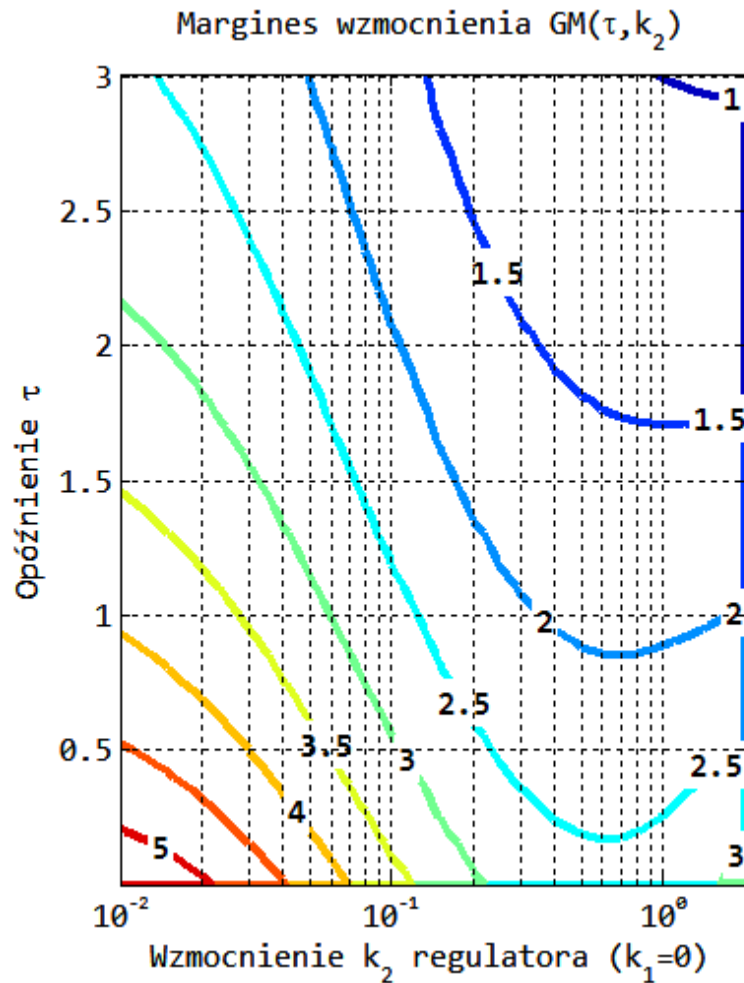


Szkic metody projektowania i oceny jakości

1. Wybór ograniczeń dla generatora przebiegów wzorcowych
2. Oszacowanie zakresu zmian parametrów , wyliczenie τ , κ
3. Przyjęcie minimalnych wartości marginesów GM , DM
4. Odczytanie z wykresów konturowych maksymalnej dopuszczalnej wartości wzmocnienia względnego k_2
5. Sprawdzenie poziomu szumów w sygnale sterującym, ewentualna korekcja k_2
6. Oszacowanie wartości wskaźników jakości regulacji
7. Ewentualna symulacja układu z dokładniejszym modelem obiektu

Szkic metody projektowania i oceny jakości

Wykresy konturowe marginesów wzmocnienia



Szkic metody projektowania i oceny jakości

Sprawdzenie poziomu szumów w sygnale sterującym

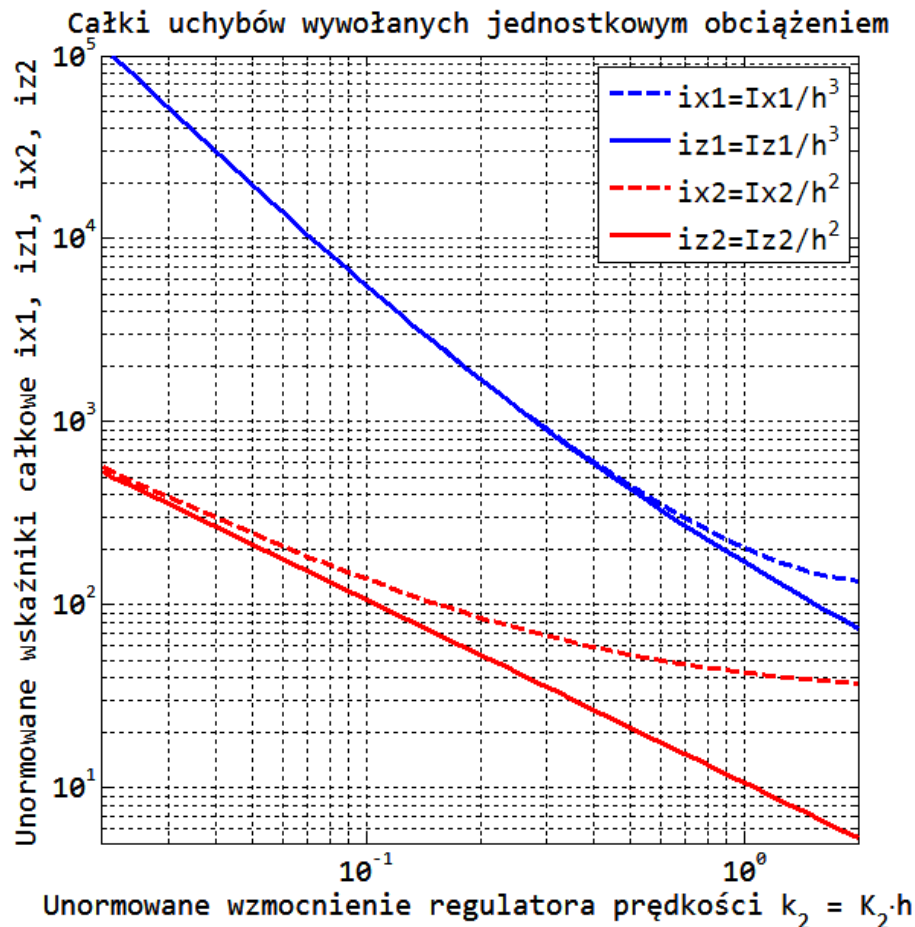
$$u_{Pk} \approx 2 \cdot n_{\max} \cdot h^{-2} \cdot \left(\frac{1}{32} + \frac{1}{3k_2} + \frac{1}{k_1} \right)$$

Jeśli poziom za duży, to :

- a) zmiana k_2 , k_1 na niższe*
- b) zwiększenie h*
- c) sprzętowe wspomaganie różniczkowania (M/T)*
- d) lepszy przetwornik (więcej impulsów/obrót)*
- e) lepszy rejector*

Szkic metody projektowania i oceny jakości

Wskaźniki całkowite związane z obciążeniem Ld



$$I_{z1} = \frac{32h^3}{3k_1}(1 + 3k_2)$$

$$I_{z2} = \frac{32h^2}{3k_2}; (k_1 = 0)$$

$$I_{x1} \approx I_{z1}(1 + 0.8k_1)$$

$$I_{x2} \approx I_{z2}(1 + 3k_2)$$

Całka z uchybu $\Delta y(t)$ wywołanego zmianą obciążenia o ΔLd :

$$\int_0^{\infty} \Delta y(t) dt = \Delta Ld \cdot I_y; \quad y = z_1, z_2, x_1, x_2$$

$$\Delta y(t) \approx \Delta Ld \cdot D_y t e^{-\left(\sqrt{\frac{D_y}{I_y}}\right)t}, \quad D_y = \dots$$

$$Pk_{\Delta y} \approx \dots, \quad ST_{\Delta y} \approx \dots$$

Amplituda Y_m uchybu wywołanego obciążeniem o amplitudzie Ld_m :

$$Y_m = Ld_m \cdot I_y \cdot 2\pi f, \quad f < \dots$$

Szkic metody projektowania i oceny jakości

Do rozważenia:

- *h jako parametr projektowy*
- *wybór J_{proj} gdy znane J_{min} , J_{max}*

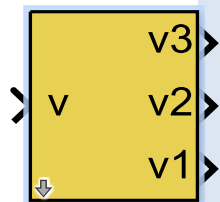


Pusty slajd



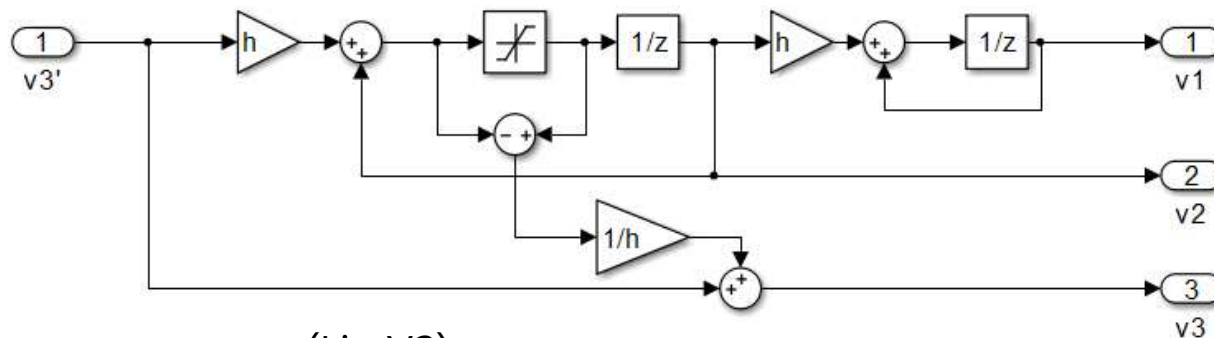
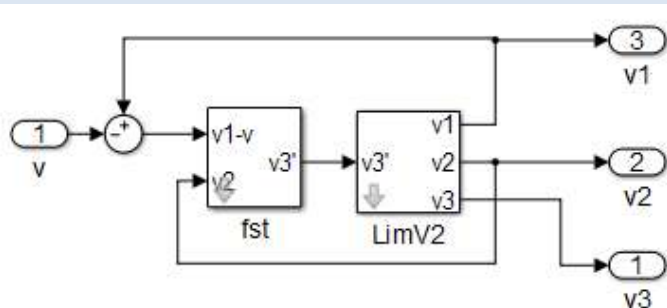
Generator sygnałów wzorcowych RG_ideal

Generuje przebiegi czasooptymalne z ograniczeniem prędkości v_2 i przyspieszenia v_3



RG_ideal

```
function v3 = fst( v1,v2,M,h )
% nieliniowa funkcja dla Tracking Differentiation
% wg. Gao i in.: An alternative paradigm..., 2001
% v - wejście filtru (położenie)
% v1 - wyjście filtru (filtrowane położenie),
% v2 - pochodna wyjścia (filtrowana prędkość)
% v3 - estym.druga pochodna {v2(t+h)=v2(t)+h.v3(t)}
% e = v1-v (uchyb śledzenia)
% M - max.przyspieszenie , czyli d2v/dt2
% h - krok obliczeń
d=M*h ; d0=d*h ; y=v1+h*v2;
a0 = sqrt(d^2+8*M*abs(y));
if abs(y)<d0 ; a = v2+y/h;
else
    a = v2+sign(y)*(a0-d)/2;end
if abs(a)<=d ; v3 = -M*a/d;
else
    v3=-M*sign(a); end
end % fst()
```



(LimV2)



Generator sygnałów wzorcowych RG_ideal

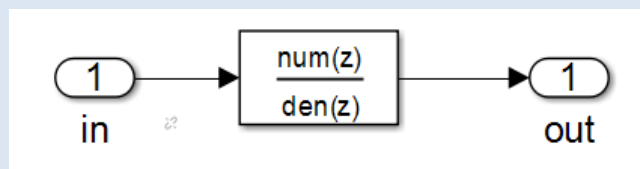
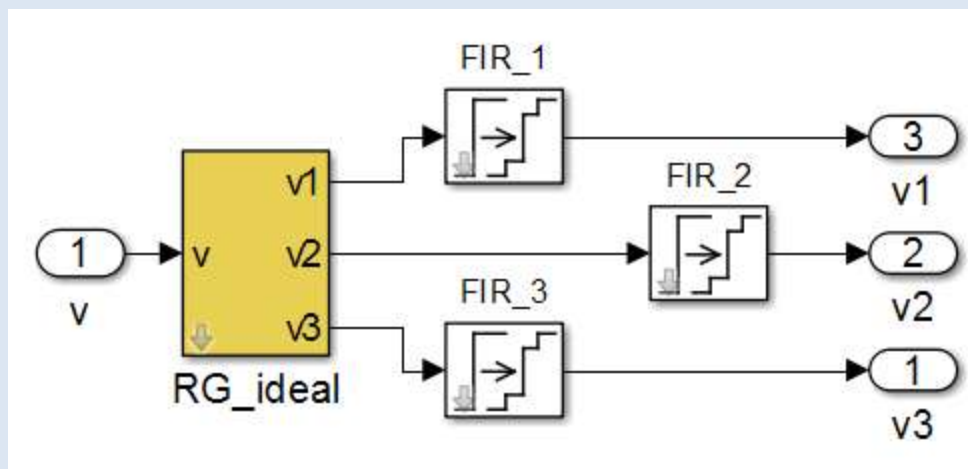
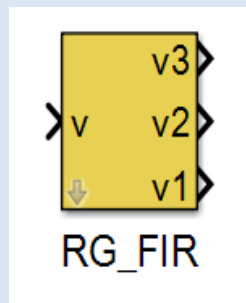
Sygnały wzorcowe generowane przez RG_ideal



Generator sygnałów wzorcowych RG_FIR

Ogranicza pochodną przyspieszenia (zryw) kosztem wydłużenia procesów przejściowych o zadawany czas $2T$.

Przyspieszenie może narastać/opadać w czasie $2T$ liniowo ($SK=0$) lub wg funkcji kwadratowej ($SK=1$)

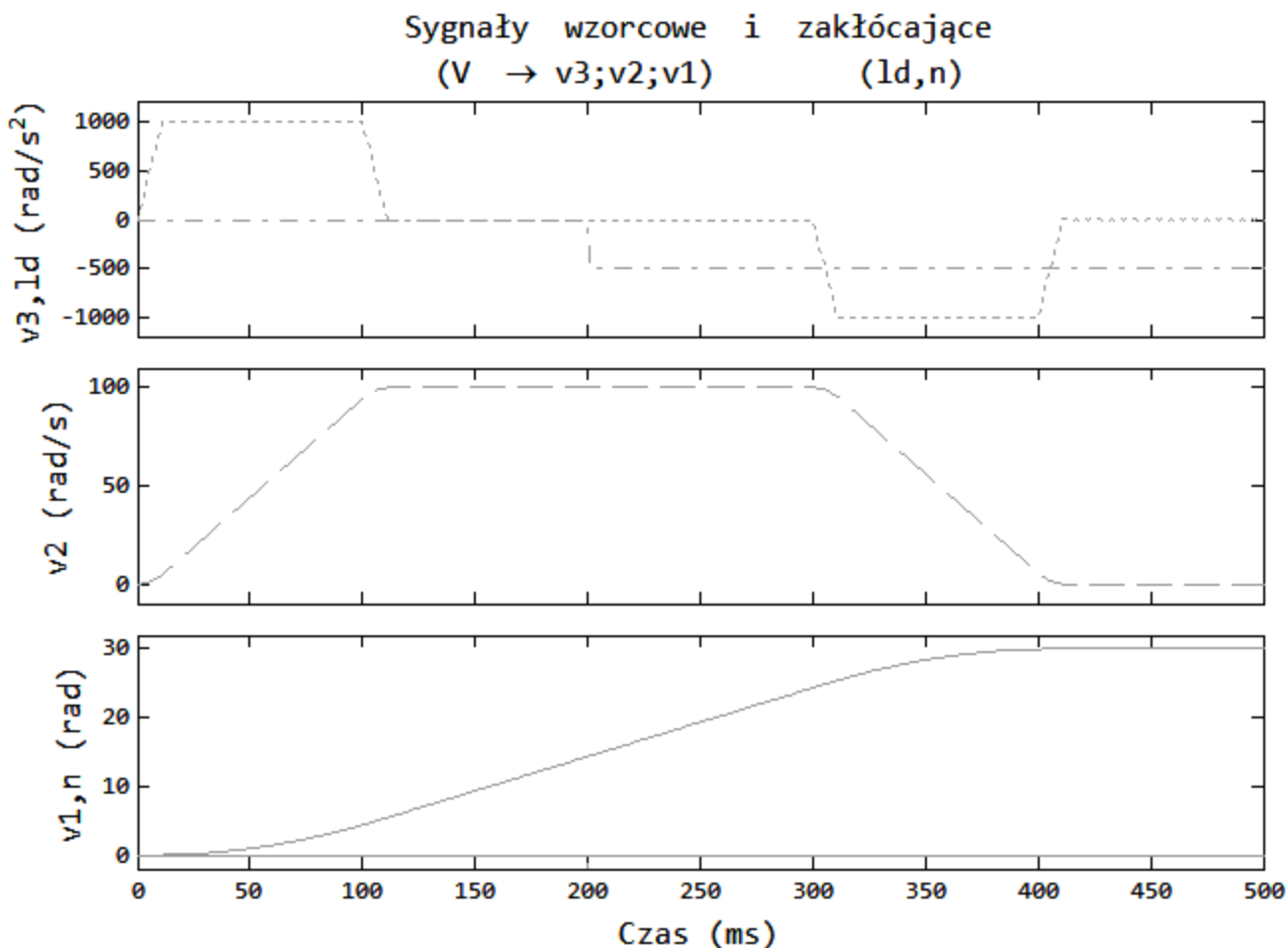


```
num = 1-abs(max(-1,min(1,([0:ceil(2*T/h)]*h-T)./(h+h*round(T/(eps+SK*h))))))
den = sum(1-abs(max(-1,min(1,([0:ceil(2*T/h)]*h-T)./(h+h*round(T/(eps+SK*h))))))
```



Generator sygnałów wzorcowych RG_FIR

Sygnały wzorcowe generowane przez RG_FIR



RG = RG-FIR

$h = 1\text{ms}$

$V_1 = 30\text{rad}$

$V_{2\text{max}} = 100\text{rad/s}$

$V_{3\text{max}} = 1000\text{rad/s}^2$

$\tau_{v3} = 10\text{h}$

$\rightarrow v3$

$Pk = 1e+03$

$ST = 410.4$

$IA = 2e+05$

$\rightarrow v2$

$Pk = 100$

$ST = 401.0$

$IA = 3e+04$

$\rightarrow v1$

$Pk = 30$

$ST = 351.8$

$IA = 8.8e+03$



Liniowy rozszerzony obserwator stanu (LESO)

Wzory ([Han'2009](#)) , blok Simulinka, jego maska i schemat wewnętrzny

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ fe = fal(e, 0.5, \delta), & fe_1 = fal(e, 0.25, \delta) \\ z_1 = z_1 + h z_2 - \beta_{01} e \\ z_2 = z_2 + h(z_3 + bu) - \beta_{02} fe \\ z_3 = z_3 - \beta_{03} fe_1. \end{cases}$$

the observer gains can be made linear for the sake of simplicity in implementation, replacing both fe and fe_1 with e . In this case, the corresponding gains are

$$\beta_{01} = 1 \quad \beta_{02} = \frac{1}{3h} \quad \beta_{03} = \frac{2}{8^2 h^2}.$$

Function Block Parameters: LESO

Linear Extended State Observer (mask)

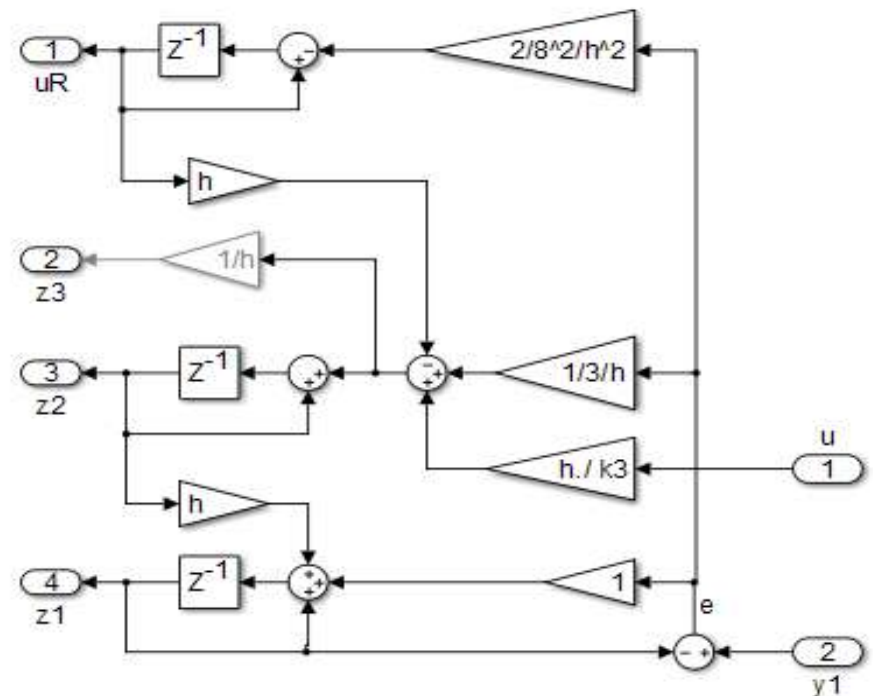
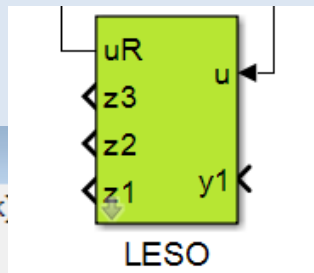
Wg Han'2009, z drobnymi zmianami

u - wejście sterujące obiektem I2
y1 - sygnał wyjściowy obiektu (x1+szumy pomiarowe)
z1 - filtrowane wyjście y1 (stan x1)
z2 - estymowany stan x2
z3 - pochodna z2 (inaczej niż u Han'a!)
uR - sygnał kompensujący "total disturbance" (uR = -z3 Hana)

Parameters

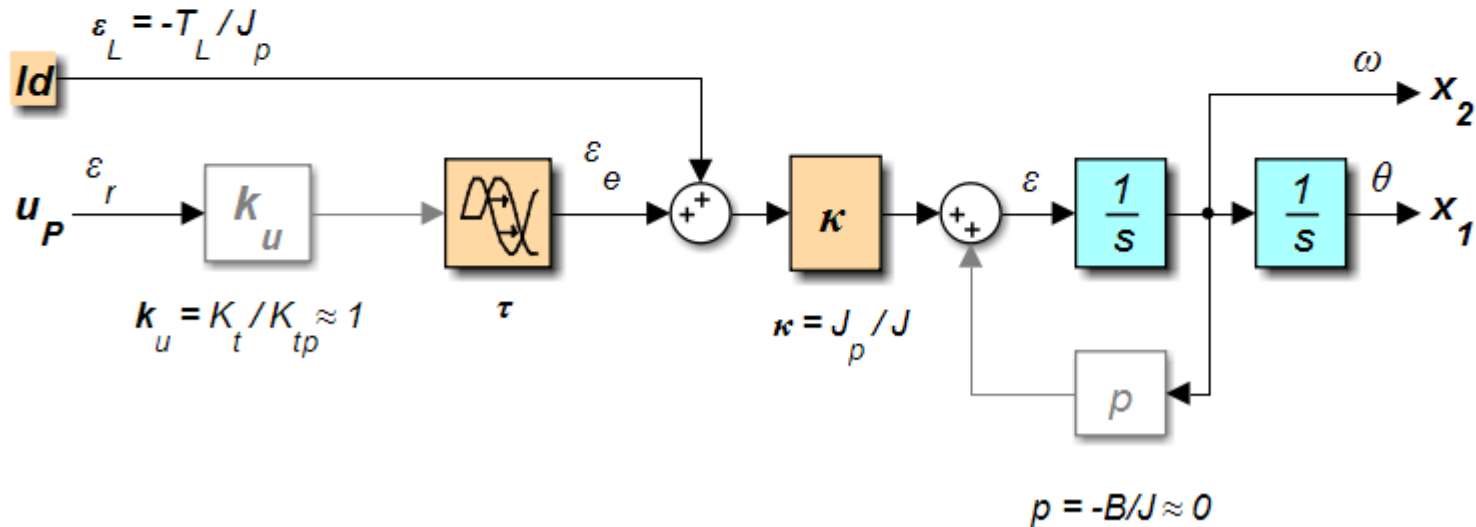
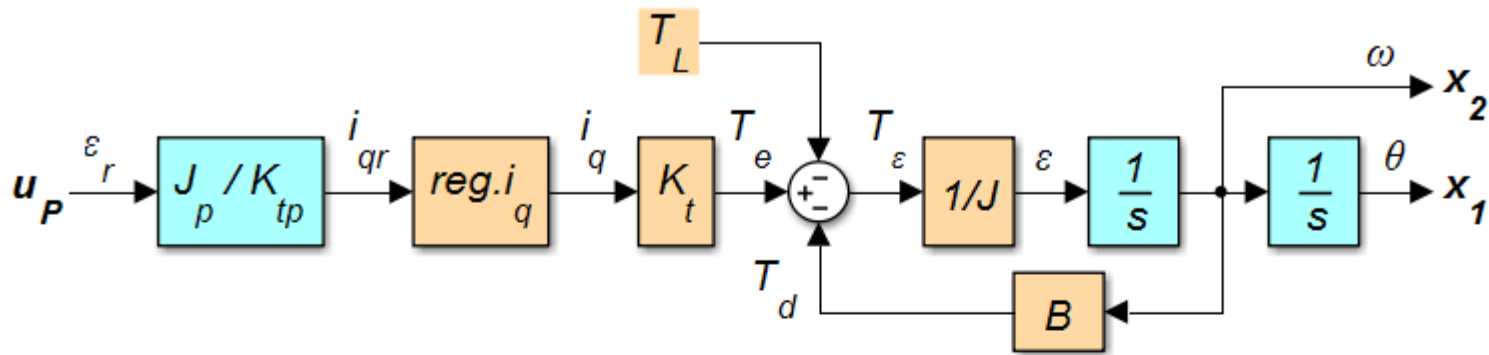
krok h

h

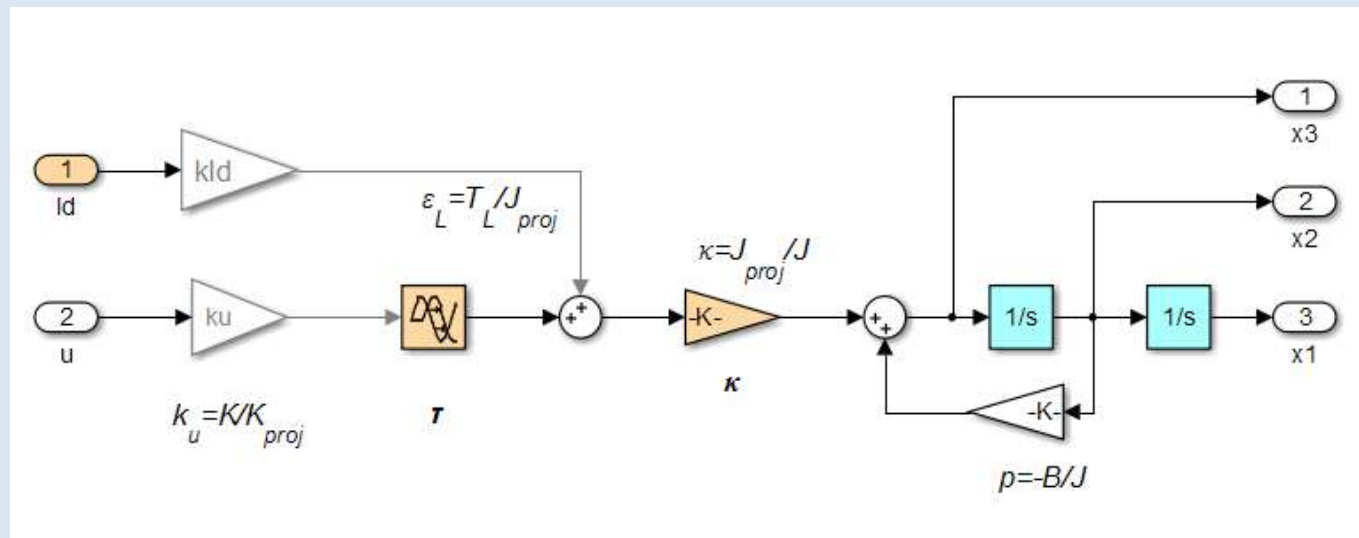
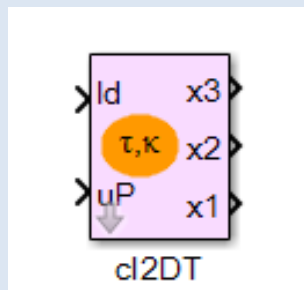
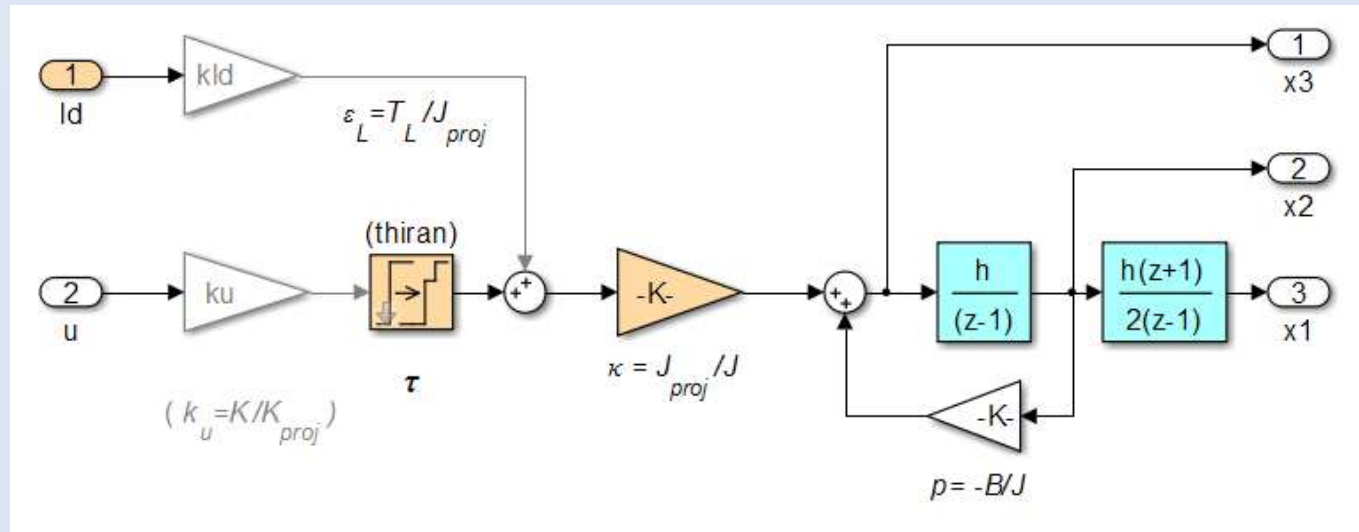
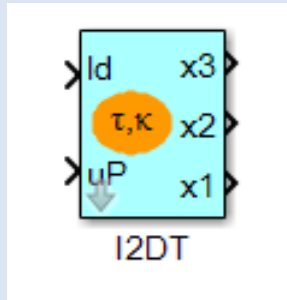


Zmiany: znak e , oznaczenie i znak sygnału kompensującego, parametr $k3=1/b=1$

Przekształcenia modelu części elektromechanicznej

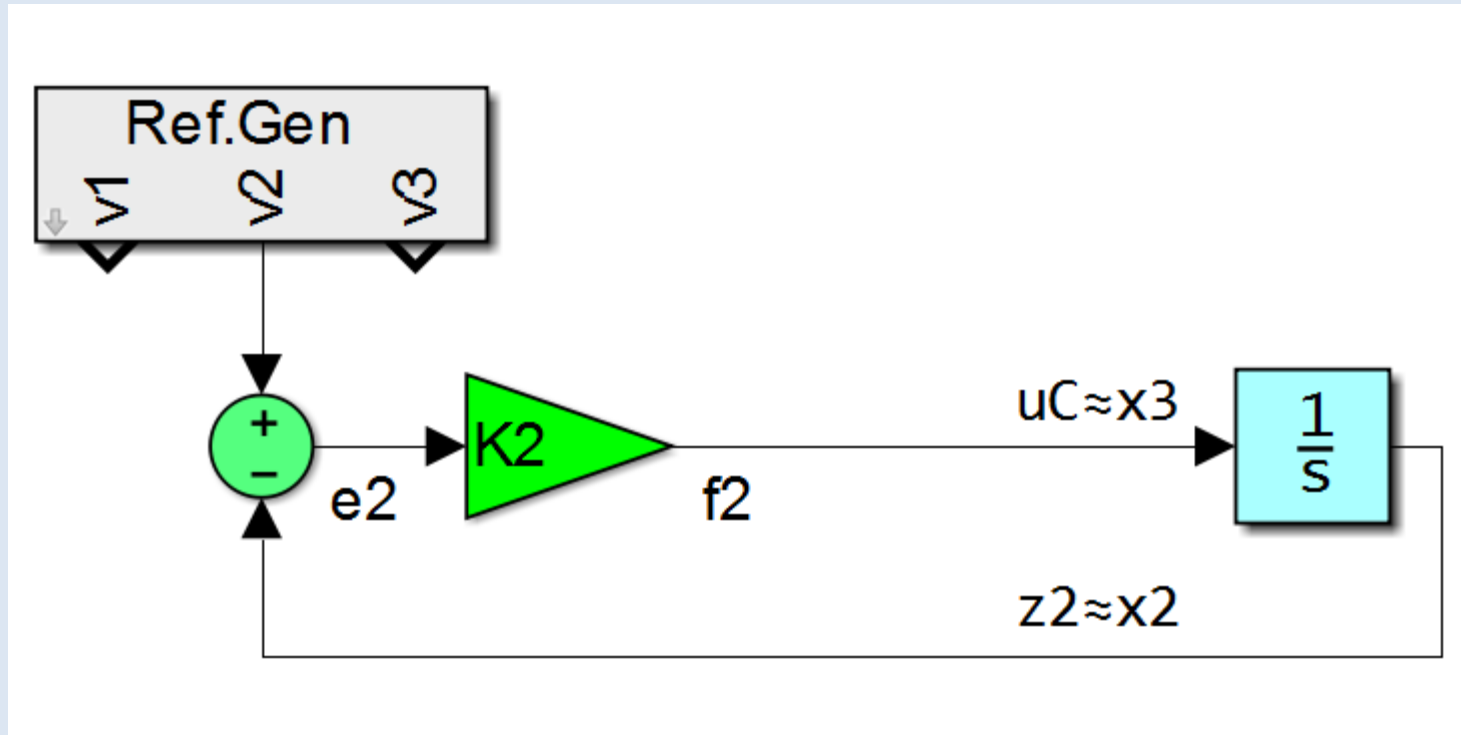


Modele części elektromechanicznej: I2DT ; cI2DT

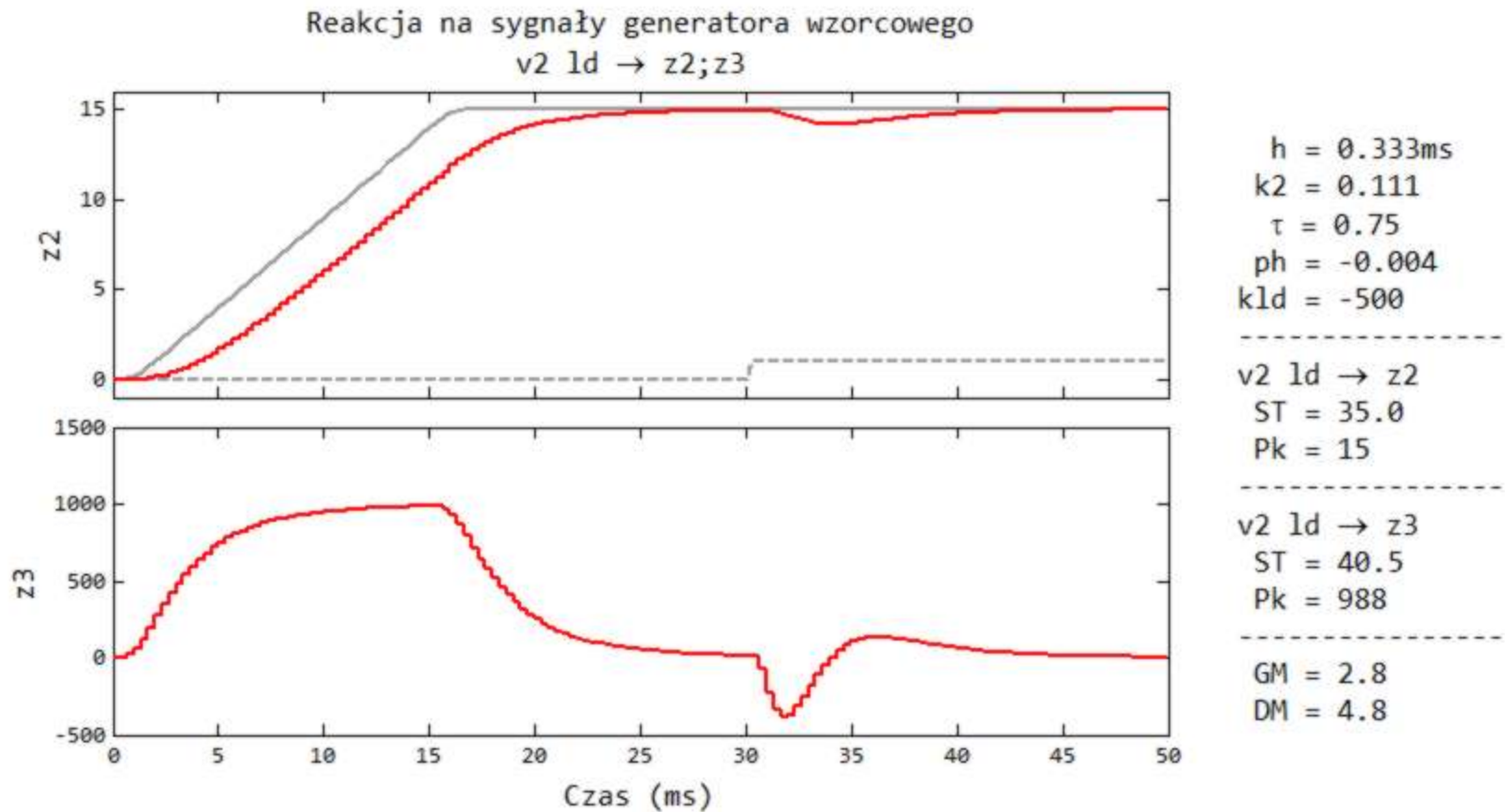




Regulacja prędkości bez wykorzystania sygnału v_3

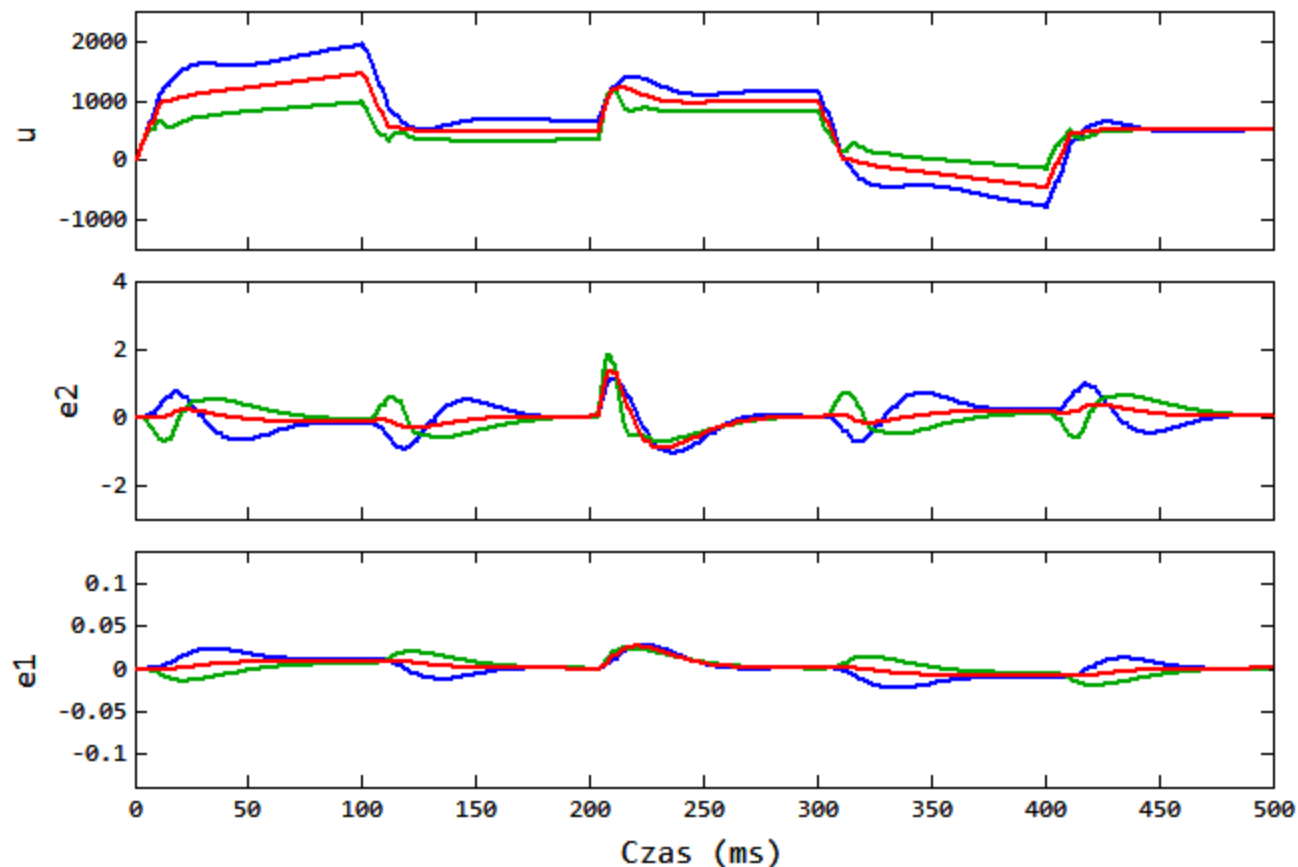


Regulacja prędkości bez v3 $1/K2 = 3\text{ms}$



Regulacja położenia z wykorzystaniem v3; k2=0.2

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie
v1 v2 v3 ld → u;e2;e1



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 0.2$

$k1 = 0.01$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

→ e2

$Pk < 1.83$

$ST < 475.9$

→ e1

$Pk < 0.028$

$ST < 475.8$

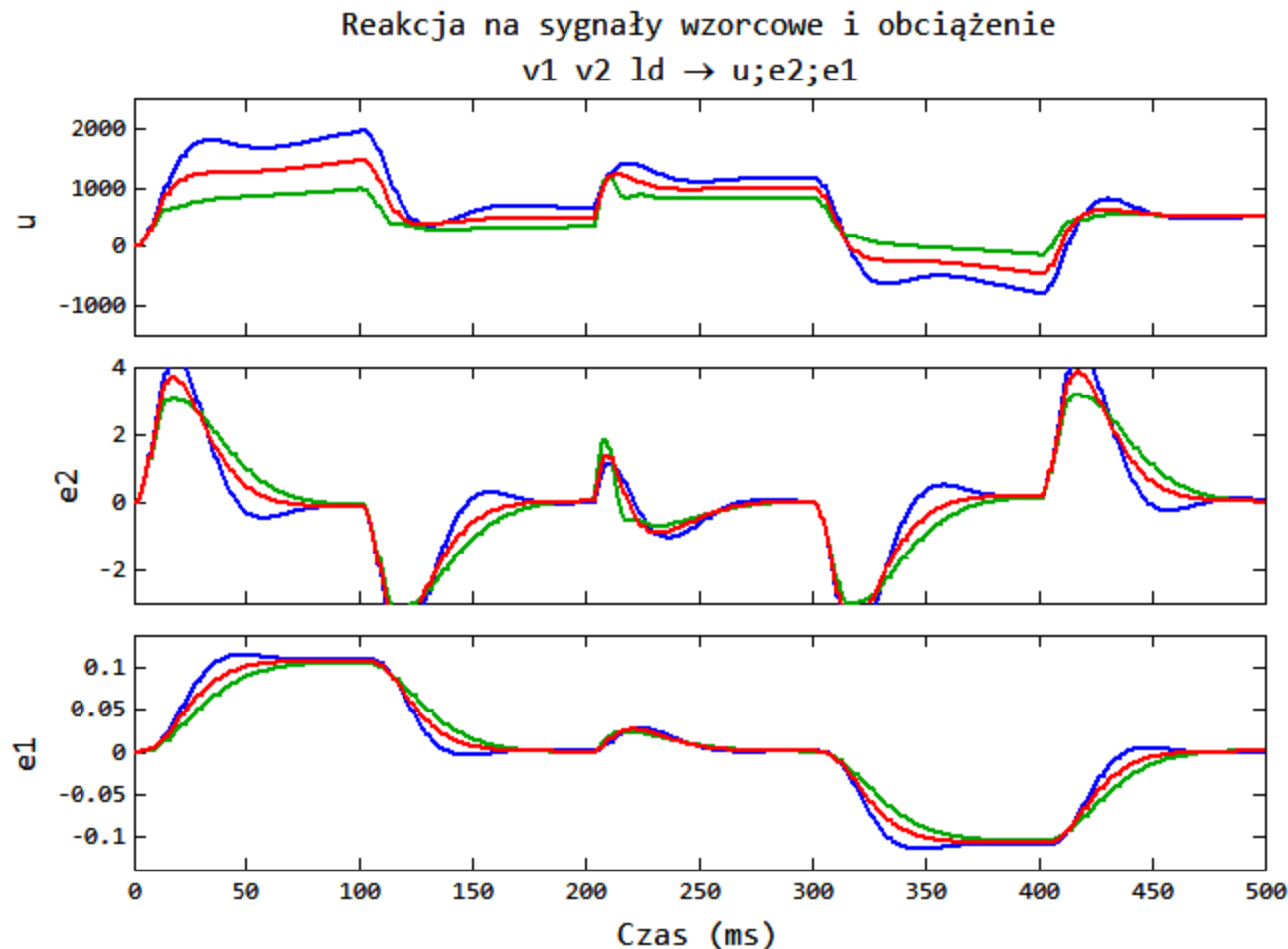
$IA < 4.46$

$GM > 1.7$

$DM > 1.8$

$PM > 30.6$

Regulacja położenia bez v3 ; $k=0.2$



TDE = LESO

$h = 1\text{ms}$

$k2 = 0.2$

$k1 = 0.01$

$\tau = 0.25$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e2$

$Pk < 4.42$

$ST < 476.0$

$\rightarrow e1$

$Pk < 0.116$

$ST < 463.4$

$IA < 23.4$

$GM > 1.7$

$DM > 1.8$

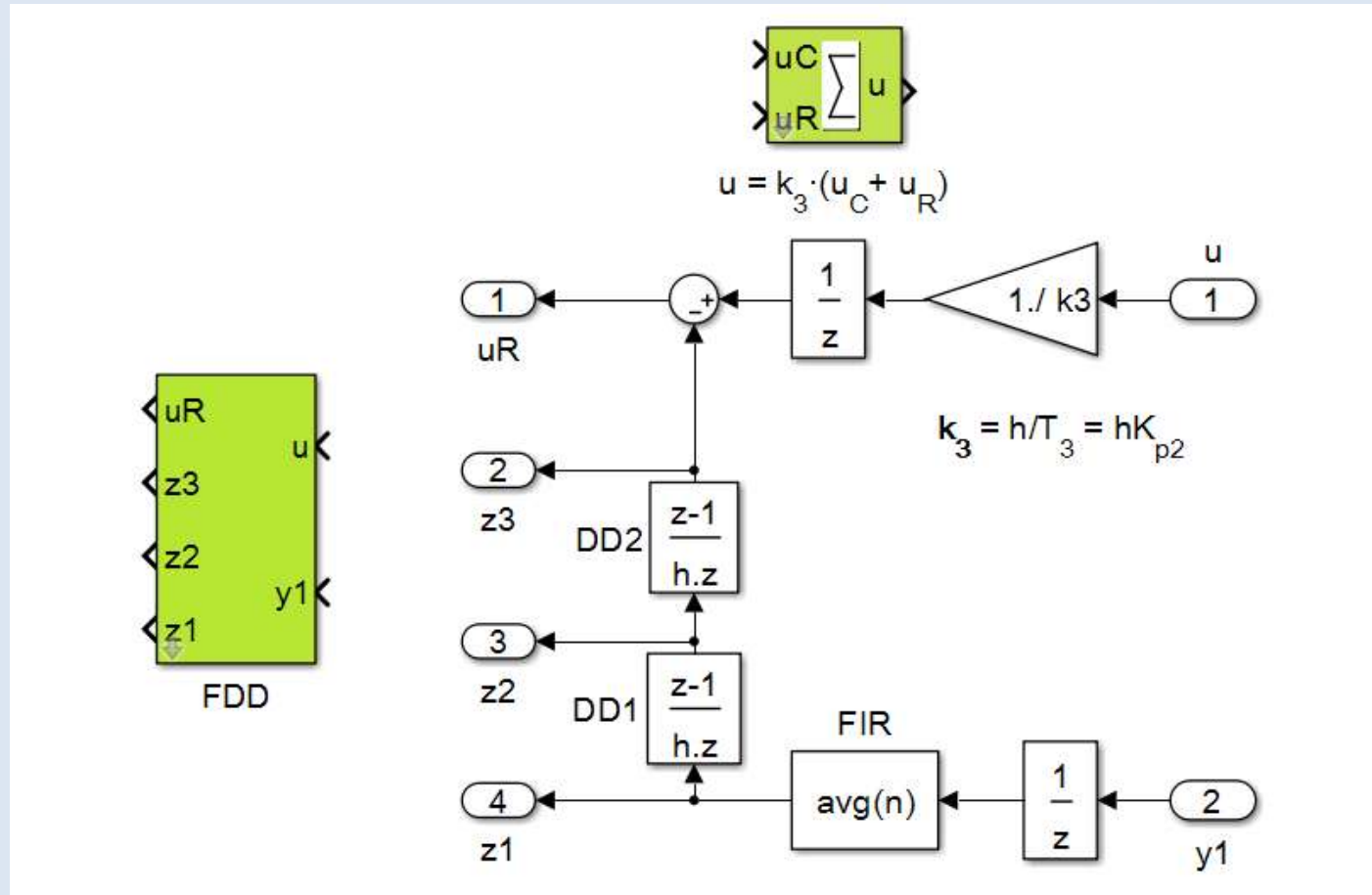
$PM > 30.6$

(wskaźnik IA ponad 5-krotnie większy! ; różnice tym większe im mniejsze $k2$)





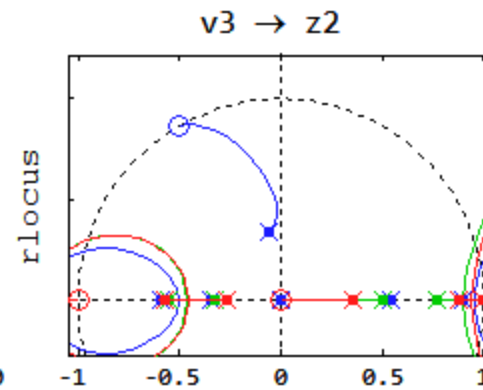
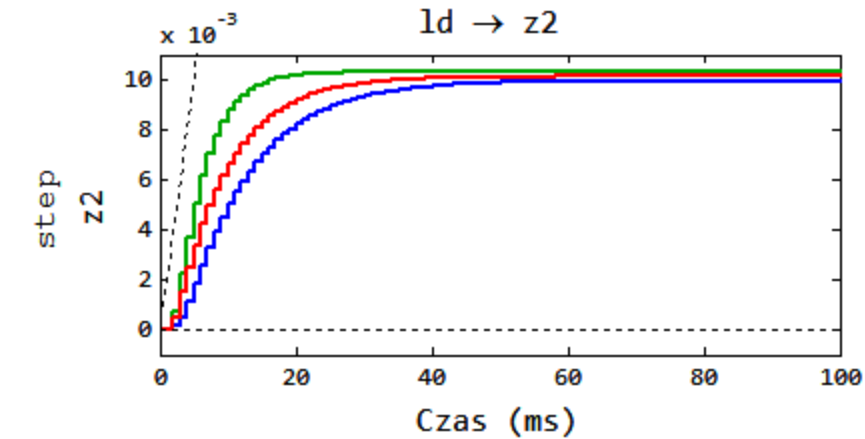
Schemat całkującego regulatora przyspieszenia



(całkujący regulator przyspieszenia, o stałej T_3 , jest równoważny proporcjonalnemu regulatorowi prędkości o wzmacnieniu $K_p=1/T_3$)

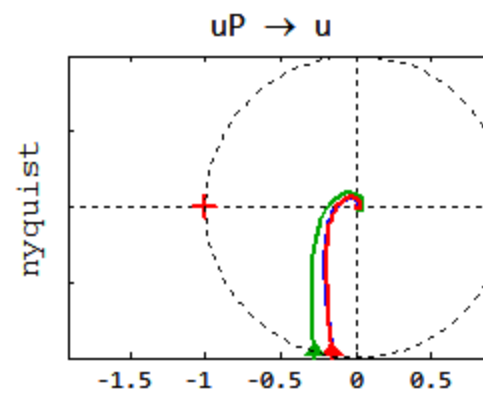
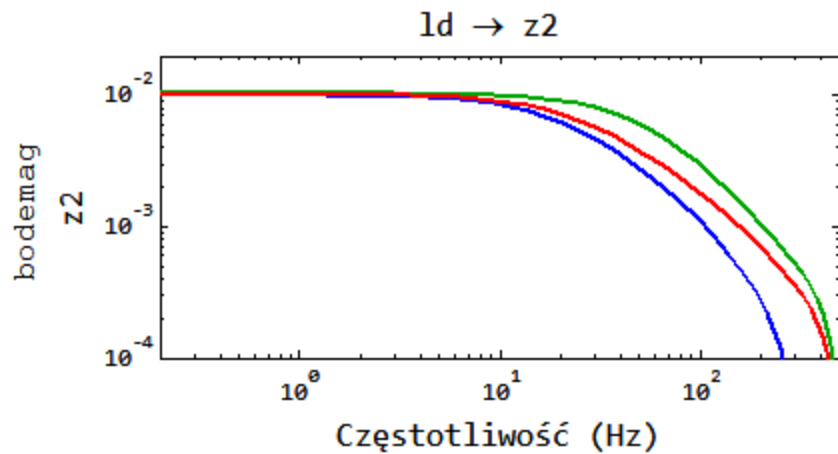


Regulacja prędkości typu P ; $1/K_p = h \cdot 32/3 = 10.7\text{ms}$



TDE = FDD v1
 $h = 1\text{ms}$
 $k3 = 0.0938$
 $k2 = 0$
 $k1 = 0$

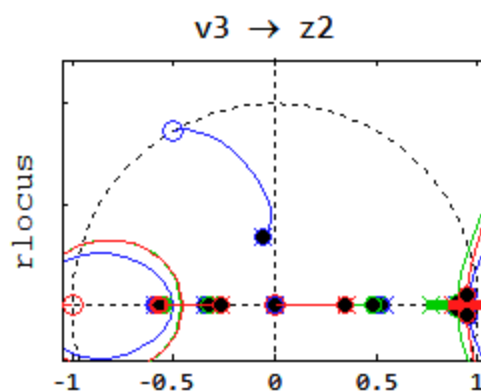
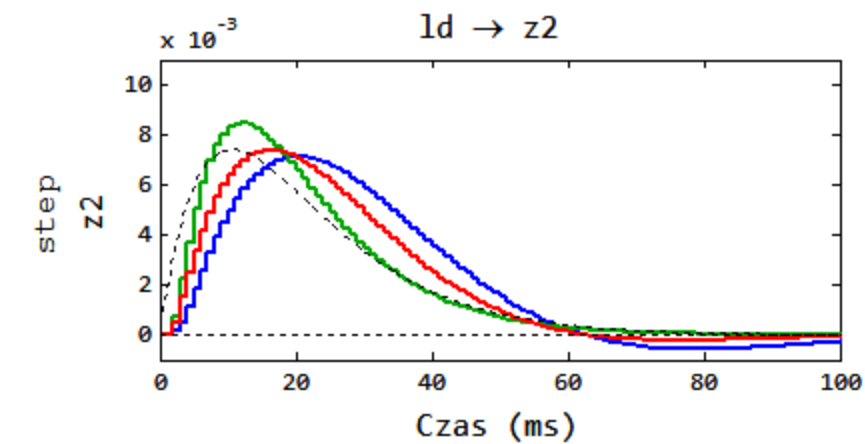
$\kappa = .75; 1.5; 1$
 $\tau = 0.25$
 $\text{ph} = -0.005$



$\rightarrow$ z2
 $P_k < 0.0103$
 $ST < 32.0$
 $IA < 1.03$

$GM > 5.2$
 $DM > 9.2$
 $PM > 73.9$

Regulacja prędkości typu PI ; $1/K_p=10.7\text{ms}$ $T_i=20\text{ms}$



TDE = FDD v1

$h = 1\text{ms}$

$k_3 = 0.0938$

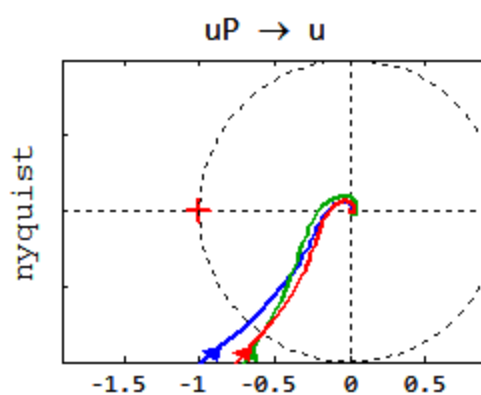
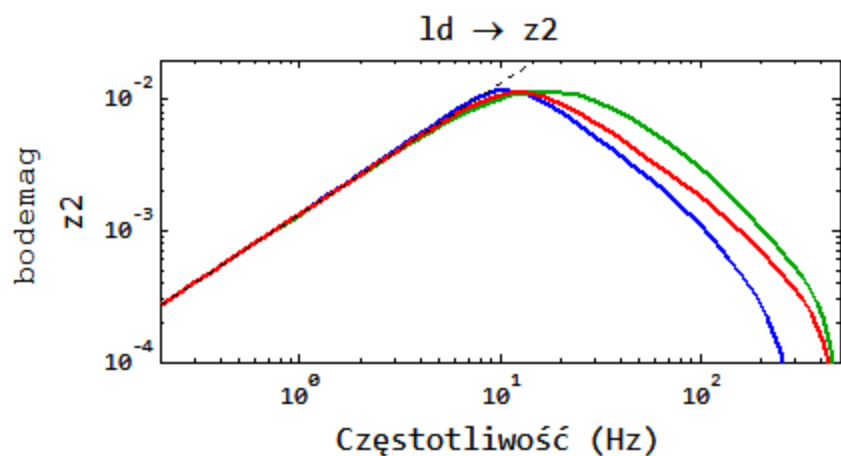
$k_2 = 0.05$

$k_1 = 0$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$\tau = 0.25$

$\text{ph} = -0.005$



$\rightarrow z2$

$P_k < 0.00845$

$ST < 96.0$

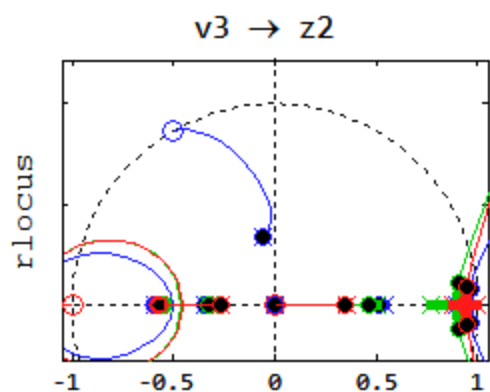
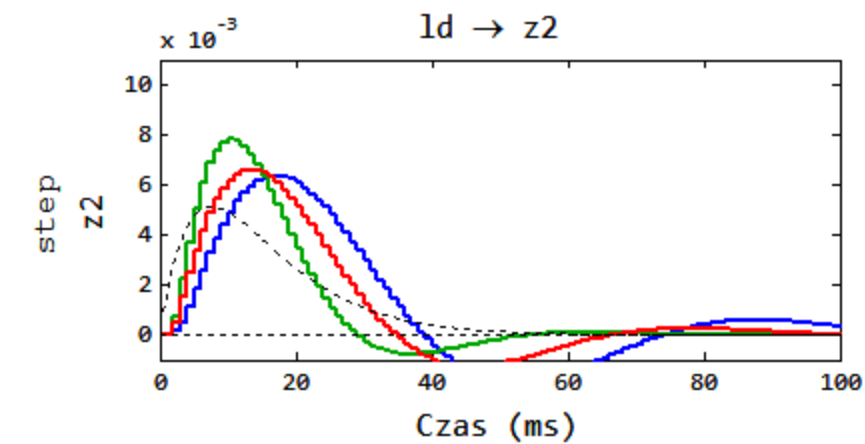
$IA < 0.000252$

$GM > 4.8$

$DM > 6.3$

$PM > 47.6$

Regulacja prędkości typu PI ; $1/K_p=10.7\text{ms}$ $T_i=10\text{ms}$



TDE = FDD v1

$h = 1\text{ms}$

$k_3 = 0.0938$

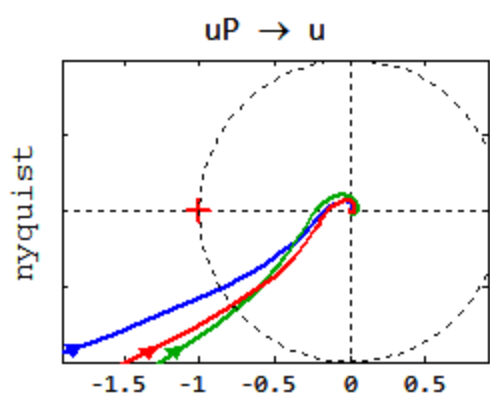
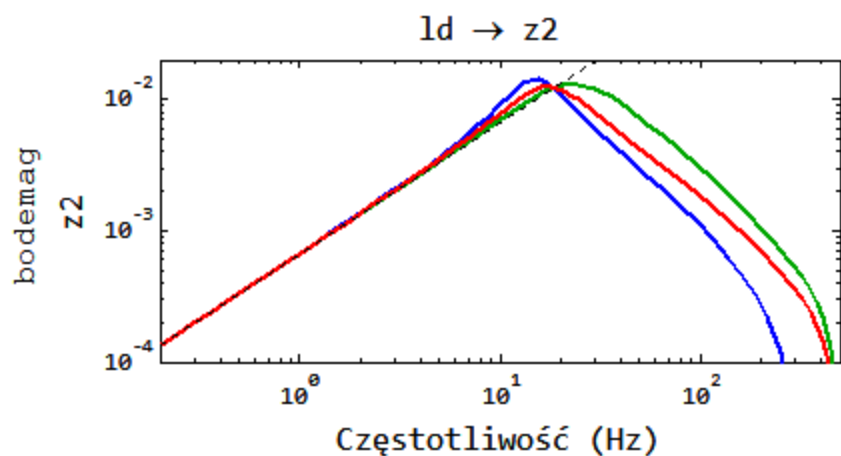
$k_2 = 0.1$

$k_1 = 0$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$\tau = 0.25$

$\text{ph} = -0.005$



$\rightarrow$ z2

$P_k < 0.00781$

$ST < 100.0$

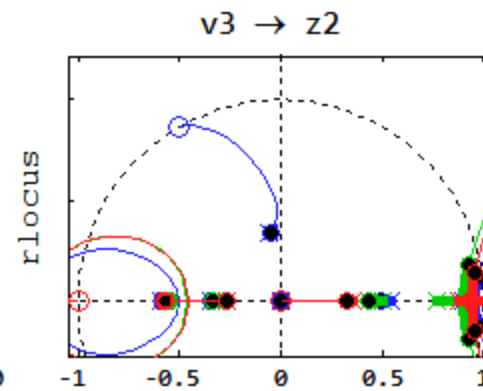
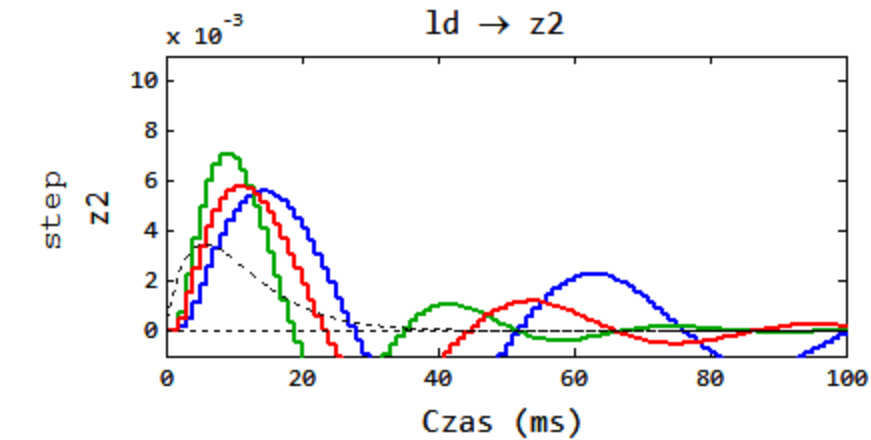
$IA < 0.000199$

$GM > 4.4$

$DM > 4.2$

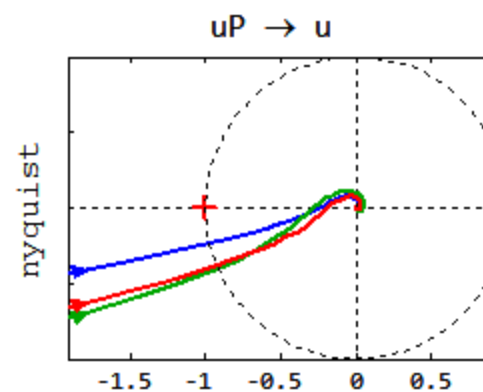
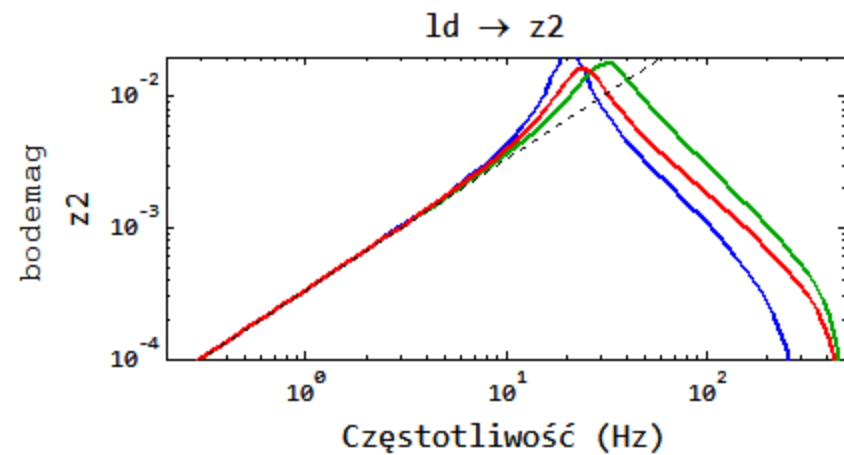
$PM > 30.7$

Regulacja prędkości typu PI ; $1/K_p=10.7\text{ms}$ $T_i=5\text{ms}$



TDE = FDD v1
 $h = 1\text{ms}$
 $k3 = 0.0938$
 $k2 = 0.2$
 $k1 = 0$

$\kappa = .75; 1.5; 1$
 $\tau = 0.25$
 $ph = -0.005$



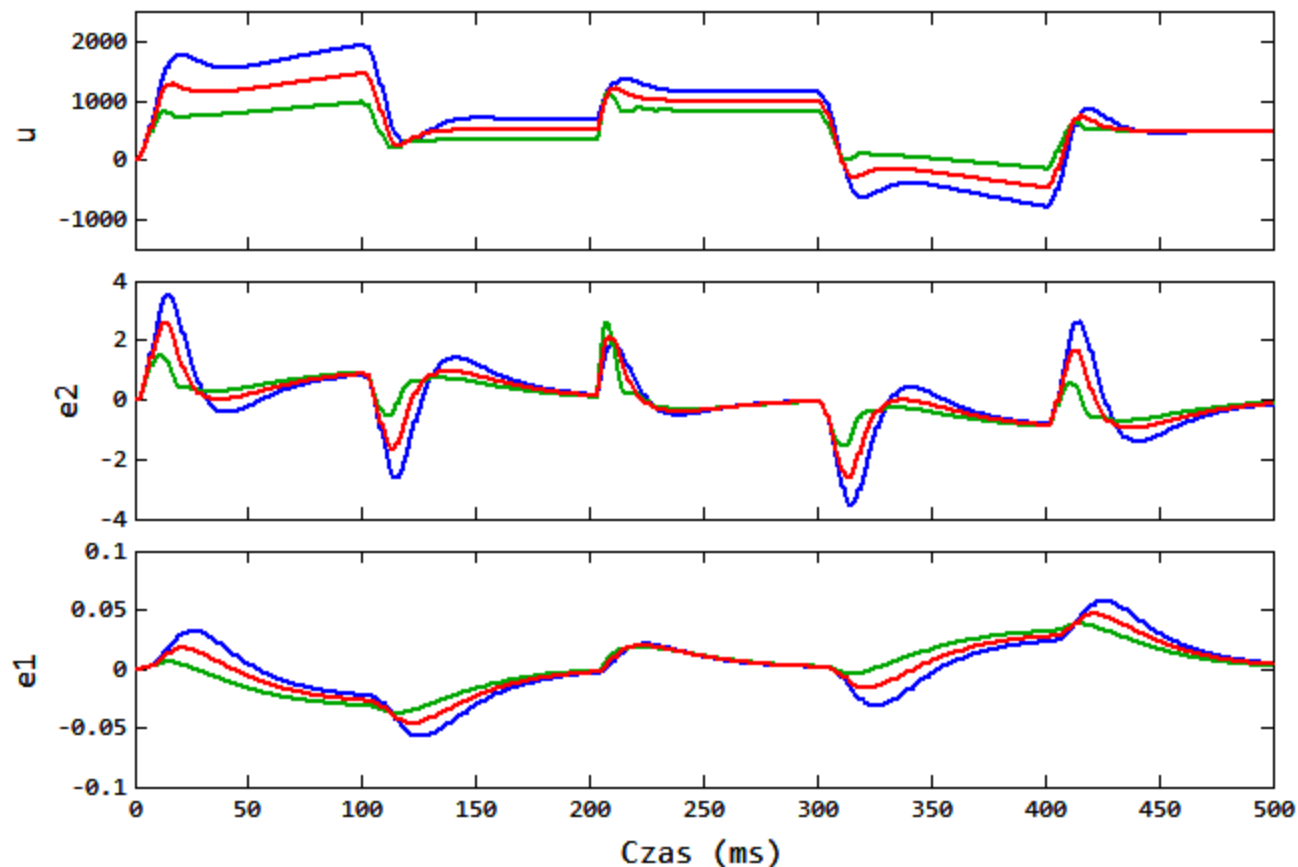
$\rightarrow$ z2
 $P_k < 0.00708$
 $ST < 166.0$
 $IA < 0.000236$

$GM > 3.6$
 $DM > 1.8$
 $PM > 13.6$

Regulacja położenia; $1/K_p=4.3\text{ms}$ $T_i=11.5\text{ms}$ $T_\theta=40\text{ms}$

Reakcja na sygnały wzorcowe i obciążenie

v1 v2 v3 1d $\rightarrow$ u; e2; e1



TDE = FDD v2

$h = 1\text{ms}$

$k_3 = 0.233$

$k_2 = 0.0873$

$k_1 = 0.00218$

$\kappa = .75; 1.5; 1$

$\tau = 0.25$

$ph = -0.005$

$\rightarrow e2$

$Pk < 3.55$

$ST < 482.5$

$\rightarrow e1$

$Pk < 0.0575$

$ST < 486.3$

$IA < 0.00949$

$GM > 1.8$

$DM > 1.4$

$PM > 30.4$