Устойчивость узла нагрузки

Задание на понедельник!!!

Записать Якобиан для шунтовой нагрузки!

Система нелинейных уравнений:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega,$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M}\left(V^2 G - \frac{EV}{X}\sin\delta - D\omega\right),$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\tau}\left(-\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X}\cos\delta - kV^2 G\right).$$

Решение. Якобиан, шунтовая нагрузка.

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\dfrac{EV}{MX}\cos\delta & -\dfrac{D}{M} & -\dfrac{E}{MX}\sin\delta + \dfrac{2VG}{M} \\ -\dfrac{EV}{\tau X}\sin\delta & 0 & \dfrac{1}{\tau}\left[\dfrac{E\cos\delta}{X} - \dfrac{2V}{X} - 2kVG\right] \end{pmatrix}$$

Станция – узел нагрузки. PQ нагрузка

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega,$$

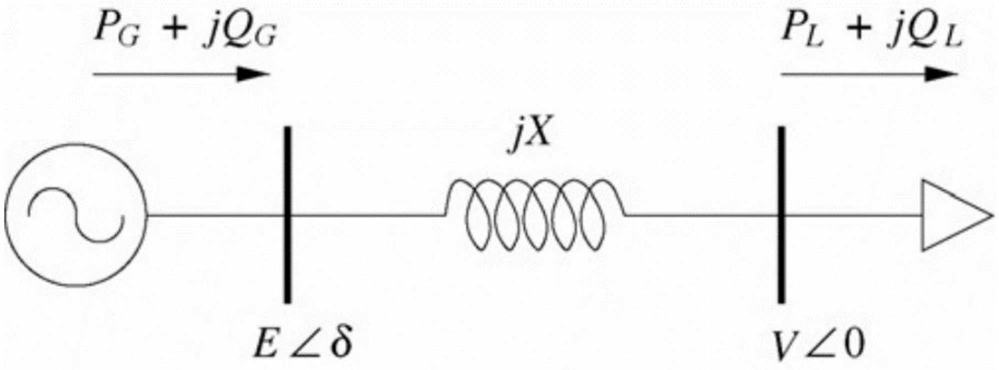
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M}\left(P_L - \frac{EV}{X}\sin\delta - D\omega\right),$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\tau}\left(-\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X}\cos\delta - kP_L\right).$$

Принимаем PQ нагрузку с характеристиками:

$$S_L = P_L + jkP_L$$

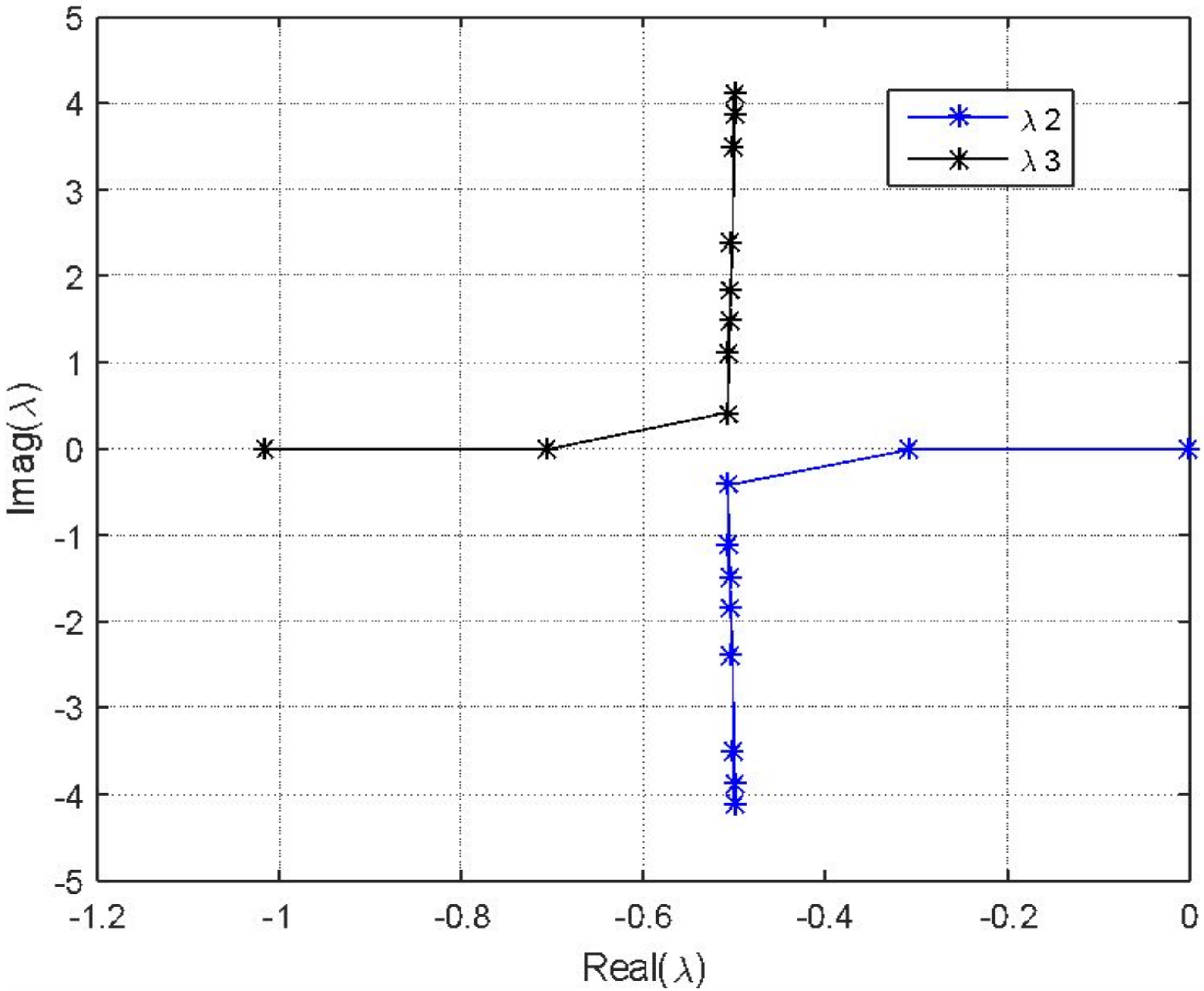
$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{EV}{MX}\cos\delta & -\frac{D}{M} & -\frac{E}{MX}\sin\delta \\ -\frac{EV}{\tau X}\sin\delta & 0 & \frac{1}{\tau X}\left[E\cos\delta - 2V\right] \end{pmatrix}$$



Поиск предельной точки. Станция-узел нагрузки. PQ – нагрузка.

P, о.е.	δ, град.	V, о.е.
0,3	9,561282	0,903057
0,4	13,52185	0,855373
0,5	18,43495	0,790569
0,6	26,56505	0,67082
0,6125	28,86594	0,634371
0,615625	29,83653	0,618685
0,617188	30,60262 (0.5341)	0,606178
0,617969	31,40799	0,592914
0,618018	31,56226	0,59036
0,618042	31,71764	0,587786
0,618054	31,71789	0,587788

Динамика движения собственных чисел



Нелинейная система Станция – Узел Нагрузки PQ

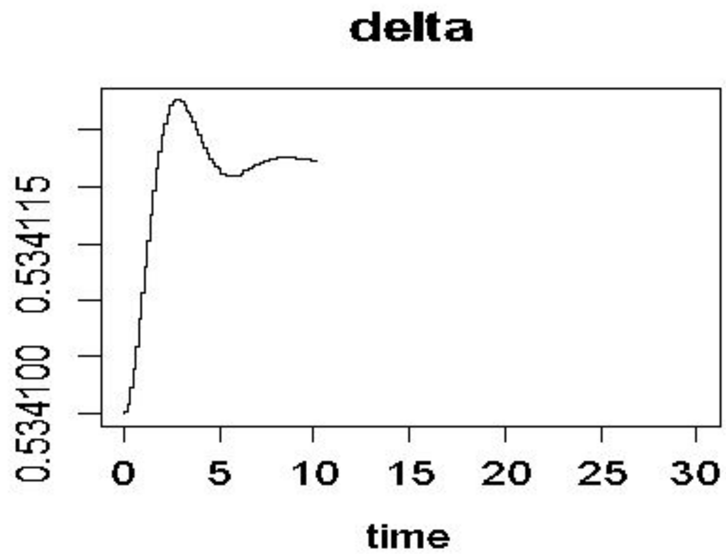
LoadStabilityPQInitial.R

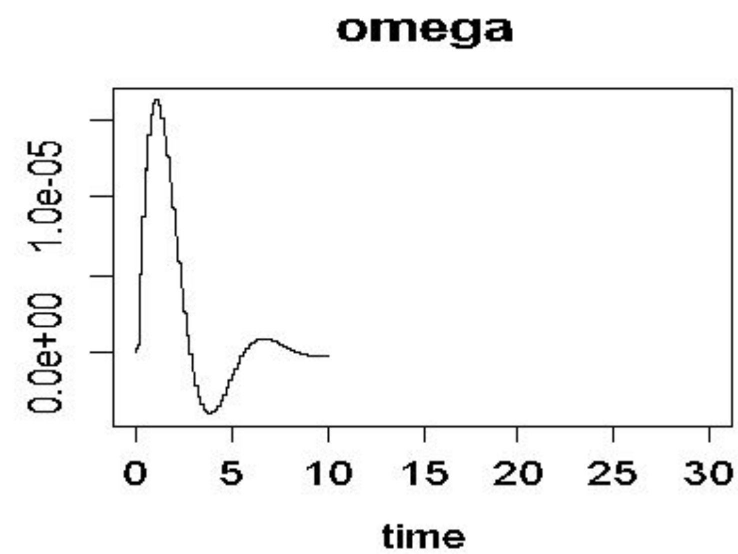
Source on Save

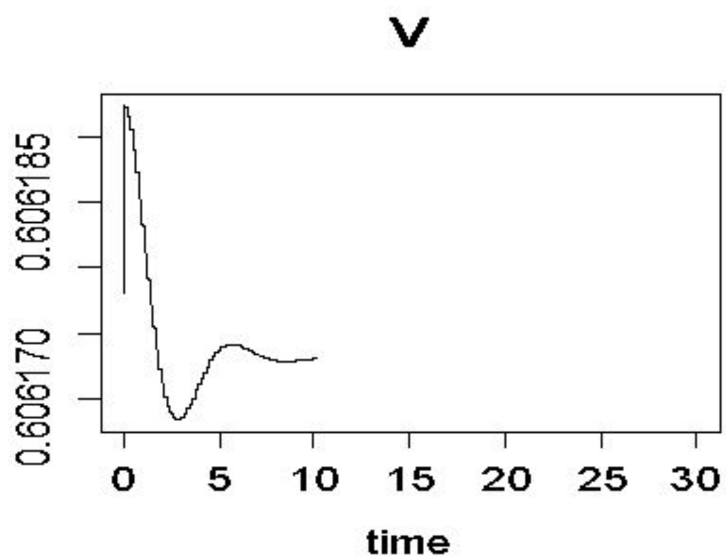
Run

```r
M0=0.1; D0=0.1; X0=0.5; E0=1; tau0=0.001;k0=0.5;
P0=0.617188;
parameters<-c(M=M0,D=D0,X=X0,E=E0,P=P0,tau=tau0,k=k0)
#(dX/dt=0)
omega0=0
delta0=0.5341
V0=0.606178
state<-c(delta=delta0,omega=omega0,V=V0)
Parallel<-function(t,state,parameters){
  with(as.list(c(state,parameters)),{
    dDelta<-omega
    dOmega<-1/M*(P-E*V*sin(delta)/X-D*omega)
    dV<-1/tau*(-k*P-V^2/X+E*V*cos(delta)/X)
    list(c(dDelta,dOmega,dV))
  })
}
times<-seq(0,30,by=0.01)
library(deSolve)
out<-ode(y=state,times=times,func=Parallel,parms=parameters)
plot(out)
```

Нелинейная система Станция – Узел Нагрузки PQ



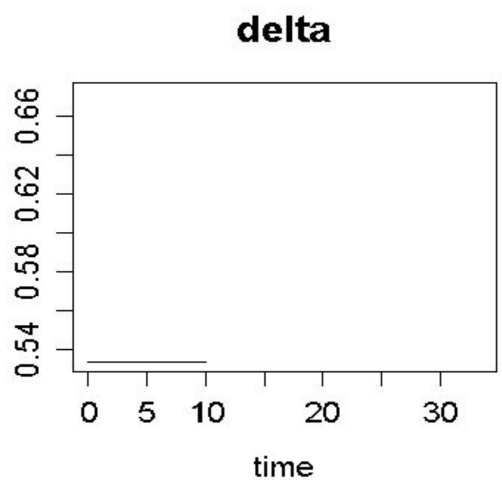


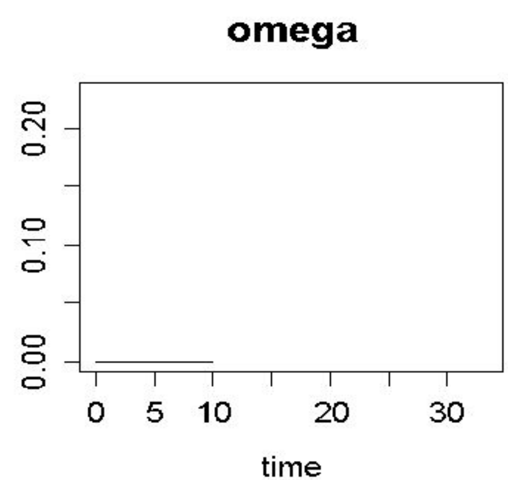


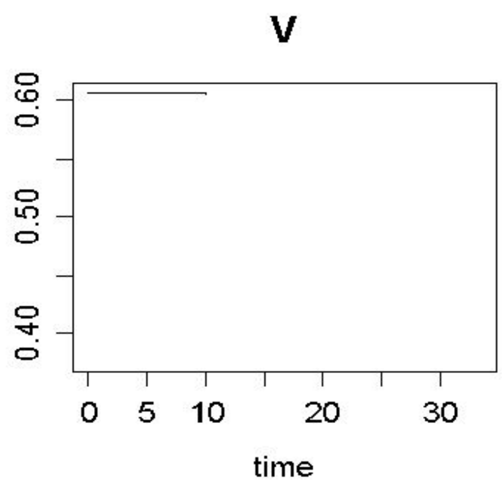
Динамика движения системы вблизи границы апериодической устойчивости

Нелинейная система Станция – Узел Нагрузки PQ. Увеличение нагрузки 0.617188 -> 0.61805

```
state<-c(delta=delta0,omega=omega0,V=V0)
Parallel<-function(t,state,parameters){
  with(as.list(c(state,parameters)),{
    if (TRUE){
    if (t>10){
      P=0.61805
    }
    }
```



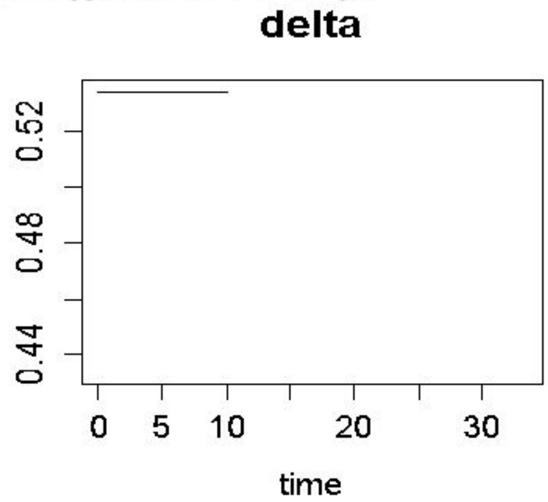


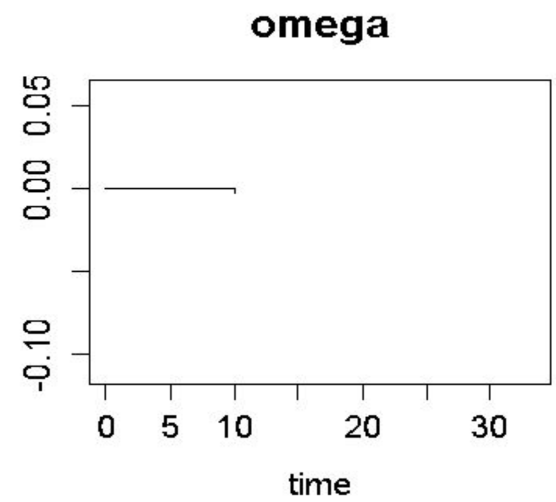


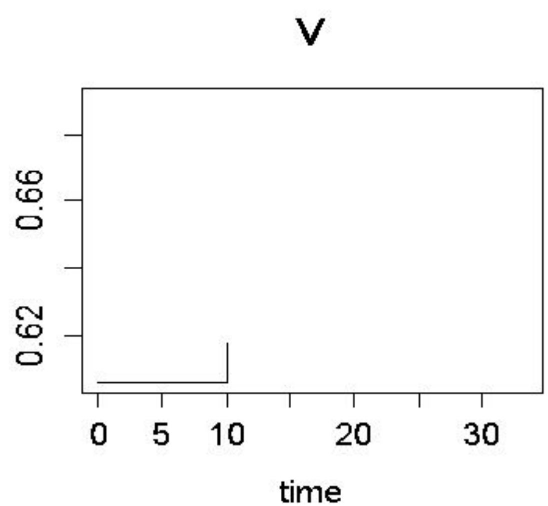
Нарушение апериодической устойчивости. Рпред=0.61805

Нелинейная система Станция – Узел Нагрузки PQ. Снижение нагрузки 0.617188 -> 0.6

```
state<-c(delta=delta0,omega=omega0,V=V0)
Parallel<-function(t,state,parameters){
  with(as.list(c(state,parameters)),{
    if (TRUE){
      if (t>10){
        P=0.6
      }
    }
```







Устойчивый динамический переход при снижении нагрузки.

Устойчивость узла нагрузки.
Статическая колебательная неустойчивость

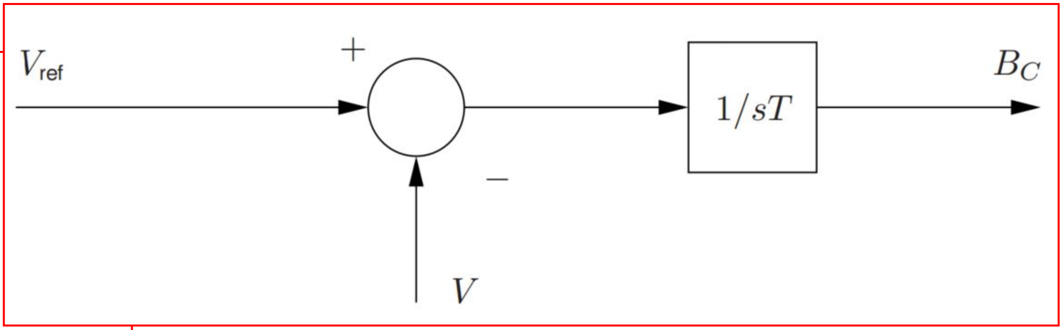
Устройство компенсации реактивной мощности.

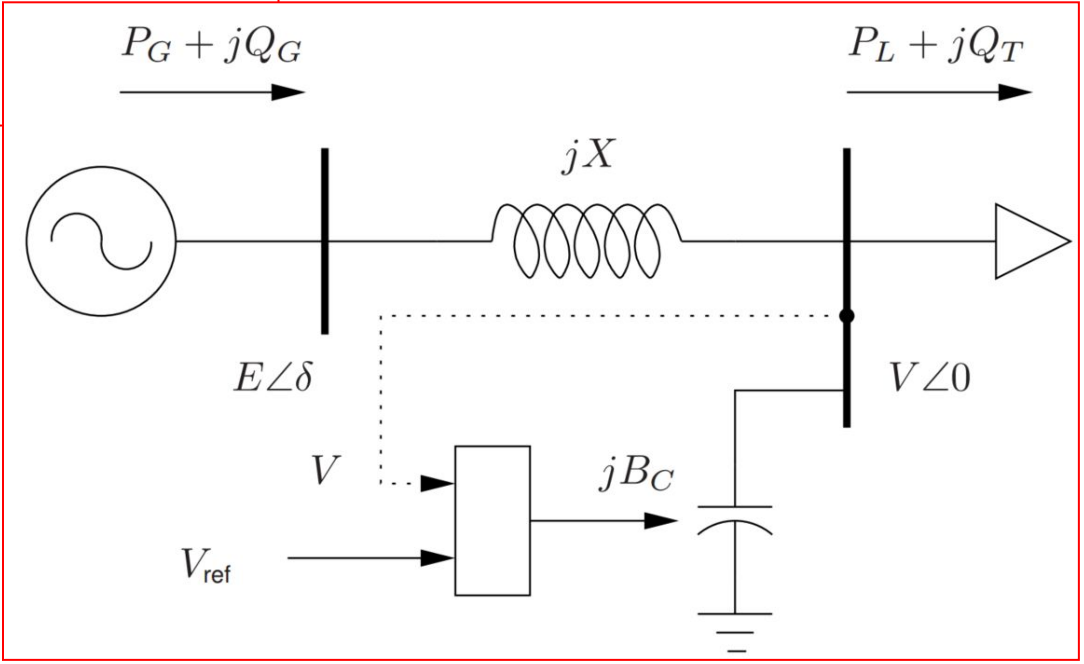
$$\frac{d\delta}{dt} = \omega,$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M}\left(P_L - \frac{EV}{X}\sin\delta - D\omega\right),$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\tau}\left(V^2\left(Bc - \frac{1}{X}\right) + \frac{EV}{X}\cos\delta - kP_L\right),$$

$$\frac{dBc}{dt} = \frac{1}{T}(Vref - V).$$





Устройство компенсации реактивной мощности. Якобиан?

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\dfrac{EV}{MX}\cos\delta & -\dfrac{D}{M} & -\dfrac{E}{MX}\sin\delta & 0 \\ -\dfrac{EV}{\tau X}\sin\delta & 0 & \dfrac{1}{\tau X}\left[E\cos\delta - 2V + 2VBcX\right] & \dfrac{V^2}{\tau} \\ 0 & 0 & -\dfrac{1}{T} & 0 \end{pmatrix}$$

Исследование системы уравнений. Поиск предельной точки.

Необходимые и достаточные условия?

1. Условие необходимое, но недостаточное. Должно существовать решение системы нелинейных алгебраических уравнений.

$$0 = \omega,$$

$$0 = \frac{1}{M}\left(P_L - \frac{EV}{X}\sin\delta - D\omega\right),$$

$$0 = \frac{1}{\tau}\left(V^2\left(Bc - \frac{1}{X}\right) + \frac{EV}{X}\cos\delta - kP_L\right),$$

$$0 = \frac{1}{T}(Vref - V).$$

2. Необходимое и достаточное: выполнение условия 1, а также:

$$(\exists\lambda)(\mathrm{Re}\{\lambda\} = 0)$$

Исследование системы уравнений. Поиск предельной точки. Метод деления шага пополам.

С СКРМ

P, о.е.	δ, град.	Вс, о.е.
0,3	8,626927	0,172628
0,4	11,53696	0,240408
0,5	14,47751	0,313508
0,6	17,4576	0,392122
0,7	20,48732	0,476501
0,8	23,57818	0,56697
0,9	26,74368	0,663943
1	30	0,767949
1,1	33,36701	0,879671
1,2	36,8699	1
1,3	40,5416	1,130132
1,4	44,427	1,271714
1,4125	44,93062	1,290325
1,414063	44,99388	1,292667
1,414258	45,00179	1,29296
1,414307	**45,00377**	**1,293033**

БЕЗ СКРМ

P, о.е.	**δ, град.**	**V, о.е.**
0,3	9,561282	0,903057
0,4	13,52185	0,855373
0,5	18,43495	0,790569
0,6	26,56505	0,67082
0,6125	28,86594	0,634371
0,615625	29,83653	0,618685
0,617188	30,60262	0,606178
0,617969	31,40799	0,592914
0,618018	31,56226	0,59036
0,618042	31,71764	0,587786
0,618054	**31,71789**	**0,587788**

Исследование системы уравнений. Поиск предельной точки.

Поиск предельной точки ведется путем последовательного увеличения нагрузки приемной системы.

Параметры системы:

M0=0.1; D0=0.1; X0=0.5; E0=1; tau0=0.001;k0=0.5;

Vref=1 (уставка САУ)

Предельные значения:

omega0=0; **delta0= 45,00377**; V0=Vref=1; **P=1,414307**; Bc=1,29

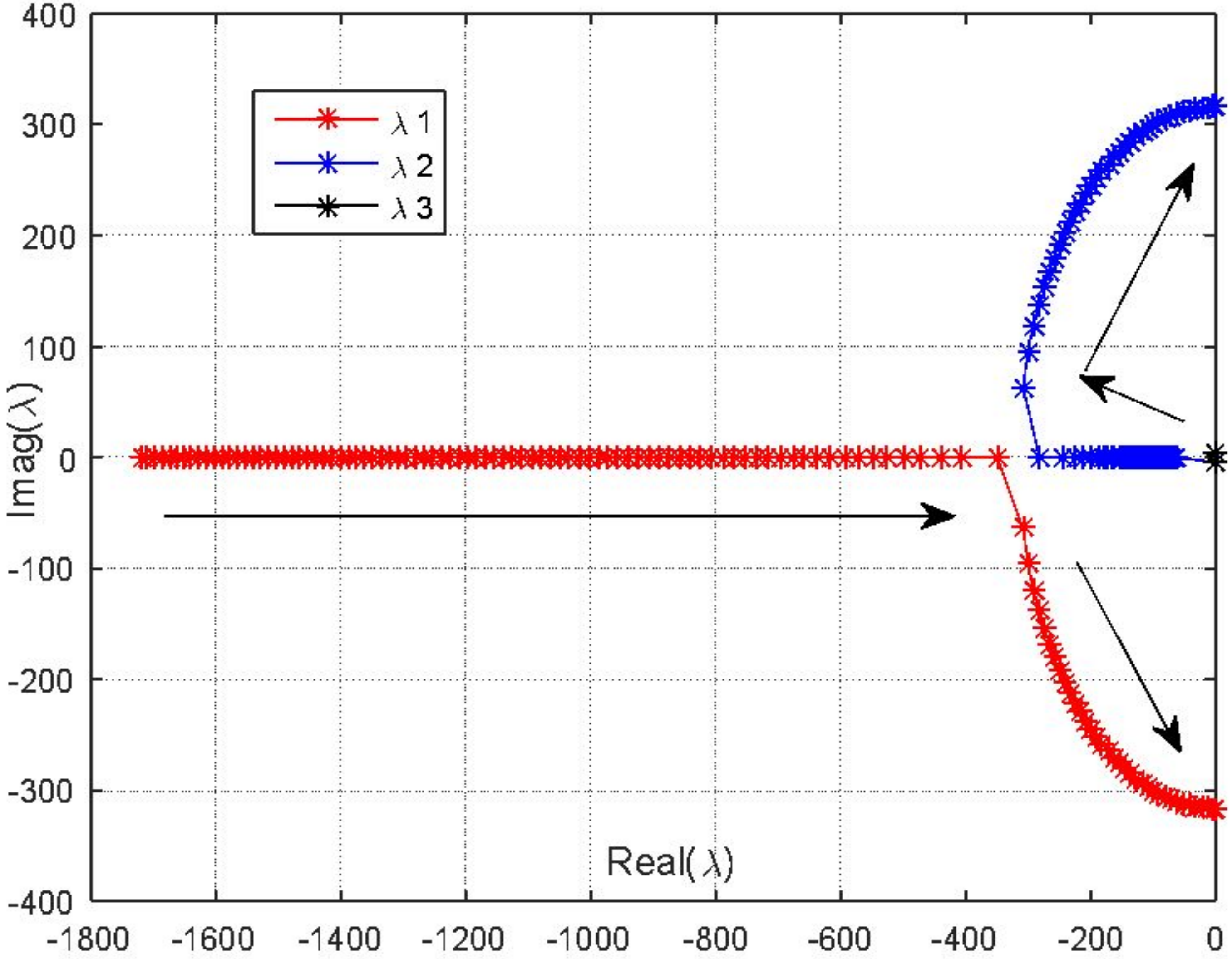
ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ: (SL=1,414+j*0.5*1,414)

СРАВНИТЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ БЕЗ СКРМ:

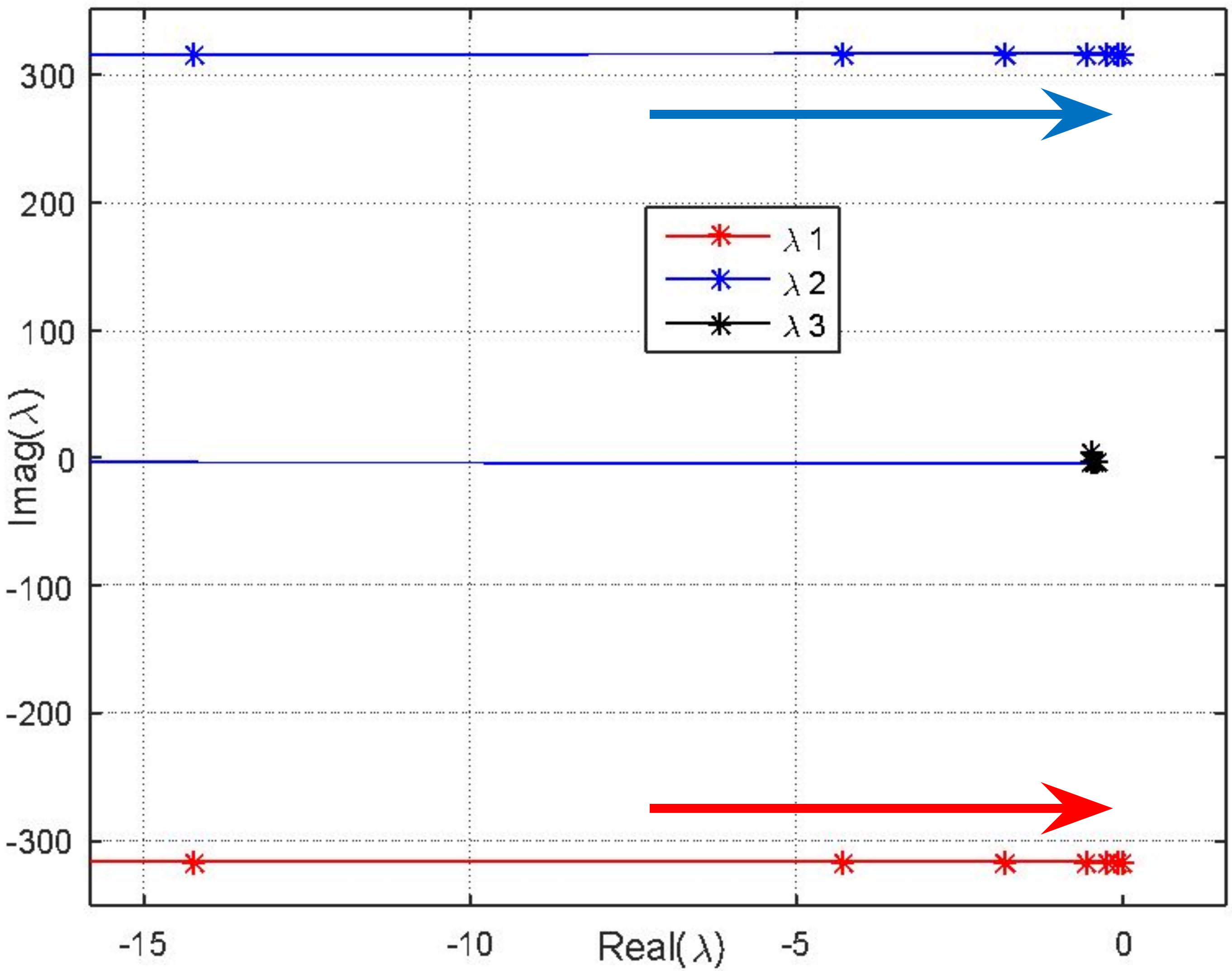
omega0=0; **delta0= 31,71789**; V0=0.5877; **P=0.61805**

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ: (SL=0.618+j*0.5*0.618)

Динамика движения собственных чисел

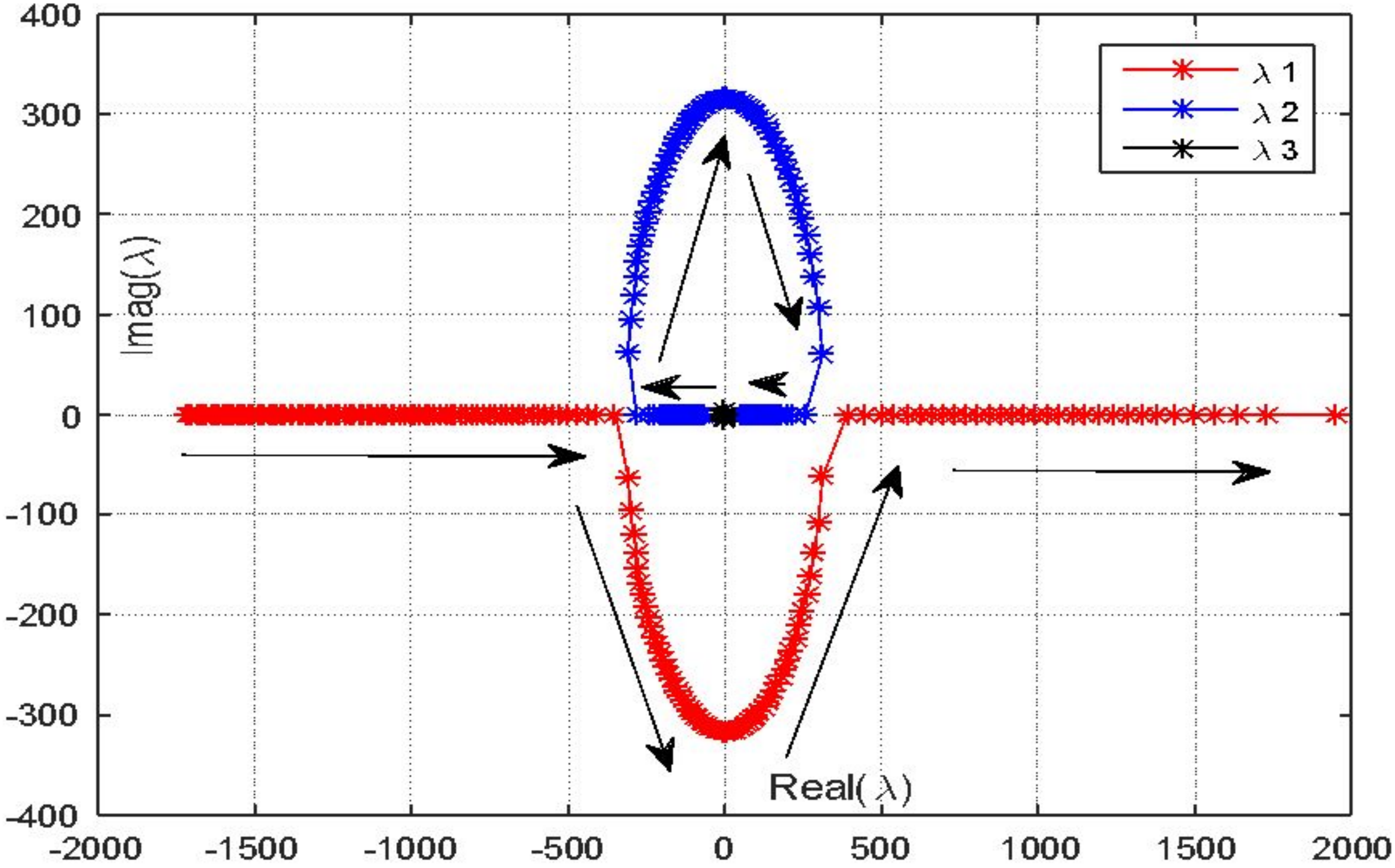


Динамика движения собственных чисел



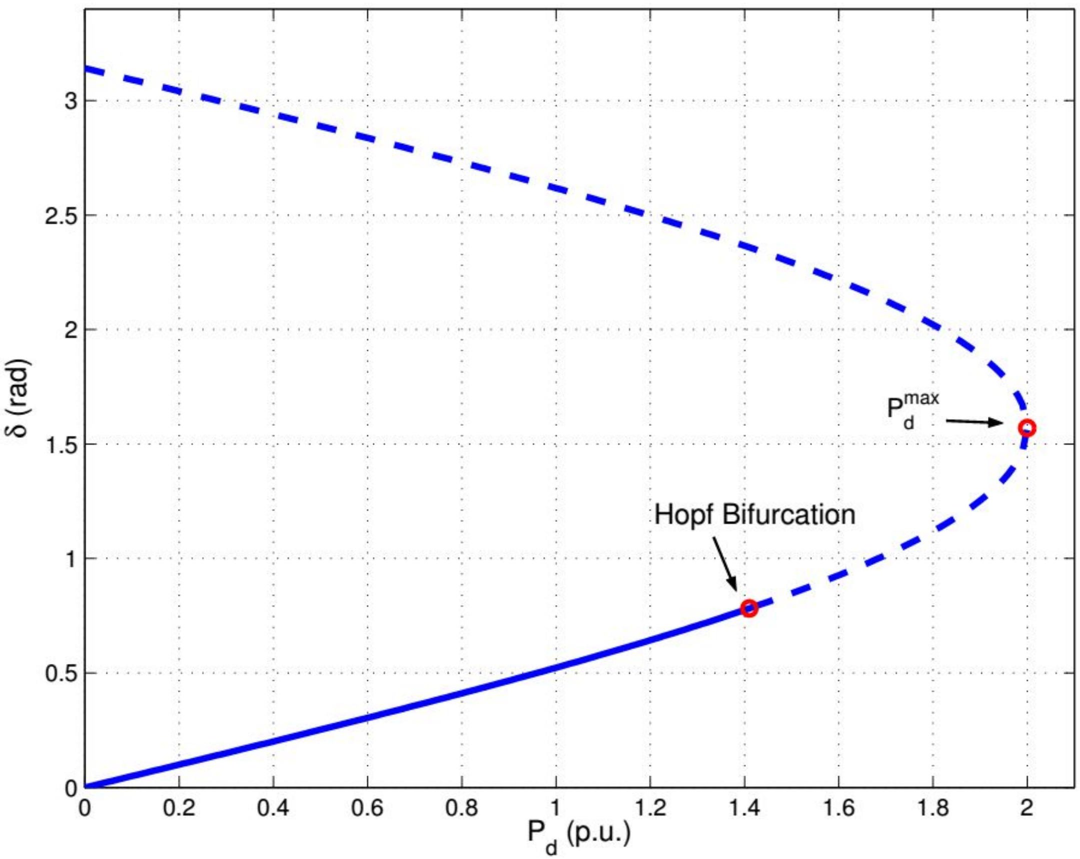
Полная динамика движения собственных чисел.

Утяжеляем до тех пор, пока существует решение алгебраических уравнений.



Полная динамика движения собственных чисел.

- Какого значения угла мы достигнем в момент, когда перестанет существовать решение системы уравнений?

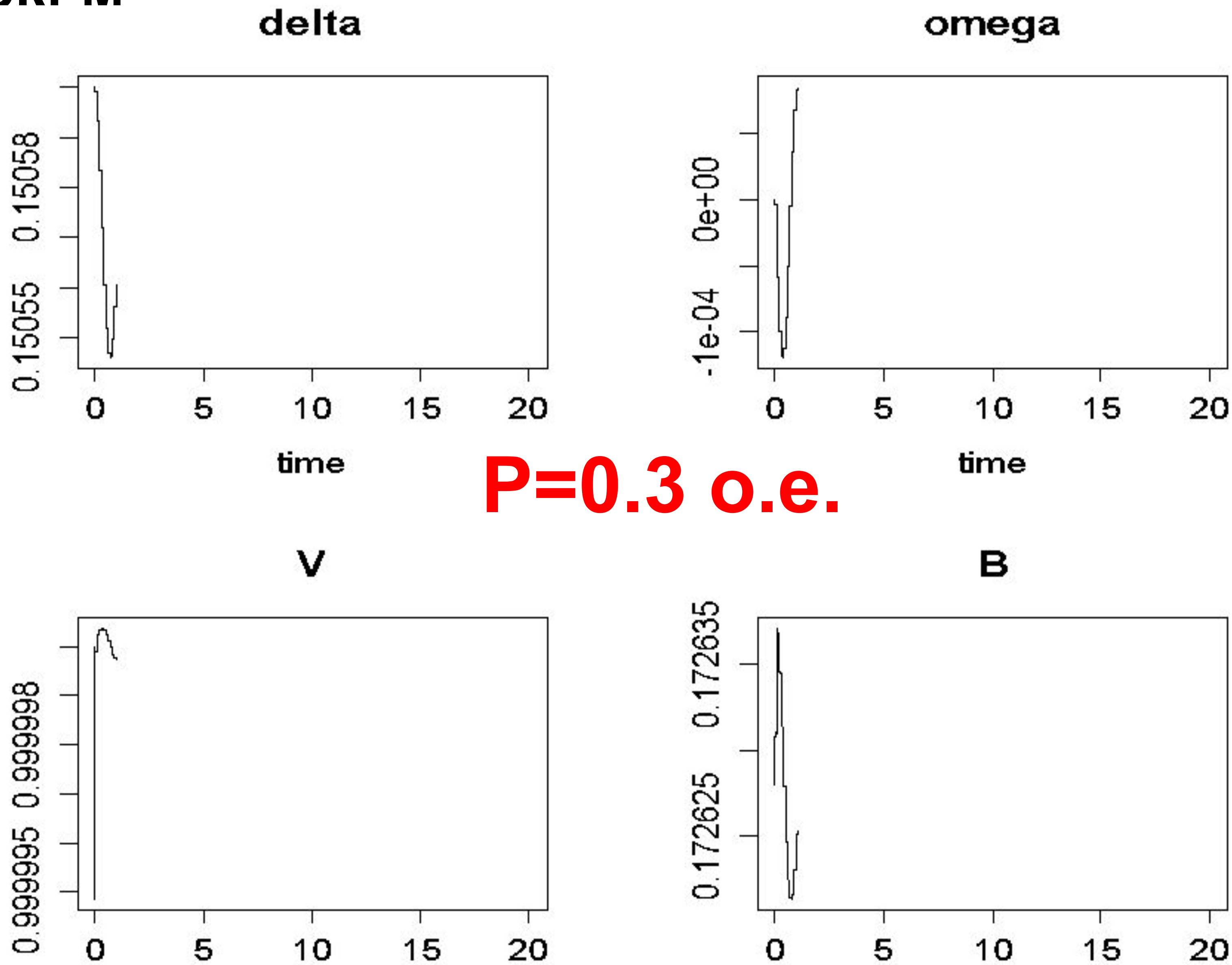


Предельный угол – 90 градусов. Предельный угол аналогичен углу для системы станция – ШБМ, однако нарушение устойчивости произойдет раньше.

Нелинейная система Станция – Узел Нагрузки PQ + СКРМ

```
M0=0.1; D0=0.1; X0=0.5; E0=1; tau0=0.001;k0=0.5;T0=0.01;
P0=0.3;#aperiodic
parameters<-c(M=M0,D=D0,X=X0,E=E0,P=P0,tau=tau0,k=k0,TT=T0)
#(dX/dt=0)
omega0=0
delta0=0.1506
V0=1
B0=0.172628
state<-c(delta=delta0,omega=omega0,V=V0,B=B0)
Parallel<-function(t,state,parameters){
  with(as.list(c(state,parameters)),{
    dDelta<-omega
    dOmega<-1/M*(P-E*V*sin(delta)/X-D*omega)
    dV<-1/tau*(-k*P+V^2*(B-1/X)+E*V*cos(delta)/X)
    dB<-1/TT*(1-V);#Vref=1
    list(c(dDelta,dOmega,dV,dB))
  })
}
times<-seq(0,30,by=0.01)
library(deSolve)
out<-ode(y=state,times=times,func=Parallel,parms=parameters)
plot(out)
```

Нелинейная система Станция – Узел Нагрузки PQ + СКРМ

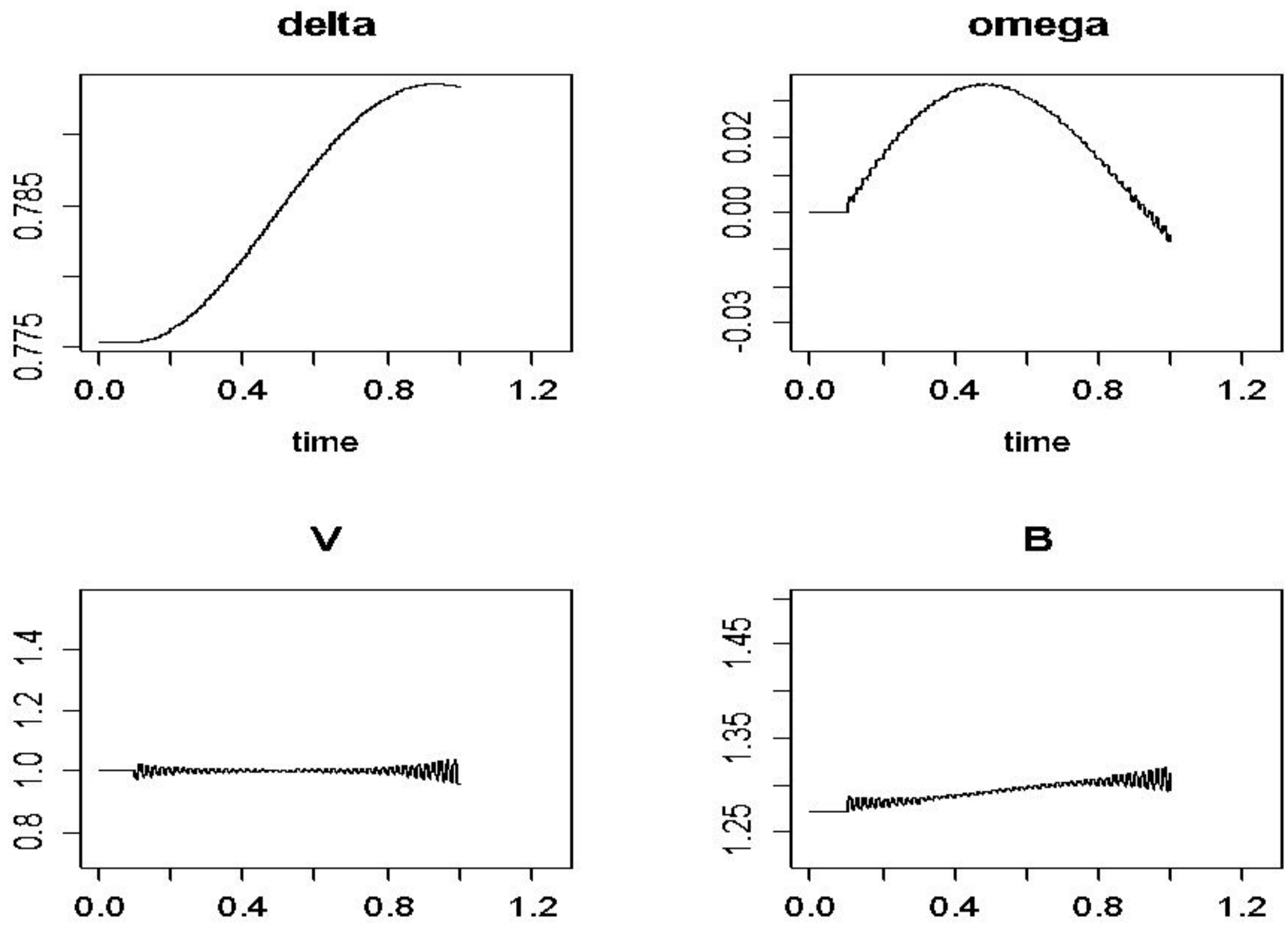


P=0.3 o.e.

Нелинейная система Станция – Узел Нагрузки PQ + СКРМ. Увеличение нагрузки 1.4 -> 1.415

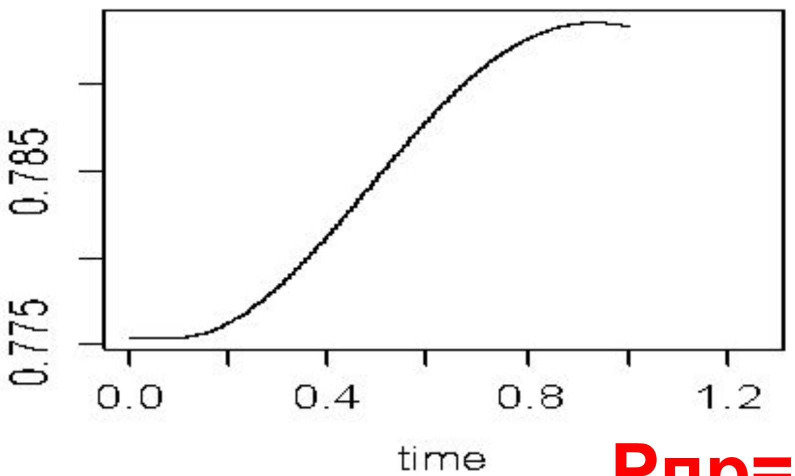
```
Parallel<-function(t,state,parameters){
  with(as.list(c(state,parameters)),{
    if (TRUE){
      if (t>0.1){
        P=1.415
      }
    }
```

Pпр=1.414 о.е.

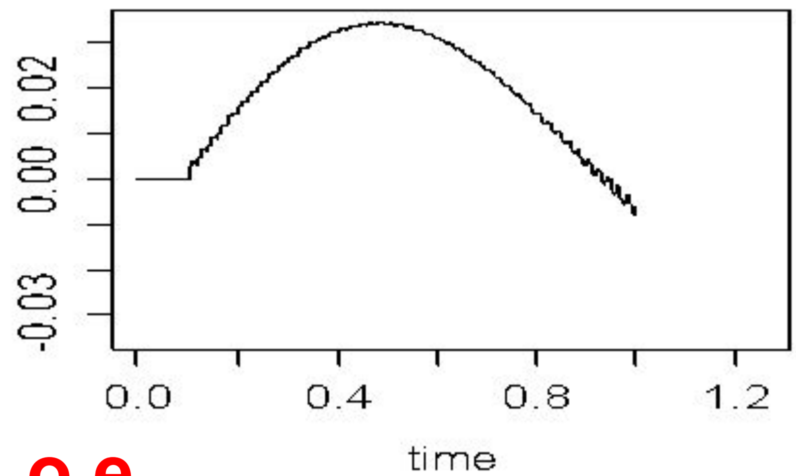


Нелинейная система Станция – Узел Нагрузки PQ + СКРМ. Увеличение нагрузки 1.4 -> 1.415

delta

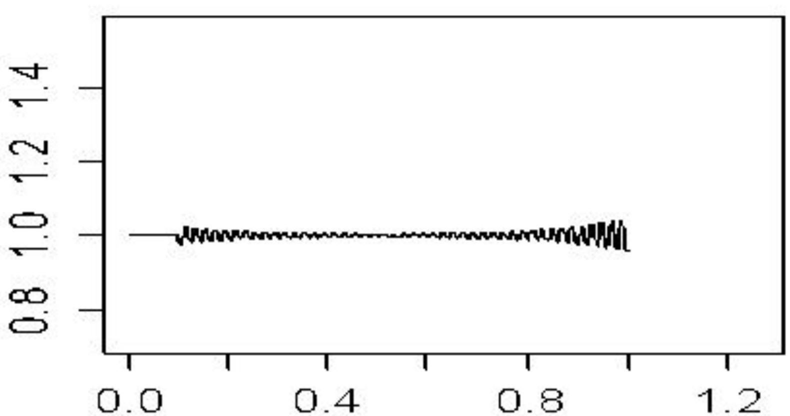


omega

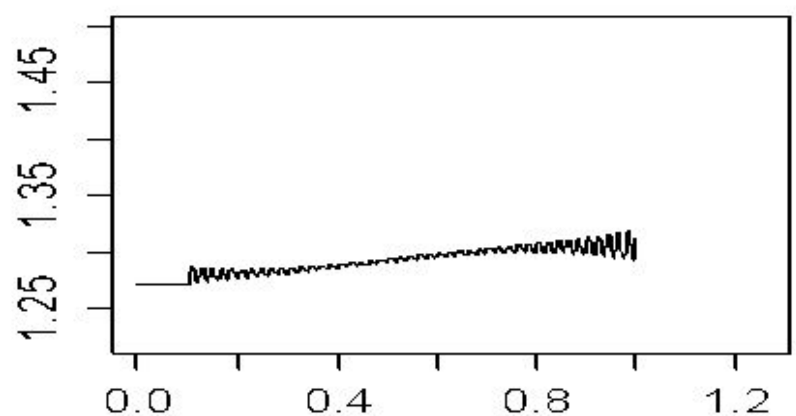


Pпр=1.414 о.е.
tmax =1.26 сек.

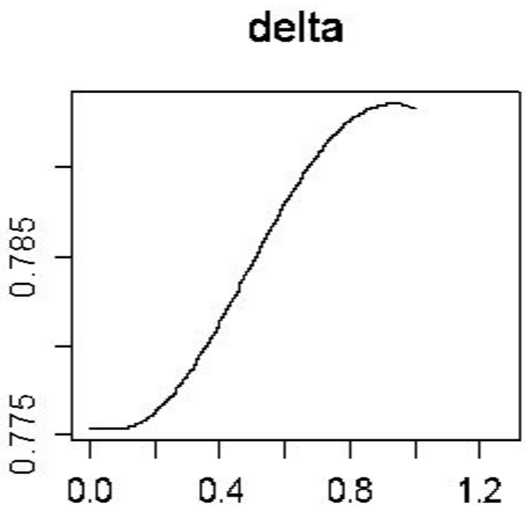
V

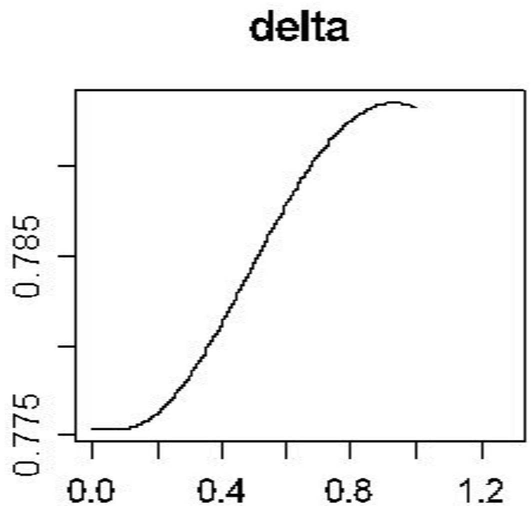


B



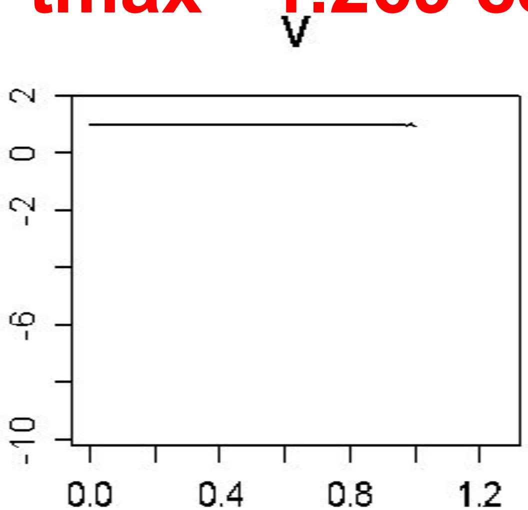
Нелинейная система Станция – Узел Нагрузки PQ + СКРМ. Увеличение нагрузки 1.4 -> 1.415

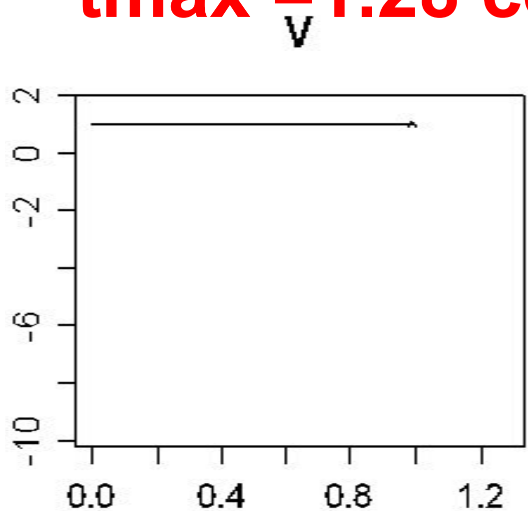




Pпр=1.414 о.е.
tmax =1.269 сек.

Pпр=1.414 о.е.
tmax =1.28 сек.





Заметьте, что устойчивость по углу нарушается только после нарушения устойчивости вследствие колебательной неустойчивости! Следовательно, колебательная неустойчивость – это причина, а апериодическая неустойчивость по углу - следствие