

Санкт-Петербургский государственный университет

Отделение прикладной математики и информатики
Кафедра прикладной кибернетики

Миронов Алексей Владиславович

Оценка области захвата для систем ФАПЧ 3 порядка

Выпускная квалификационная работа

Научный руководитель:
д. т.н., профессор Юлдашев Р. В.

Содержание

1	Введение	3
2	Теорема	3
3	Теорема Декарта	4
4	Оценка области захвата для систем ФАПЧ с фильтром $\frac{1}{(1+\tau_{p1}x)(1+\tau_{p2}x)}$	4
4.1	Оценка максимума ν константой	5
4.2	Точная оценка максимума ν	5
5	Оценка области захвата для систем ФАПЧ с фильтром $\frac{(1+\tau_{z1}x)^2}{(1+\tau_{p1}x)^2}$	6
5.1	$\tau = 0$	6
5.2	$\tau > 0$	9
6	Оценка области захвата для систем ФАПЧ с фильтром $\frac{(1+\tau_{z1}x)(1+\tau_{z2}x)}{(1+\tau_{p1}x)(1+\tau_{p2}x)}$	9

1 Введение

Рассмотрим систему:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + bv_e(\theta_e) \\ \dot{\theta}_e &= \omega_e^{free} - K_{vco}(c^*x + hv_e(\theta_e))\end{aligned}\tag{1}$$

Найдем стационарные точки системы (1)

$$\begin{aligned}x &= -A^{-1}bv_e(\theta_e) \\ v_e(\theta_e) &= \frac{\omega_e^{free}}{K_{vco}H(0)}\end{aligned}\tag{2}$$

Возьмем $\theta_e = \theta_s$, для которых выполняется (2). Сделаем замену:

$$\begin{aligned}z &= x + A^{-1}bv_e(\theta_s) \\ \sigma &= \theta_e\end{aligned}\tag{3}$$

После замены система (1) принимает вид:

$$\begin{aligned}\dot{z} &= Az + b(v_e(\sigma) - \frac{\omega_e^{free}}{K_{vco}H(0)}) \\ \dot{\sigma} &= -K_{vco}(c^*z + h(v_e(\sigma) - \frac{\omega_e^{free}}{K_{vco}H(0)}))\end{aligned}\tag{4}$$

2 Теорема

Рассмотрим систему:

$$\begin{aligned}\dot{z} &= Az + Bf(\sigma) \\ \dot{\sigma} &= C^*z + Rf(\sigma)\end{aligned}\tag{5}$$

Here A, B, C, and R are constant matrices of dimensions $n \times n$, $n \times m$, $n \times m$, and $n \times n$, respectively, whereas the components ϕ_k , $1 \leq k \leq m$, of the vector-valued function $f(\sigma)$ are scalar differen-tiable functions $\phi_k = \phi_k(\sigma_k)$, where ψ_k is the k-th component of the vector ψ .

Recall that any pendulum-like system with a single scalar non-linearity and an irreducible transfer function $\chi(p)$ can be written in the form (5) with $m = 1$ by a nonsingular linear transformation of phase coordinates. Further we assume that the functions $\phi_k(\sigma_k)$ satisfy the following conditions: $\phi_k(\sigma_k) \equiv 0$

$$\begin{aligned}\mu_{1k} &\leq \frac{d\phi_k(\sigma_k)}{d\sigma_k} \leq \mu_{2k}, \forall \sigma_k \in \mathbb{R} \\ \phi_k(\sigma_k + \Delta_k) &= \phi_k(\sigma_k), \forall \sigma_k \in \mathbb{R}\end{aligned}\tag{6}$$

Here the Δ_k are positive numbers. Sometimes, in the study of the specific pendulum-like systems, only one of the inequalities

$$\mu_{1k} \leq \frac{d\phi_k(\sigma_k)}{d\sigma_k} \text{ or } \frac{d\phi_k(\sigma_k)}{d\sigma_k} \leq \mu_{2k}\tag{7}$$

is known, so we will assume the number μ_{1k} to be either finite negative or $-\inf$, and the number μ_{2k} to be either finite positive or \inf . When $\mu_{1k} = -\inf$ or $\mu_{2k} = \inf$, we will use the notation $\mu_{1k}^{-1} = 0$ or $\mu_{2k}^{-1} = 0$, respectively.

Let us introduce the numbers:

$$\nu_k = \int_0^{\Delta_k} \phi_k(\sigma) d\sigma \left(\int_0^{\Delta_k} |\phi_k(\sigma)| d\sigma \right)^{-1}\tag{8}$$

the transfer matrix of system (5) from its “input” f to its “output” $(-d\sigma/dt)$

$$K(p) = C * (A - pI)^{-1}B - R \quad (9)$$

and the diagonal $m \times m$ matrices:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \text{diag}[\mu_{11}, \dots, \mu_{1m}], \mu_2 = \text{diag}[\mu_{21}, \dots, \mu_{2m}], \\ \nu &= \text{diag}[\nu_1, \dots, \nu_m] \end{aligned} \quad (10)$$

Теорема 1. Suppose that the stationary set Λ of system (5) consists of isolated points, the pair (A, B) is controllable, the matrix A is Hurwitz, and there exist diagonal $m \times m$ matrices $\varepsilon > 0, \delta > 0, \tau \geq 0$, and \varkappa such that the following inequalities are valid:

$$\begin{aligned} \text{Re}(\varkappa K(ix) - K(ix)^* \varepsilon K(ix) - [K(ix) + \mu_1^{-1}ix]^* \tau [K(ix) + \mu_2^{-1}ix]) &\geq \delta, \forall x \in \mathbb{R} \\ 4\varepsilon\delta &> (\varkappa\nu)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Then system (5) is gradient-like.

Очевидно, что систему (1) можно привести к системе (5) положив:

$$\begin{aligned} A &= A \\ B &= b \\ C &= -K_{vco}C^* \\ R &= -K_{vco}h \\ f(\sigma) &= v_e(\sigma) - \frac{\omega_e^{free}}{K_{vco}H(0)} \end{aligned} \quad (12)$$

Положим далее:

$$\begin{aligned} v_e(\sigma) &= \sin(\sigma) \\ \frac{\omega_e^{free}}{K_{vco}H(0)} &= \gamma \end{aligned} \quad (13)$$

3 Теорема Декарта

Теорема 2. Если у полинома записанного в стандартной форме все коэффициенты действительные и все его корни также заведомо действительные, то число его положительных корней, если учитывать их кратности, равно числу перемен знаков в ряде его коэффициентов. Если же он имеет и комплексные корни, то это число равно или на четное число меньше числа знакоперемен.

4 Оценка области захвата для систем ФАПЧ с фильтром $\frac{1}{(1+\tau_{p1}x)(1+\tau_{p2}x)}$

Рассмотрим передаточную функцию:

$$K(x) = \frac{1}{(1 + \tau_{p1}x)(1 + \tau_{p2}x)} = \frac{1}{1 + (\tau_{p1} + \tau_{p2})x + \tau_{p1}\tau_{p2}x^2} \quad (14)$$

Введем обозначения: $a = \tau_{p1} + \tau_{p2}$, $b = \tau_{p1}\tau_{p2}$

Рассмотрим первое условие теоремы 1

$$\text{Re}(\varkappa K(ix) - K(ix)^* \varepsilon K(ix) - [K(ix) - ix]^* \tau [K(ix) + ix]) \geq \delta \quad (15)$$

Подставим (14) в условие теоремы 1 и перенесем все в левую часть неравенства. В результате преобразований первое условие теоремы 1 принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \tau b^2 t^3 + (\tau a^2 - 2\tau b - \delta b^2)t^2 + (-\varkappa b + \tau - \delta a^2 + 2\delta b)t + (\varkappa - \varepsilon - \tau - \delta) &\geq 0 \\ t &\geq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Из второго условия теоремы 1 получаем:

$$\frac{4\varepsilon\delta}{\varkappa^2} > \nu^2 \quad (17)$$

Для оценки полосы захвата системы (1) будем искать максимум ν .

4.1 Оценка максимума ν константой

Очевидно, что для того чтобы выполнялось (16) нужно потребовать $\varkappa - \varepsilon - \tau - \delta \geq 0$, тогда

$$\begin{aligned} \varkappa &\geq \varepsilon + \tau + \delta \\ \varkappa^2 &\geq \varepsilon^2 + \tau^2 + \delta^2 + 2\varepsilon\tau + 2\varepsilon\delta + 2\tau\delta \\ 2 - \left(\frac{2\varepsilon^2}{\varkappa^2} + \frac{2\delta^2}{\varkappa^2} + \frac{2\tau^2}{\varkappa^2} + \frac{4\varepsilon\tau}{\varkappa^2} + \frac{4\tau\delta}{\varkappa^2}\right) &\geq \frac{4\varepsilon\delta}{\varkappa^2} \\ 2 &> \frac{4\varepsilon\delta}{\varkappa^2} > \nu^2 \end{aligned} \quad (18)$$

4.2 Точная оценка максимума ν

2. Так как $\varkappa - \varepsilon - \tau - \delta \geq 0$, то $\varepsilon \leq \varkappa - \tau - \delta$. Для максимизации функции $\frac{4\varepsilon\delta}{\varkappa^2}$ возьмем $\varepsilon = \varkappa - \tau - \delta$

Тогда первое условие теоремы принимает вид:

$$\begin{aligned} \tau b^2 t^2 + (\tau a^2 - 2\tau b - \delta b^2)t + (-\varkappa b + \tau - \delta a^2 + 2\delta b) &\geq 0 \\ t &> 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} A &= \tau b^2 \\ B &= \tau a^2 - 2\tau b - \delta b^2 \\ C &= -\varkappa b + \tau - \delta a^2 + 2\delta b \end{aligned} \quad (20)$$

Заметим, что для того, чтобы выполнялось (19) необходимо потребовать $A \geq 0$ и $C \geq 0$, тогда $B \geq 0$. Тогда по теореме Декарта уравнение $At^2 + Bt + C = 0$ не имеет положительных корней, т.е. выполняется (19). Не умаляя общности, можем положить $\varkappa = 1$ и будем искать максимум следующей функции:

$$f(\delta) = 4\delta - 4\tau\delta - 4\delta^2 \quad (21)$$

Получили задачу на условный экстремум, т.е. найти максимум (21), при условии $C \geq 0$. Заметим, что максимальное значение достигается на границе или в точках понижения ранга. Вычислим градиент (21):

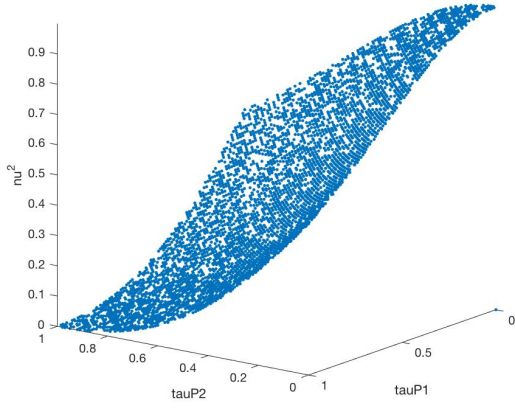
$$(4 - 4\tau - 8\delta, 4\delta) \quad (22)$$

Получаем точку понижения ранга: $\delta = 0, \tau = 1$. Это противоречит условию теоремы $\delta > 0$. Рассмотрим $C = 0$, выразим τ и подставим в (21):

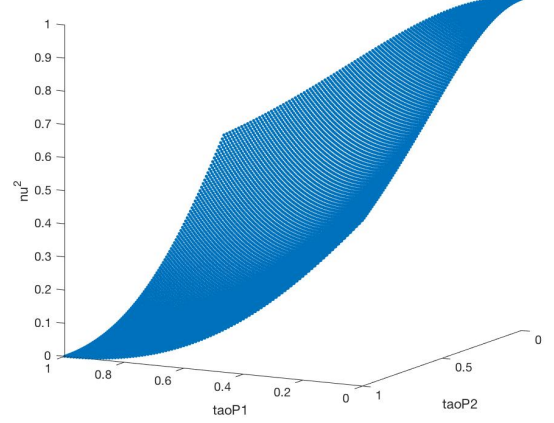
$$f(\delta) = 4\delta(1 - b) - 4\delta^2(a^2 - 2b + 1) \quad (23)$$

Максимум (23) достигается при $\delta = \frac{1-b}{2(a^2-2b+1)}$ и равен

$$\frac{(b-1)^2}{a^2-2b+1} = \frac{(\tau_{p1}\tau_{p2}-1)^2}{\tau_{p1}^2 + \tau_{p2}^2 + 1} > \nu^2 \quad (24)$$



(a) Численное приближение в MATLAB



(b) Вычисленный по (24)

Рис. 1: График зависимости ν^2 от τ_{p1}, τ_{p2}

5 Оценка области захвата для систем ФАПЧ с фильтром $\frac{(1+\tau_{z1}x)^2}{(1+\tau_{p1}x)^2}$

Рассмотрим передаточную функцию:

$$K(x) = \frac{(1 + \tau_{z1}x)^2}{(1 + \tau_{p1}x)^2} \quad (25)$$

Тогда первое условие теоремы принимает вид:

$$\begin{aligned} & \tau_{p1}^4 \tau t^3 + (-\tau_{z1}^4 \varepsilon - \tau_{z1}^4 \tau + 2\tau_{p1}^2 \tau - \tau_{p1}^4 \delta + \tau_{z1}^2 \tau_{p1}^2 \kappa) t^2 + \\ & + (\tau - \tau_{z1}^2 \kappa - 2\tau_{z1}^2 \varepsilon - \tau_{p1}^2 \kappa - 2\tau_{z1}^2 \tau + 4\tau_{z1} b \kappa - 2\tau_{p1}^2 \delta) t + (\kappa - \varepsilon - \tau - \delta) \geq 0 \\ & t = x^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

Заметим, что при $\tau_{z1} \neq \tau_{p1}$ функция $\chi(x) = p^{-1}K(x)$ не приводима. Тогда по теореме пара (A, B) управляема.

5.1 $\tau = 0$

Положим в (26) $\tau = 0$, тогда первое условие теоремы принимает следующий вид:

$$(\tau_{z1}^2 \tau_{p1}^2 \kappa - \tau_{z1}^4 \varepsilon - \tau_{p1}^4 \delta) t^2 + (4\tau_{z1} \tau_{p1} \kappa - \tau_{z1}^2 \kappa - 2\tau_{z1}^2 \varepsilon - \tau_{p1}^2 \kappa - 2\tau_{p1}^2 \delta) t + (\kappa - \varepsilon - \delta) \geq 0 \quad (27)$$

$$t = x^2 \geq 0$$

Обозначим:

$$\begin{aligned} A &= \tau_{z1}^2 \tau_{p1}^2 \kappa - \tau_{z1}^4 \varepsilon - \tau_{p1}^4 \delta \\ B &= 4\tau_{z1} \tau_{p1} \kappa - \tau_{z1}^2 \kappa - 2\tau_{z1}^2 \varepsilon - \tau_{p1}^2 \kappa - 2\tau_{p1}^2 \delta \\ C &= \kappa - \varepsilon - \delta \end{aligned} \quad (28)$$

Для того, что бы выполнялось (27) нужно потребовать: $A \geq 0$ и $C \geq 0$, тогда при $B \geq 0$, по теореме Декарта уравнение не имеет положительных корней, т.е. выполняется (27). Не умаляя общности можем считать $\varkappa = 1$. Получили задачу нахождения условного экстремума при условии:

$$\begin{aligned}\tau_{z1}^2 \tau_{p1}^2 - \tau_{z1}^4 \varepsilon - \tau_{p1}^4 \delta &\geq 0 \\ 4\tau_{z1} \tau_{p1} - \tau_{z1}^2 - 2\tau_{z1}^2 \varepsilon - \tau_{p1}^2 - 2\tau_{p1}^2 \delta &\geq 0 \\ 1 - \varepsilon - \delta &\geq 0\end{aligned}\tag{29}$$

Максимум может достигаться на границе, или в точках понижения ранга. Представим ε как $\varepsilon(\delta)$ и рассмотрим функцию $\varepsilon\delta$ на границе области (29)

$$\begin{aligned}\frac{\tau_{p1}^2}{\tau_{z1}^2} - \frac{\tau_{p1}^4}{\tau_{z1}^4} \delta &= \varepsilon \\ 2\frac{\tau_{p1}}{\tau_{z1}} - \frac{1}{2} - \frac{\tau_{p1}^2}{2\tau_{z1}^2} - \frac{\tau_{p1}^2}{\tau_{z1}^2} \delta &= \varepsilon \\ \varepsilon &= 1 - \delta\end{aligned}\tag{30}$$

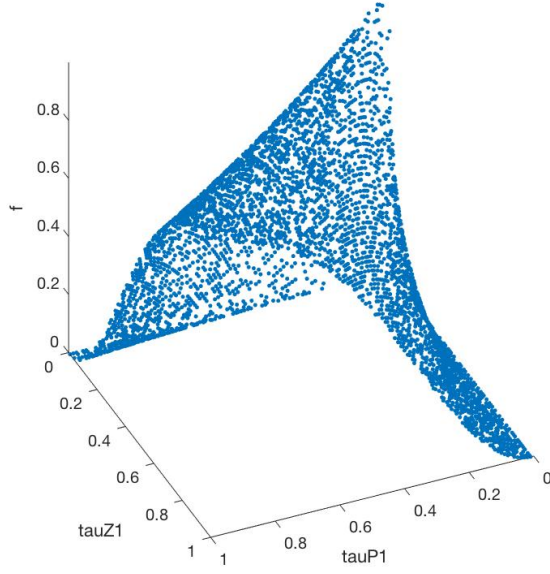
Для этого найдем пересечения прямых (30):

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{1}{1+z^2}, \varepsilon = \frac{z^2}{1+z^2} \\ \delta &= \frac{1-q}{1-z^2}, \varepsilon = \frac{q-z^2}{1-z^2} \\ \delta &= \frac{z^2-q}{z^4-z^2}, \varepsilon = z^2 - \frac{z^4(z^2-q)}{z^4-z^2} \\ z &= \frac{\tau_{p1}}{\tau_{z1}} \\ q &= 2z - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}z^2\end{aligned}\tag{31}$$

Оценки максимума на границе (30):

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{1}{2}, \varepsilon = \frac{1}{2}, \varepsilon\delta = \frac{1}{4} \\ \delta &= \frac{1}{2z^2}, \varepsilon = \frac{z^2}{2}, \varepsilon\delta = \frac{1}{4} \\ \delta &= \frac{q}{2z^2}, \varepsilon = \frac{q}{2}, \varepsilon\delta = \frac{q^2}{4z^2}\end{aligned}\tag{32}$$

Максимум функции $\nu^2 = \frac{4\varepsilon\delta}{\varkappa^2}$ представлен на графике.

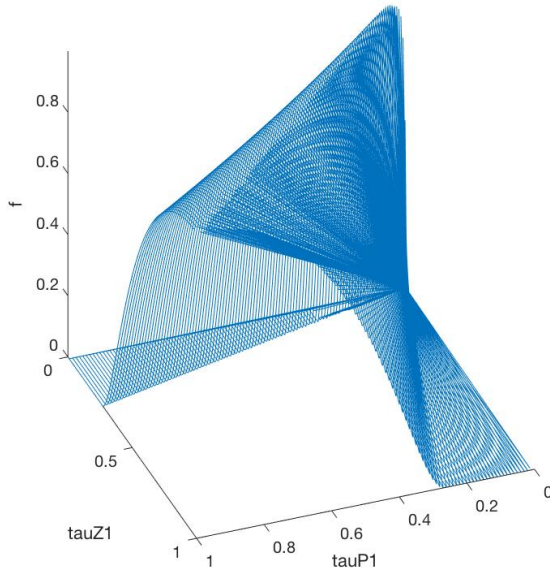


При $B < 0$ по теореме Декарта уравнение может иметь 2 корня. В этой ситуации потребуем отрицательность дискриминанта:

$$\begin{aligned}
 & -4\tau_{z1}^4\varepsilon\delta + 8\tau_{z1}^4\varepsilon + \tau_{z1}^4 - 16\tau_{z1}^3\tau_{p1}\varepsilon - 8\tau_{z1}^3\tau_{p1} + 8\tau_{z1}^2\tau_{p1}^2\varepsilon\delta + 8\tau_{z1}^2\tau_{p1}^2\varepsilon + 8\tau_{z1}^2\tau_{p1}^2\delta + \\
 & + 14\tau_{z1}^2\tau_{p1}^2 - 16\tau_{z1}\tau_{p1}^3\delta - 8\tau_{z1}\tau_{p1}^3 - 4\tau_{p1}^4\varepsilon\delta + 8\tau_{p1}^4\delta + \tau_{p1}^4 \leq 0
 \end{aligned} \tag{33}$$

$$a\varepsilon + b\delta \geq \varepsilon\delta \tag{34}$$

Если $a > 0, c > 0$, тогда при $b < 0$, уравнение может иметь 2 положительных корня. Дополнительно потребуем, что бы дискриминант уравнения $at^2 + bt + c = 0$ был не положительным. В этом случае получаем нелинейную оптимизационную задачу с нелинейными ограничениями, максимум функции $\nu^2 = \frac{4\varepsilon\delta}{\varkappa^2}$ представлен на графике.



5.2 $\tau > 0$

Предположим в (26) $\tau > 0$ и разделим на $\tau_{p1}^4 \tau$. Не умаляя общности, можем считать $\tau = 1$, тогда (26) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} t^3 + at^2 + bt + c &\geq 0 \\ A &= \frac{1}{\tau_{p1}^4} (-\tau_{z1}^4 \varepsilon - \tau_{z1}^4 + 2\tau_{p1}^2 - \tau_{p1}^4 \delta + \tau_{z1}^2 \tau_{p1}^2 \varkappa) \\ B &= \frac{1}{\tau_{p1}^4} (1 - \tau_{z1}^2 \varkappa - 2\tau_{z1}^2 \varepsilon - \tau_{p1}^2 \varkappa - 2\tau_{z1}^2 + 4\tau_{z1} \tau_{p1} \varkappa - 2\tau_{p1}^2 \delta) \\ C &= \frac{1}{\tau_{p1}^4} (\varkappa - \varepsilon - 1 - \delta) \\ t &= x^2 \geq 0 \end{aligned} \tag{35}$$

Заметим, что по теореме Декарта: $a \geq 0, b \geq 0, c \geq 0$

6 Оценка области захвата для систем ФАПЧ с фильтром $\frac{(1+\tau_{z1}x)(1+\tau_{z2}x)}{(1+\tau_{p1}x)(1+\tau_{p2}x)}$

Рассмотрим передаточную функцию:

$$K(x) = \frac{(1 + \tau_{z1}x)(1 + \tau_{z2}x)}{(1 + \tau_{p1}x)(1 + \tau_{p2}x)} \tag{36}$$

Подставим (36) в условие теоремы 1 и перенесем все в левую часть неравенства. В результате преобразований первое условие теоремы 1 принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} (-\varepsilon \alpha_2^2 \beta_2^2 + \varkappa \alpha_2^2 \beta_2 - \delta \alpha_2^2) t^2 + (-\varepsilon \alpha_1^2 \beta_1^2 + \varkappa \alpha_1^2 \beta_1 - \delta \alpha_1^2 - \alpha_2 \varkappa + 2\alpha_2 \delta - \alpha_2 \beta_2 \varkappa + 2\alpha_2 \beta_2 \varepsilon) t + \\ + \varkappa - \varepsilon - \delta \geq 0 \end{aligned} \tag{37}$$

Не умаляя общности можем считать $\varkappa = 1$:

$$\begin{aligned} (-\varepsilon \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_2^2 \beta_2 - \delta \alpha_2^2) t^2 + (-\varepsilon \alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_1^2 \beta_1 - \delta \alpha_1^2 - \alpha_2 + 2\alpha_2 \delta - \alpha_2 \beta_2 + 2\alpha_2 \beta_2 \varepsilon) t + \\ + 1 - \varepsilon - \delta \geq 0 \end{aligned} \tag{38}$$

Заметим, что $\varepsilon \leq 1 - \delta$. Для максимизации $\varepsilon \delta$ положим $\varepsilon = 1 - \delta$.

$$(\alpha_2^2 \beta_2 - \alpha_2^2 \delta - \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_2^2 \beta_2^2 \delta) t + \alpha_2 \beta_2 - \alpha_2 + 2\alpha_2 \delta + \alpha_1^2 \beta_1 - \alpha_1^2 \delta - \alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_1^2 \beta_1^2 \delta - 2\alpha_2 \beta_2 \delta \geq 0 \tag{39}$$

Нужно потребовать что бы выполнялось следующее условие

$$\alpha_2 \beta_2 - \alpha_2 + 2\alpha_2 \delta + \alpha_1^2 \beta_1 - \alpha_1^2 \delta - \alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_1^2 \beta_1^2 \delta - 2\alpha_2 \beta_2 \delta \geq 0 \tag{40}$$

Тогда

$$\begin{aligned} \alpha_2 \beta_2 - \alpha_2 + 2\alpha_2 \delta + \alpha_1^2 (\beta_1 - \delta - \beta_1^2 + \beta_1^2 \delta) - 2\alpha_2 \beta_2 \delta \geq 0 \\ \alpha_1^2 \geq \frac{\alpha_2 (1 - \beta_2) - 2\alpha_2 \delta (1 - \beta_2)}{\beta_1 (1 - \beta_1) - \delta + \beta_1^2 \delta} > \frac{\alpha_2 (1 - \beta_2)}{\beta_1 (1 - \beta_1) - \delta + \beta_1^2 \delta} \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} \frac{\alpha_2 (1 - \beta_2)}{\beta_1 (1 - \beta_1)} \end{aligned} \tag{41}$$

Получили

$$\alpha_1^2 > \frac{\alpha_2 (1 - \beta_2)}{\beta_1 (1 - \beta_1)} \tag{42}$$

Так как максимальное значение достигается на границе положим

$$\alpha_2 \beta_2 - \alpha_2 + 2\alpha_2 \delta + \alpha_1^2 \beta_1 - \alpha_1^2 \delta - \alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_1^2 \beta_1^2 \delta - 2\alpha_2 \beta_2 \delta = 0 \tag{43}$$

Тогда

$$\delta = \frac{\alpha_1^2(1 - \beta_1)\beta_1 - \alpha_2(1 - \beta_2)}{\alpha_1^2(1 - \beta_1^2) - 2\alpha_2(1 - \beta_2)} \quad (44)$$

Получили, что

$$\nu^2 < 4 \frac{[\alpha_1^2(1 - \beta_1) - \alpha_2(1 - \beta_2)][\alpha_1^2(1 - \beta_1)\beta_1 - \alpha_2(1 - \beta_2)]}{[\alpha_1^2(1 - \beta_1^2) - 2\alpha_2(1 - \beta_2)]^2} \quad (45)$$