

КОМБИНИРОВАННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАВАЮЩЕЙ ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ

Андрейченко Д.К., СГУ, профессор каф. МОВКИС

Андрейченко К.П., СГТУ, профессор каф. ПМиСА

Портенко М.С, СГУ, ст. преподаватель каф. ИиП

Саратов 2018

Ранее полученные результаты:

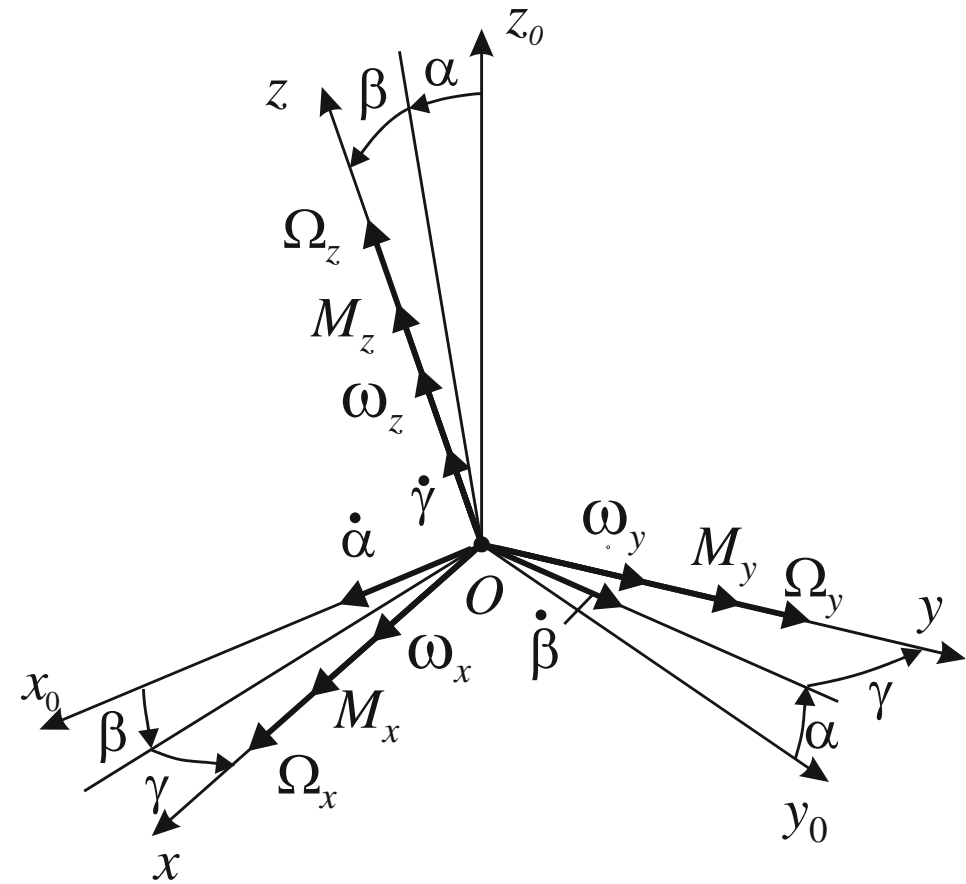
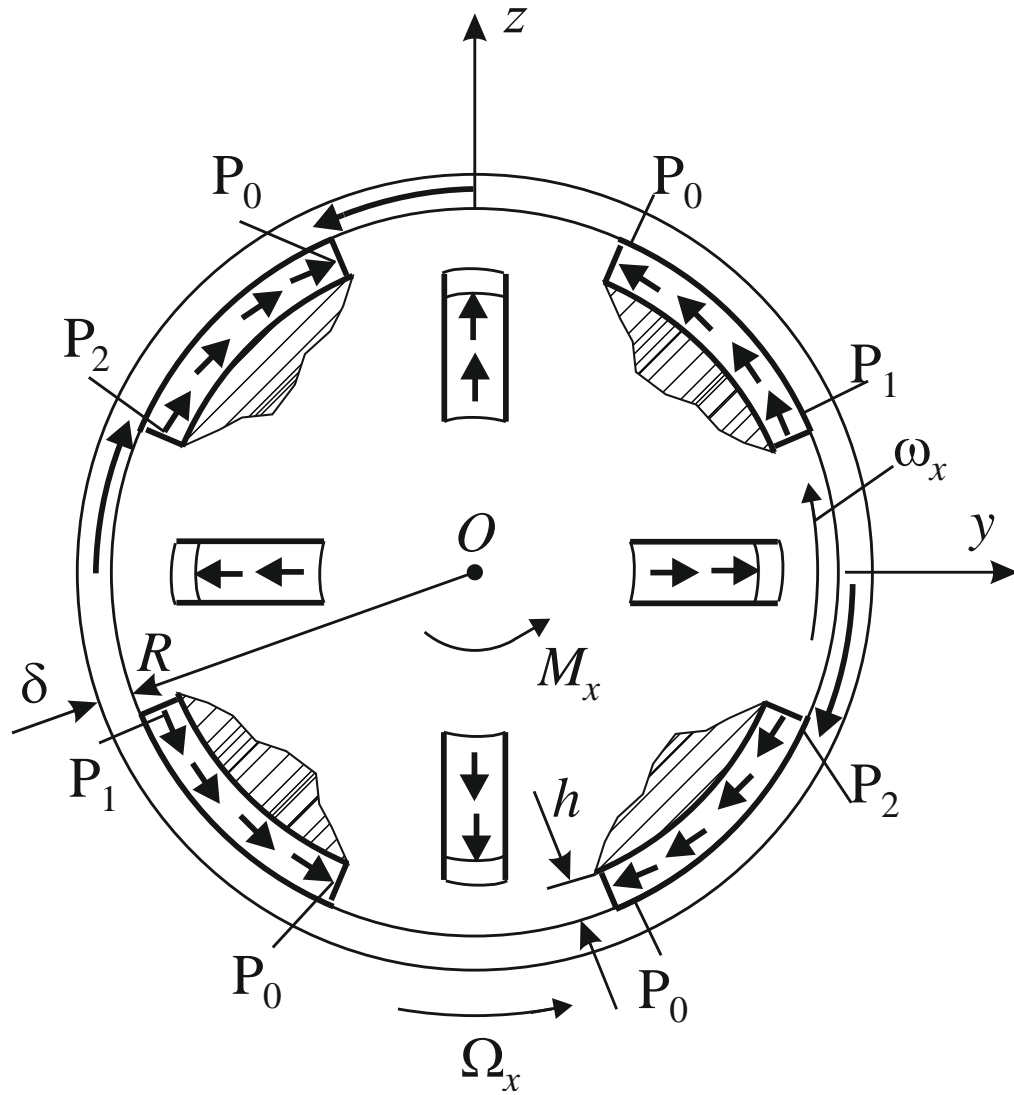
На основе упрощенной математической модели был выполнен параметрический синтез плавающей гиросtabilизированной платформы со сферической камерой.

Показано, что максимальная угловая ошибка не превышает величин порядка 1 угловой секунды (при требуемых значениях порядка 2 угловых секунд), что существенно для проектирования навигационных систем.

Цель работы:

Оценка влияния перетекания жидкости между рабочими каналами на передаточные функции поддерживающего слоя и системы в целом

Расчетная схема



Упрощенная модель системы стабилизации

$$(I\lambda^2 + (\Pi_\omega(\lambda) + \Pi_L(\lambda)\Phi_u(\lambda)\Phi_k(\lambda)\Phi_1(\lambda))\lambda) \begin{bmatrix} \alpha(\lambda) \\ \beta(\lambda) \\ \gamma(\lambda) \end{bmatrix} = \Pi_\Omega(\lambda) \begin{bmatrix} \Omega_x(\lambda) \\ \Omega_y(\lambda) \\ \Omega_z(\lambda) \end{bmatrix} + \mathcal{L} \begin{bmatrix} L_s \text{sign}(\Omega_x(t)) \\ L_s \text{sign}(\Omega_y(t)) \\ L_s \text{sign}(\Omega_z(t)) \end{bmatrix}$$

где λ – параметр интегрального преобразования Лапласа; I – момент инерции относительно главных центральных осей; $\Pi_\omega(\lambda)$ – передаточная функция момента касательных гидродинамических напряжений на сферической платформе; $\Pi_\Omega(\lambda)$ – передаточная функция возмущающих гидродинамических моментов;

L_s – момент сил трения токопроводов платформы, скользящих по стенкам камеры.

Передаточные функции платформы

$$\begin{bmatrix} \alpha(\lambda) \\ \beta(\lambda) \\ \gamma(\lambda) \end{bmatrix} = \Phi_{\Omega}(\lambda) \begin{bmatrix} \Omega_x(\lambda) \\ \Omega_y(\lambda) \\ \Omega_z(\lambda) \end{bmatrix} + \Phi_S(\lambda) L \begin{bmatrix} L_s \text{sign}(\Omega_x(t)) \\ L_s \text{sign}(\Omega_y(t)) \\ L_s \text{sign}(\Omega_z(t)) \end{bmatrix},$$

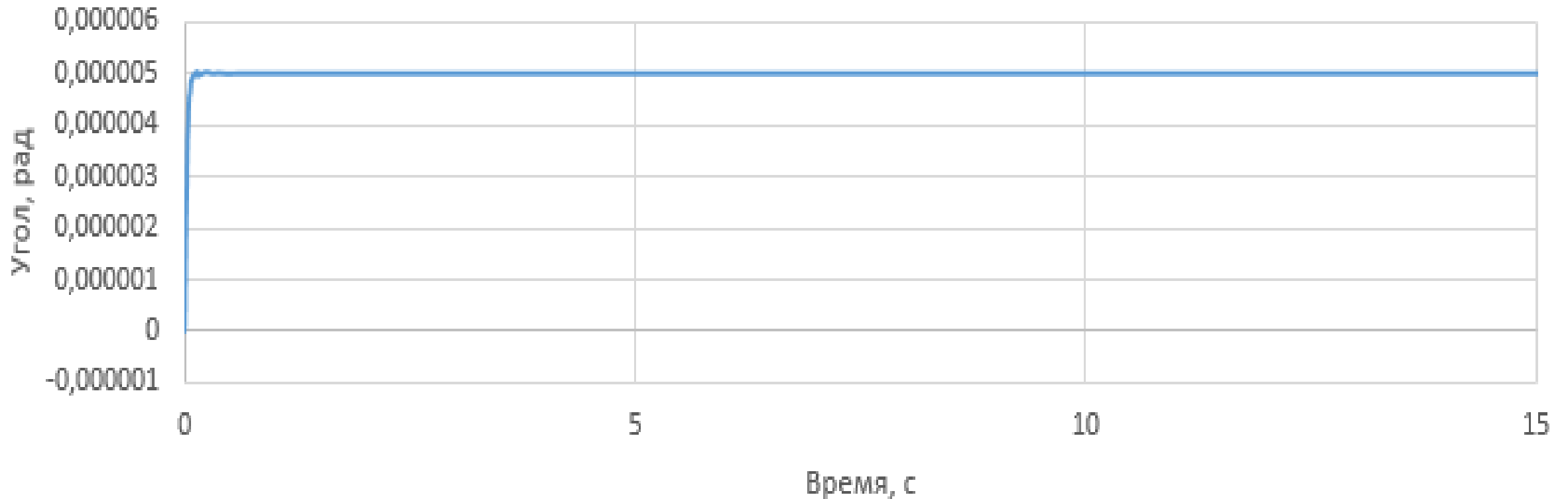
$$\Phi_{\Omega}(\lambda) = \frac{Q_{\Omega}(\lambda)}{D(\lambda)}, \quad \Phi_S(\lambda) = \frac{Q(\lambda)}{Q(\lambda)}, \quad Q_{\Omega}(\lambda) = \Pi_{\Omega}(\lambda) Q(\lambda),$$

$$D(\lambda) = (I\lambda^2 + \lambda\Pi_{\omega}(\lambda))(T_u\lambda + 1)(T\lambda + 1)(\tau_2\lambda + 1) + k_u k \Pi_4(\lambda)(\tau_1\lambda + 1)$$

$$Q(\lambda) = (T_u\lambda + 1)(\tau_2\lambda + 1)(T\lambda + 1)$$

Переходные функции после адаптивного параметрического синтеза

Переходные функции



Уточненная математическая модель поддерживающего слоя жидкости

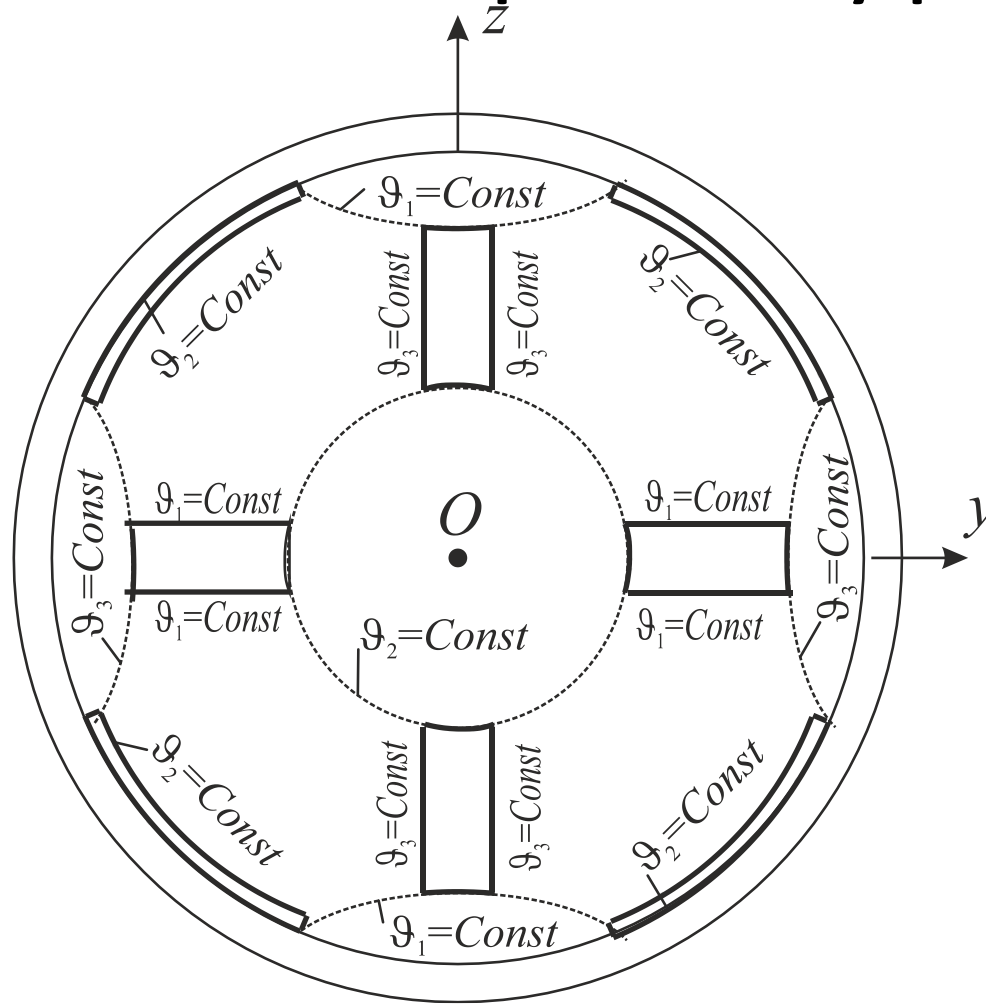
Кинематические уравнения

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = A(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A^T(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} u_{x0} \\ u_{y0} \\ u_{z0} \end{bmatrix} = A(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = A^T(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} u_{x0} \\ u_{y0} \\ u_{z0} \end{bmatrix}$$

$$A(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

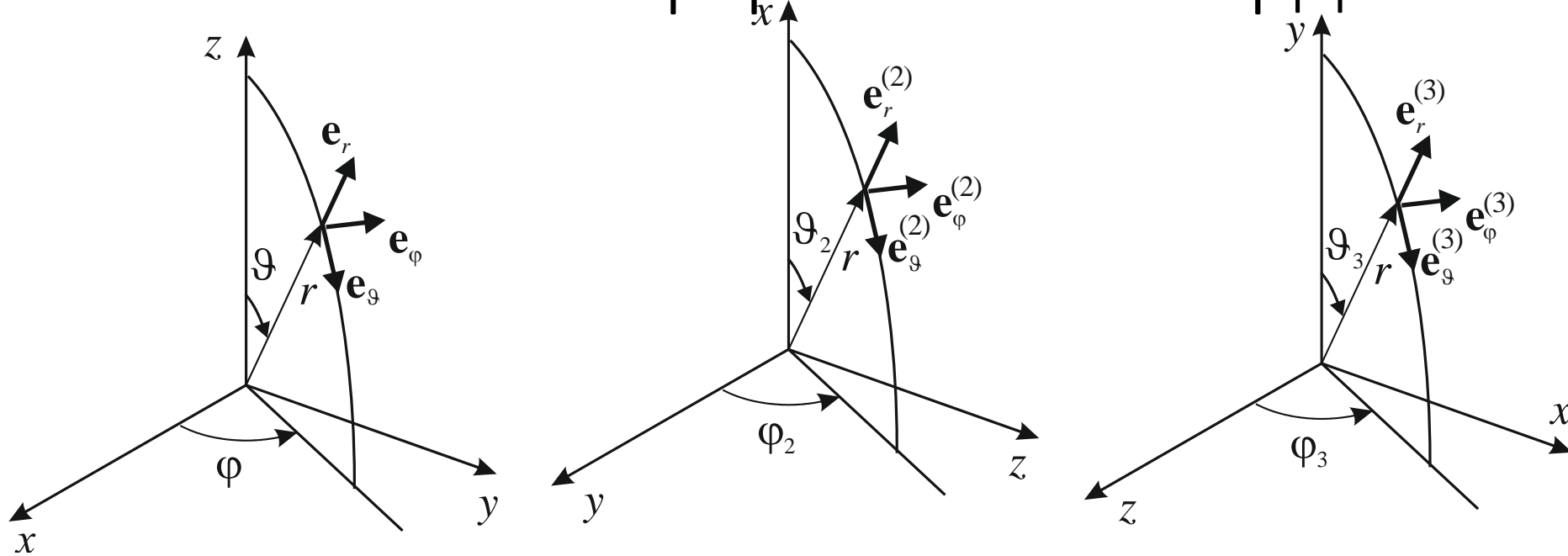
$$\omega_x = \dot{\alpha} \cos \gamma \cos \beta + \dot{\beta} \sin \gamma; \quad \omega_y = -\dot{\alpha} \sin \gamma \cos \beta + \dot{\beta} \cos \gamma; \quad \omega_z = \dot{\alpha} \sin \beta + \dot{\gamma}$$

Границы рабочих каналов на поверхности внутренней сферы



$$\vartheta_j = \text{Const}, j = 1, 2, 3, R \leq r \leq R + \delta \quad (1) \quad \vartheta_j = \text{Const}, j = 1, 2, 3, R - h \leq r \leq R \quad (2)$$

Вспомогательные сферические координаты



$$\sin \vartheta = (1 - \sin^2 \vartheta_2 \sin^2 \varphi_2)^{1/2}, \quad \sin \varphi = \sin \vartheta_2 \cos \varphi_2 (1 - \sin^2 \vartheta_2 \sin^2 \varphi_2)^{-1/2}$$

$$\cos \varphi = \cos \vartheta_2 (1 - \sin^2 \vartheta_2 \sin^2 \varphi_2)^{-1/2}, \quad \varphi = \arcsin[\sin \vartheta_2 \cos \varphi_2 (1 - \sin^2 \vartheta_2 \sin^2 \varphi_2)^{-1/2}]$$

$$\cos \vartheta = \sin \vartheta_3 \cos \varphi_3; \sin \varphi = (1 - \sin^2 \vartheta_3 \cos^2 \varphi_3)^{1/2};$$

$$\sin \varphi = \cos \vartheta_3 (1 - \sin^2 \vartheta_3 \cos^2 \varphi_3)^{-1/2};$$

$$\cos \varphi = \sin \vartheta_3 \sin \varphi_3 (1 - \sin^2 \vartheta_3 \cos^2 \varphi_3);$$

$$\begin{aligned}
\vec{r} &= (x, y, z)^T = r \cdot (\sin \vartheta \cos \varphi, \sin \vartheta \sin \varphi, \cos \vartheta)^T = \\
&= r \cdot (\cos \vartheta_2, \sin \vartheta_2 \cos \varphi_2, \sin \vartheta_2 \sin \varphi_2)^T = r \cdot (\cos \vartheta_2, \sin \vartheta_2 \cos \varphi_2, \sin \vartheta_2 \sin \varphi_2)^T; \\
\vec{e}_r &= (\sin \vartheta \cos \varphi, \sin \vartheta \sin \varphi, \cos \vartheta)^T; \\
\vec{e}_\vartheta &= (\cos \vartheta \cos \varphi, \cos \vartheta \sin \varphi, -\sin \vartheta)^T; \quad \vec{e}_\varphi = (-\sin \varphi, \cos \varphi, 0)^T \\
\vec{e}_\vartheta^{(2)} &= (-\sin \vartheta_2, \cos \vartheta_2 \cos \varphi_2, \cos \vartheta_2 \sin \varphi_2)^T; \\
\vec{e}_\vartheta^{(3)} &= (\cos \vartheta_3 \sin \varphi_3, -\sin \vartheta_3, \cos \vartheta_3 \cos \varphi_3)^T
\end{aligned}$$

Динамика слоя вязкой несжимаемой жидкости

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{2v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \vartheta} + \frac{1}{r \sin \vartheta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_\vartheta \operatorname{ctg} \vartheta}{r} = 0 \quad (\vartheta, \varphi) \rightarrow (\vartheta_j, \varphi_j), j = 2, 3$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\vartheta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \vartheta} + \frac{v_\varphi}{r \sin \vartheta} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\vartheta^2 + v_\varphi^2}{r} = F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} +$$

$$+\nu(\Delta v_r - \frac{2v_r}{r} - \frac{2v_\vartheta}{r^2} \operatorname{ctg} \vartheta - \frac{2}{r^2 \sin \vartheta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \vartheta});$$

$$\frac{\partial v_\vartheta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\vartheta}{\partial r} + \frac{v_\vartheta}{r} \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \vartheta} + \frac{v_\varphi}{r \sin \vartheta} \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \varphi} + \frac{v_r v_\vartheta}{r} - \frac{v_\varphi^2 \operatorname{ctg} \vartheta}{r} = F_\vartheta - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \vartheta} +$$

$$+\nu(\Delta v_\vartheta - \frac{v_\vartheta}{r^2 \sin^2 \vartheta} - \frac{2 \cos \vartheta}{r^2 \sin^2 \vartheta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \vartheta});$$

$$\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\vartheta}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \vartheta} + \frac{v_\varphi}{r \sin \vartheta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_r v_\varphi}{r} - \frac{v_\vartheta v_\varphi \operatorname{ctg} \vartheta}{r} =$$

$$= F_\varphi - \frac{1}{\rho r \sin \vartheta} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \nu(\Delta v_\varphi - \frac{v_\varphi}{r^2 \sin^2 \vartheta} + \frac{2 \cos \vartheta}{r^2 \sin^2 \vartheta} \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \vartheta} + \frac{2}{r^2 \sin \vartheta} \frac{\partial v_r}{\partial r})$$

$$F_r = -\omega_\vartheta v_\varphi + \omega_\varphi v_\vartheta; \quad F_\vartheta = +\omega_r v_\varphi - \omega_\varphi v_r$$

$$F_\varphi = -\omega_r v_\vartheta + \omega_\vartheta v_r$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \vartheta^2} + \frac{\operatorname{ctg} \vartheta}{r^2} \frac{\partial}{\partial \vartheta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}$$

На поверхности внешней сферы

$$v_r \Big|_{s_{\text{внешн}}} = 0; \quad v_\vartheta \Big|_{s_{\text{внешн}}} = (R + \delta) \vec{\Omega} \cdot \vec{e}_\varphi; \quad v_\varphi \Big|_{s_{\text{внешн}}} = (R + \delta) \vec{\Omega} \cdot \vec{e}_\vartheta$$

$$\vec{\Omega} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)^T = A^T(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} \Omega_{x0} \\ \Omega_{y0} \\ \Omega_{z0} \end{bmatrix}$$

на границе внутреннего тела (включая «длинные» поверхности 2)

$$v_r|_{s_{\text{внутр}}} = 0; \quad v_{\vartheta}|_{s_{\text{внутр}}} = r|_{s_{\text{внутр}}} \vec{\omega} \cdot \vec{e}_{\varphi}; \quad v_{\varphi}|_{s_{\text{внутр}}} = r|_{s_{\text{внутр}}} \vec{\omega} \cdot \vec{e}_{\vartheta}$$

вне рабочего канала $r|_{s_{\text{внутр}}} = R$

на «дне» рабочего канала $r|_{s_{\text{внутр}}} = R - h$

На ортогональных к сферич. поверхности стенках рабочего канала

$$R - h \leq r|_{s_{\text{внутр}}} \leq R$$

Для постановки граничных условий на поверхностях (1) или (2) требуются выражения для внутренних напряжений в жидкости

$$p_{\vartheta r} = -p + 2\nu\rho \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad p_{\vartheta\vartheta} = -p + 2\rho\nu \left(\frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \vartheta} \right);$$

$$p_{\varphi\varphi} = -p + 2\rho\nu \left(\frac{v_r}{r} + \frac{1}{r \sin \vartheta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_\vartheta \operatorname{ctg} \vartheta}{r} \right);$$

$$p_{r\vartheta} = -\rho\nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \vartheta} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\vartheta}{\partial r} - \frac{v_\vartheta}{r} \right); \quad p_{r\varphi} = \rho\nu \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \vartheta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi}{r} \right);$$

$$p_{\vartheta\varphi} = \rho\nu \left(\frac{1}{r \sin \vartheta} \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \vartheta} - \frac{v_\vartheta \operatorname{ctg} \vartheta}{r} \right)$$

Поверхность (1) при $j=1$

$$v_r|_I = v_r|_{II}, \quad v_\vartheta|_I = v_\vartheta|_{II}, \quad v_\varphi|_I = v_\varphi|_{II}$$

$$p_{r\vartheta}|_I = p_{r\vartheta}|_{II}, \quad p_{\vartheta\vartheta}|_I = p_{\vartheta\vartheta}|_{II}, \quad p_{\vartheta\varphi}|_I = p_{\vartheta\varphi}|_{II}$$

Поверхность (1) при $j=2$

$$v_r|_I = v_r|_{II}, \quad v_{\vartheta}|_I = v_{\vartheta}|_{II}, \quad v_{\varphi}|_I = v_{\varphi}|_{II}$$
$$p_r^{(2)}|_I = p_r^{(2)}|_{II}, \quad p_{\vartheta}^{(2)}|_I = p_{\vartheta}^{(2)}|_{II}, \quad p_{\varphi}^{(2)}|_I = p_{\varphi}^{(2)}|_{II}$$

$$\vec{p}_r^{(2)} = p_{r\vartheta}(\vec{e}_{\vartheta}^{(2)} \cdot \vec{e}_{\vartheta}) + p_{r\varphi}(\vec{e}_{\vartheta}^{(2)} \cdot \vec{e}_{\varphi});$$

$$p_{\vartheta}^{(2)} = p_{\vartheta\vartheta}(\vec{e}_{\vartheta}^{(2)} \cdot \vec{e}_{\vartheta}) + p_{\vartheta\varphi}(\vec{e}_{\vartheta}^{(2)} \cdot \vec{e}_{\varphi});$$

$$p_{\varphi}^{(2)} = p_{\vartheta\varphi}(\vec{e}_{\vartheta}^{(2)} \cdot \vec{e}_{\vartheta}) + p_{\varphi\varphi}(\vec{e}_{\vartheta}^{(2)} \cdot \vec{e}_{\varphi})$$

Поверхность (1) при $j=3$

$$v_r|_I = v_r|_{II}, \quad v_{\vartheta}|_I = v_{\vartheta}|_{II}, \quad v_{\varphi}|_I = v_{\varphi}|_{II}$$
$$p_r^{(3)}|_I = p_r^{(3)}|_{II}, \quad p_{\vartheta}^{(3)}|_I = p_{\vartheta}^{(3)}|_{II}, \quad p_{\varphi}^{(3)}|_I = p_{\varphi}^{(3)}|_{II}$$

$$\vec{p}_r^{(3)} = p_{r\vartheta}(\vec{e}_{\vartheta}^{(3)} \vec{e}_{\vartheta}) + p_{r\varphi}(\vec{e}_{\vartheta}^{(3)} \vec{e}_{\varphi});$$

$$p_{\vartheta}^{(3)} = p_{\vartheta\vartheta}(\vec{e}_{\vartheta}^{(3)} \vec{e}_{\vartheta}) + p_{\vartheta\varphi}(\vec{e}_{\vartheta}^{(3)} \vec{e}_{\varphi});$$

$$p_{\varphi}^{(3)} = p_{\vartheta\varphi}(\vec{e}_{\vartheta}^{(3)} \vec{e}_{\vartheta}) + p_{\varphi\varphi}(\vec{e}_{\vartheta}^{(3)} \vec{e}_{\varphi})$$

«Короткие» поверхности (2)

$$p_{\varphi_j \varphi_j} = p_{r\vartheta_j} = 0; \quad \varphi_j = \pm \frac{3}{8} \pi, \pm \frac{6}{8} \pi, \quad R - h \leq r \leq R, \quad \frac{1}{2} \pi - \vartheta_b \leq \vartheta_j \leq \frac{1}{2} \pi + \vartheta_b$$

$$p_{\varphi_j \varphi_j} = -P_1^{(j)}, \quad p_{r\varphi_j} = p_{r\vartheta_j} = 0; \quad \varphi_j = \frac{1}{8} \pi, -\frac{7}{8} \pi; \quad R - h \leq r \leq R, \quad \frac{1}{2} \pi - \vartheta_b \leq \vartheta_j \leq \frac{1}{2} \pi + \vartheta_b$$

$$p_{\varphi_j \varphi_j} = -P_2^{(j)}, \quad p_{r\varphi_j} = p_{r\vartheta_j} = 0; \quad \varphi_j = \frac{7}{8} \pi, -\frac{1}{8} \pi;$$

$$R - h \leq r \leq R, \quad \frac{1}{2} \pi - \vartheta_b \leq \vartheta_j \leq \frac{1}{2} \pi + \vartheta_b, \quad j = 1, 2, 3$$

- После приведения к безразмерным переменным и параметрам выполнялось упрощение уравнения несжимаемости и переход к «укороченным» уравнениям Навье-Стокса для поддерживающего слоя, связанный с малостью безразмерного параметра $\psi = \delta / R \approx 10^{-3}$
- Для расчета течения в равновесном состоянии решалась нелинейная краевая задача для уравнения несжимаемости и «укороченных» уравнений Навье-Стокса, которая следует из упрощенных уравнений при $\dot{() = \partial() / \partial t = 0$
- Выполнялось преобразование Лапласа по времени $\tilde{f}(\lambda) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-\lambda t} dt$ линеаризованных уравнений возмущенного движения
- Далее они сводились к уравнениям, связывающим изображения Лапласа входных и выходных функций, и к линейным краевым задачам для расчета передаточных функций поддерживающего слоя

Моделирование установившегося течения жидкости

$$\frac{\partial v_r}{\partial \xi} + \frac{\partial v_\theta}{\partial \vartheta} + \frac{1}{\sin \vartheta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_\theta \operatorname{ctg} \vartheta = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial \xi} = 0, \quad v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial \xi} + v_\theta \frac{\partial v_\theta}{\partial \vartheta} + \frac{v_\varphi}{\sin \vartheta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \varphi} - v_\varphi^2 \operatorname{ctg} \vartheta = -\frac{\partial p}{\partial \vartheta} + \frac{1}{\sigma} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \xi^2},$$

$$v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial \xi} + v_\theta \frac{\partial v_\varphi}{\partial \vartheta} + \frac{v_\varphi}{\sin \vartheta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_\theta v_\varphi \operatorname{ctg} \vartheta = -\frac{1}{\sin \vartheta} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \frac{1}{\sigma} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \xi^2}$$

$$\xi = 0, \quad (\vartheta_j, \varphi_j) \in ([0, \frac{1}{2} \pi] \times [0, \frac{1}{2} \pi]) \setminus ([\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi] \times [\frac{1}{8} \pi, \frac{3}{8} \pi]): \quad v_r = 0, \quad v_{\theta_j} = 0, \quad v_{\varphi_j} = 0, \quad j = 1, 2, 3,$$

$$\vartheta_j = \frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \quad (\xi, \varphi_j) \in [-h, 0] \times [\frac{1}{8} \pi, \frac{3}{8} \pi]: \quad v_{\theta_j} = 0, \quad j = 1, 2, 3,$$

$$\xi = -h, \quad (\vartheta_j, \varphi_j) \in [\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi] \times [\frac{1}{8} \pi, \frac{3}{8} \pi]: \quad v_r = 0, \quad v_{\theta_j} = 0, \quad v_{\varphi_j} = 0, \quad j = 1, 2, 3,$$

$$\xi = 0, \quad (\vartheta_j, \varphi_j) \in [\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi] \times [\frac{1}{8} \pi, \frac{3}{8} \pi]: \quad v_r|_I = v_r|_{II}, \quad v_{\theta_j}|_I = v_{\theta_j}|_{II},$$

$$v_{\varphi_j}|_I = v_{\varphi_j}|_{II}, \quad p|_I = p|_{II}, \quad \frac{\partial v_{\theta_j}}{\partial \xi}|_I = \frac{\partial v_{\theta_j}}{\partial \xi}|_{II}, \quad \frac{\partial v_{\varphi_j}}{\partial \xi}|_I = \frac{\partial v_{\varphi_j}}{\partial \xi}|_{II}, \quad j = 1, 2, 3,$$

$$\vartheta = \frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \quad (\xi, \varphi) \in [0, 1] \times [\frac{1}{8} \pi, \frac{3}{8} \pi]: \quad v_\theta|_I = v_\theta|_{II}, \quad p|_I = p|_{II},$$

$$\vartheta_j = \frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \quad (\xi, \varphi_j) \in [0, 1] \times [\frac{1}{8} \pi, \frac{3}{8} \pi]: \quad v_{\theta_j}|_I = v_{\theta_j}|_{II} (\mathbf{e}_\theta \cdot \mathbf{e}_{\theta_j}) + v_\varphi|_{II} (\mathbf{e}_\varphi \cdot \mathbf{e}_{\theta_j}), \quad p|_I = p|_{II}, \quad j = 2, 3,$$

Моделирование установившегося течения жидкости

$$\varphi_j = \frac{1}{8}\pi, \frac{3}{8}\pi, (\xi, \vartheta_j) \in [0, 1] \times \left[\frac{1}{2}\pi - \vartheta_b, \frac{1}{2}\pi\right]:$$

$$v_{\varphi_j}|_{I_3} = v_{\vartheta_b}|_{II} (\mathbf{e}_{\vartheta_b} \cdot \mathbf{e}_{\varphi_j}) + v_{\varphi_b}|_{II} (\mathbf{e}_{\varphi_b} \cdot \mathbf{e}_{\varphi_j}), \quad p|_I = p|_{II}, \quad j = 1, 2, 3, \quad k \neq j$$

$$\varphi_j = \frac{1}{8}\pi, (\xi, \vartheta_j) \in [-h, 0] \times \left[\frac{1}{2}\pi - \vartheta_b, \frac{1}{2}\pi\right]: \quad p = 0, \quad j = 1, 2,$$

$$\varphi_3 = \frac{1}{8}\pi, (\xi, \vartheta_3) \in [-h, 0] \times \left[\frac{1}{2}\pi - \vartheta_b, \frac{1}{2}\pi\right]: \quad p = 0,$$

$$\varphi_j = \frac{1}{8}\pi, (\xi, \vartheta_j) \in [-h, 0] \times \left[\frac{1}{2}\pi - \vartheta_b, \frac{1}{2}\pi\right]: \quad p = P, \quad \partial v_{\varphi_j} / \partial \xi = 0, \quad j = 1, 2,$$

$$\varphi_3 = \frac{3}{8}\pi, (\xi, \vartheta_3) \in [-h, 0] \times \left[\frac{1}{2}\pi - \vartheta_b, \frac{1}{2}\pi\right]: \quad p = P, \quad \partial v_{\varphi_3} / \partial \xi = 0,$$

$$1 - k_e^2 P = Q_0^2, \quad Q_0 = 2 \int_{-h}^0 d\xi \int_{\pi/2 - \vartheta_b}^{\pi/2} d\vartheta_j v_{\varphi_j} = -2 \int_{-h}^0 d\xi \int_{\pi/2 - \vartheta_b}^{\pi/2} d\vartheta_3 v_{\varphi_3}, \quad j = 1, 2,$$

$$\varphi_j = \frac{3}{8}\pi, \quad j = 1, 2, 3,$$

$$\vartheta_j = \frac{1}{2}\pi, (\xi, \varphi_j) \in [-h, 1] \times \left[\frac{1}{8}\pi, \frac{3}{8}\pi\right]: \quad v_{\vartheta_j} = 0, \quad j = 1, 2, 3,$$

$$\varphi_j = 0, \frac{1}{2}\pi, (\xi, \vartheta_j) \in [0, 1] \times \left[0, \frac{1}{8}\pi\right]: \quad v_{\varphi_j} = 0, \quad j = 1, 2, 3$$

Связь входных и выходных функций с учетом перетекания жидкости

$$\left(\lambda^2 - \varepsilon \lambda M_{\omega}(\lambda) - \frac{k}{T_u \lambda + 1} \frac{\tau_1 \lambda + 1}{\tau_2 \lambda + 1} \frac{k}{T \lambda + 1} M_u(\lambda) \right) \begin{bmatrix} \alpha(\lambda) \\ \beta(\lambda) \\ \gamma(\lambda) \end{bmatrix} = M_{\Omega}(\lambda) \vec{\Omega} + L_s \mathcal{L} \begin{bmatrix} \text{sign}(\Omega_s) \\ \text{sign}(\Omega_y) \\ \text{sign}(\Omega_z) \end{bmatrix}$$

$$\Pi_{\Omega}(\lambda) \rightarrow M_{\Omega}(\lambda)$$

$$\Pi_L(\lambda) \rightarrow M_u(\lambda)$$

$$\Pi_{\omega}(\lambda) \rightarrow -\varepsilon M_{\omega}(\lambda)$$

Краевая задача для расчета передаточных функций с учетом перетекания

$$\frac{\partial v_r}{\partial \xi} + \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \vartheta} + \frac{1}{\sin \vartheta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_\vartheta \operatorname{ctg} \vartheta = 0; \quad (\vartheta, \varphi) \rightarrow (\vartheta_j, \varphi_j); \quad j = 2, 3; \quad \frac{\partial p}{\partial \xi} = 0;$$

$$\lambda v_\vartheta + v_r^{(0)} \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \xi} + v_r \frac{\partial v_\vartheta^{(0)}}{\partial \xi} + v_\vartheta^{(0)} \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \vartheta} + v_\vartheta \frac{\partial v_\vartheta^{(0)}}{\partial \vartheta} + \frac{v_\varphi^{(0)}}{\sin \vartheta} \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \varphi} + \frac{v_\varphi}{\sin \vartheta} \frac{\partial v_\vartheta^{(0)}}{\partial \varphi} - 2v_\varphi^{(0)} v_\varphi \operatorname{ctg} \vartheta = -\frac{\partial p}{\partial \vartheta} + \frac{1}{\sigma} \frac{\partial^2 v_\vartheta}{\partial \xi^2} + \{0, 0, -v_r^{(0)} f_\varphi\};$$

$$\lambda v_\varphi + v_r^{(0)} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \xi} + v_r \frac{\partial v_\varphi^{(0)}}{\partial \xi} + v_\vartheta^{(0)} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \vartheta} + v_\vartheta \frac{\partial v_\varphi^{(0)}}{\partial \vartheta} + \frac{v_\varphi^{(0)}}{\sin \vartheta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_\varphi}{\sin \vartheta} \frac{\partial v_\varphi^{(0)}}{\partial \varphi} + (v_\vartheta^{(0)} v_\varphi + v_\vartheta v_\varphi^{(0)}) \operatorname{ctg} \vartheta = -\frac{1}{\sin \vartheta} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \frac{1}{\sigma} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \xi^2} + \{0, 0, v_r^{(0)} f_\vartheta\};$$

$$(\vartheta, \varphi) \rightarrow (\vartheta_j, \varphi_j); \quad j = 2, 3$$

$$f_\vartheta = -\sin \vartheta, \quad f_\varphi = 0; \quad f_{\vartheta_2} = \cos \vartheta_2 \sin \varphi_2, \quad f_{\varphi_2} = \cos \varphi_2; \quad f_{\vartheta_3} = \cos \vartheta_3 \sin \varphi_3, \quad f_{\varphi_3} = -\sin \varphi_3$$

$$v_r|_{\xi=1} = 0; \quad v_\vartheta|_{\xi=1} = 0; \quad v_\varphi|_{\xi=1} = \{-\sin \vartheta, 0, 0\};$$

$$v_{\vartheta_2}|_{\xi=1} = \{-\cos \varphi_2, 0, 0\}; \quad v_{\varphi_2}|_{\xi=1} = \{\cos \vartheta_2 \sin \varphi_2, 0, 0\};$$

$$v_{\vartheta_3}|_{\xi=1} = \{\sin \varphi_3, 0, 0\}; \quad v_{\varphi_3}|_{\xi=1} = \{\cos \vartheta_3 \cos \varphi_3, 0, 0\}$$

$$S_{\text{внутр}}^{(*)} = (\{(\vartheta, \varphi) \in [0, \frac{1}{2} \pi] \times [0, \pi]\} \cup \{(\vartheta, \varphi) \in [0, \vartheta_0] \times [0, \varphi_0]\} \cup \{(\vartheta_2, \varphi_2) \in [0, \vartheta_0] \times [\frac{1}{2} \pi, \frac{1}{2} \pi + \varphi_0]\}) \setminus$$

$$\setminus (\{(\vartheta, \varphi) \in [\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi] \times ([\frac{1}{8} \pi, \frac{3}{8} \pi] \cup [\frac{5}{8} \pi, \frac{7}{8} \pi])\} \cup$$

$$\cup \{(\vartheta_3, \varphi_3) \in [\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi + \vartheta_b] \times ([\frac{1}{8} \pi, \frac{3}{8} \pi] \cup [-\frac{3}{8} \pi, -\frac{1}{8} \pi])\} \cup \{(\vartheta, \varphi) \in [0, \vartheta_0] \times [\pi - \varphi_0, \pi]\}$$

$$\cup \{(\vartheta_2, \varphi_2) \in [\pi - \vartheta_0, \pi] \times [\frac{1}{2} \pi - \varphi_0, \frac{1}{2} \pi]\},$$

Краевая задача для расчета передаточных функций с учетом перетекания

$$\vartheta_0 = \arcsin\left(\frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{2}\sqrt{2} + \sin^2 \vartheta_b\right)\right)^{1/2} \quad \varphi_0 = \arcsin\left(\sin \vartheta_b \left(1 - \frac{1}{2}\cos^2 \vartheta_b \left(1 + \frac{1}{2}\sqrt{2}\right)\right)^{-1/2}\right)$$

$$\xi = 0, (\vartheta, \varphi) \in S : v_r = 0, v_\vartheta = 0, v_\varphi = \{0, 0, -\sin \vartheta\},$$

$$\vartheta = \frac{1}{2}\pi - \vartheta_b, (\xi, \varphi) \in [-h, 0] \times \left(\left[\frac{1}{8}\pi, \frac{3}{8}\pi\right] \cup \left[\frac{5}{8}\pi, \frac{7}{8}\pi\right]\right) : v_\vartheta = 0,$$

$$\vartheta_2 = \frac{1}{2}\pi + \vartheta_b, (\xi, \varphi_2) \in [-h, 0] \times \left[\frac{1}{8}\pi, \frac{3}{8}\pi\right] : v_{\vartheta_2} = \{0, 0, -\cos \varphi_2\},$$

$$\vartheta_3 = \frac{1}{2}\pi + \vartheta_b, (\xi, \varphi_3) \in [-h, 0] \times \left[\frac{1}{8}\pi, \frac{3}{8}\pi\right] : v_{\vartheta_3} = \{0, 0, \sin \varphi_3\},$$

$$\xi = -h, (\vartheta, \varphi) \in \left[\frac{1}{2}\pi - \vartheta_b, \frac{1}{2}\pi\right] \times \left(\left[\frac{1}{8}\pi, \frac{3}{8}\pi\right] \cup \left[\frac{5}{8}\pi, \frac{7}{8}\pi\right]\right) : v_r = 0, v_\vartheta = 0, v_\varphi = \{0, 0, -\sin \vartheta\}$$

$$\xi = -h, (\vartheta_2, \varphi_2) \in \left[\frac{1}{2}\pi - \vartheta_b, \frac{1}{2}\pi + \vartheta_b\right] \times \left[\frac{1}{8}\pi, \frac{3}{8}\pi\right] :$$

$$v_r = 0, v_\vartheta = \{0, 0, -\cos \varphi_2\}, v_\varphi = \{0, 0, \cos \vartheta_2 \sin \varphi_2\},$$

$$\xi = -h, (\vartheta_2, \varphi_2) \in \left[\frac{1}{2}\pi - \vartheta_b, \frac{1}{2}\pi + \vartheta_b\right] \times \left[\frac{1}{8}\pi, \frac{3}{8}\pi\right] :$$

$$v_r = 0, v_\vartheta = \{0, 0, \sin \varphi_3\}, v_\varphi = \{0, 0, \cos \vartheta_3 \cos \varphi_3\},$$

$$\xi = 0, (\vartheta, \varphi) \in \left[\frac{1}{2}\pi - \vartheta_b, \frac{1}{2}\pi\right] \times \left(\left[\frac{1}{8}\pi, \frac{3}{8}\pi\right] \cup \left[\frac{5}{8}\pi, \frac{7}{8}\pi\right]\right) : v_r|_I = v_r|_{II}, v_\vartheta|_I = v_\vartheta|_{II},$$

$$v_\varphi|_I = v_\varphi|_{II}, p|_I = p|_{II}, \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \xi}|_I = \frac{\partial v_\vartheta}{\partial \xi}|_{II}, \frac{\partial v_\varphi}{\partial \xi}|_I = \frac{\partial v_\varphi}{\partial \xi}|_{II},$$

$$\xi = 0, (\vartheta_j, \varphi_j) \in \left[\frac{1}{2}\pi - \vartheta_b, \frac{1}{2}\pi\right] \times \left(\left[\frac{1}{8}\pi, \frac{3}{8}\pi\right] \cup \left[\frac{5}{8}\pi, \frac{7}{8}\pi\right]\right) : v_r|_I = v_r|_{II}, v_{\vartheta_j}|_I = v_{\vartheta_j}|_{II},$$

$$v_{\varphi_j}|_I = v_{\varphi_j}|_{II}, p|_I = p|_{II}, \frac{\partial v_{\vartheta_j}}{\partial \xi}|_I = \frac{\partial v_{\vartheta_j}}{\partial \xi}|_{II}, \frac{\partial v_{\varphi_j}}{\partial \xi}|_I = \frac{\partial v_{\varphi_j}}{\partial \xi}|_{II}, j = 2, 3,$$

Краевая задача для расчета передаточных функций с учетом перетекания

$$\varphi_j = \frac{1}{8} \pi, \frac{3}{8} \pi, \frac{5}{8} \pi, \frac{7}{8} \pi, (\xi, \vartheta_j) \in [0, 1] \times [\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi]:$$

$$v_\varphi|_I = v_{\vartheta_b}|_{II} (\mathbf{e}_{\vartheta_b} \cdot \mathbf{e}_\varphi) + v_{\varphi_b}|_{II} (\mathbf{e}_{\varphi_b} \cdot \mathbf{e}_\varphi), \quad p|_I = p|_{II}, \quad k \neq 1$$

$$\varphi_j = \frac{1}{8} \pi, \frac{3}{8} \pi, (\xi, \vartheta_j) \in [0, 1] \times [\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi + \vartheta_b]:$$

$$v_{\varphi_j}|_I = v_{\vartheta_b}|_{II} (\mathbf{e}_{\vartheta_b} \cdot \mathbf{e}_{\varphi_j}) + v_{\varphi_b}|_{II} (\mathbf{e}_{\varphi_b} \cdot \mathbf{e}_{\varphi_j}), \quad p|_I = p|_{II}, \quad j = 2, 3, \quad k \neq j$$

$$\varphi = \frac{3}{8} \pi, \frac{5}{8} \pi, (\xi, \vartheta) \in [-h, 0] \times [\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi]: \quad p = 0,$$

$$\varphi_2 = \frac{3}{8} \pi, (\xi, \vartheta_2) \in [-h, 0] \times [\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi + \vartheta_b]: \quad p = 0, \quad j = 1, 2,$$

$$\varphi_3 = \frac{1}{8} \pi, (\xi, \vartheta_3) \in [-h, 0] \times [\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi + \vartheta_b]: \quad p = 0,$$

$$\varphi = \frac{1}{8} \pi, (\xi, \vartheta) \in [-h, 0] \times [\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi]: \quad p = -2Q_0(Q_1^{(1)} - \{0, Q_0, 0\}) / k_s^2, \quad \partial v_\varphi / \partial \xi = 0,$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{8} \pi, (\xi, \vartheta_j) \in [-h, 0] \times [\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi + \vartheta_b]: \quad p = -2Q_0 Q_1^{(2)} / k_s^2, \quad \partial v_{\varphi_2} / \partial \xi = 0,$$

$$\varphi = \frac{7}{8} \pi, (\xi, \vartheta_j) \in [-h, 0] \times [\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi]: \quad p = -2Q_0(Q_2^{(1)} + \{0, Q_0, 0\}) / k_s^2, \quad \partial v_\varphi / \partial \xi = 0,$$

$$\varphi_3 = \frac{3}{8} \pi, (\xi, \vartheta_3) \in [-h, 0] \times [\frac{1}{2} \pi - \vartheta_b, \frac{1}{2} \pi + \vartheta_b]: \quad p = -2Q_0 Q_2^{(3)} / k_s^2, \quad \partial v_{\varphi_3} / \partial \xi = 0,$$

$$Q_1^{(1)} = 2 \int_{-h}^0 d\xi \int_{\pi/2 - \vartheta_b}^{\pi/2} d\vartheta v_\varphi, \quad \varphi = \frac{1}{8} \pi, \quad Q_2^{(1)} = -2 \int_{-h}^0 d\xi \int_{\pi/2 - \vartheta_b}^{\pi/2} d\vartheta v_\varphi, \quad \varphi = \frac{7}{8} \pi,$$

$$Q_1^{(2)} = \int_{-h}^0 d\xi \int_{\pi/2 - \vartheta_b}^{\pi/2 + \vartheta_b} d\vartheta v_{\varphi_2}, \quad \varphi_2 = \frac{1}{8} \pi, \quad Q_2^{(3)} = -\int_{-h}^0 d\xi \int_{\pi/2 - \vartheta_b}^{\pi/2 + \vartheta_b} d\vartheta v_{\varphi_3}, \quad \varphi_3 = \frac{3}{8} \pi,$$

Краевая задача для расчета передаточных функций с учетом перетекания

$$Q_{1,0}^{(1)} = 2 \int_{-h}^0 d\xi \int_{\pi/2-\vartheta_b}^{\pi/2} d\vartheta v_{\varphi}, \varphi = \frac{3}{8} \pi, \quad Q_{2,0}^{(1)} = -2 \int_{-h}^0 d\xi \int_{\pi/2-\vartheta_b}^{\pi/2} d\vartheta v_{\varphi}, \varphi = \frac{5}{8} \pi,$$

$$Q_{1,0}^{(2)} = \int_{-h}^0 d\xi \int_{\pi/2-\vartheta_b}^{\pi/2+\vartheta_b} d\vartheta_2 v_{\varphi_2}, \varphi_2 = \frac{3}{8} \pi, \quad Q_{2,0}^{(3)} = - \int_{-h}^0 d\xi \int_{\pi/2-\vartheta_b}^{\pi/2+\vartheta_b} d\vartheta_3 v_{\varphi_3}, \varphi_3 = \frac{1}{8} \pi,$$

$$Q_{1,0}^{(1)} + Q_{2,0}^{(1)} + 2Q_{1,0}^{(2)} + 2Q_{2,0}^{(3)} = Q_{1,0}^{(1)} + Q_{2,0}^{(1)} + 2Q_{1,0}^{(2)} + 2Q_{2,0}^{(3)}$$

$$\vartheta = \frac{1}{2} \pi, \quad (\xi, \varphi) \in [-h, 1] \times \left(\left[\frac{1}{8} \pi, \frac{3}{8} \pi \right] \cup \left[\frac{5}{8} \pi, \frac{7}{8} \pi \right] \right) : v_{\vartheta} = 0,$$

$$\varphi_2 = 0, \quad (\xi, \vartheta_2) \in [0, 1] \times \left(\left[0, \frac{1}{8} \pi \right] \cup \left[\frac{7}{8} \pi, \pi \right] \right) : v_{\varphi_2} = 0,$$

$$\varphi_3 = \pm \frac{1}{2} \pi, \quad (\xi, \vartheta_3) \in [0, 1] \times \left[0, \frac{1}{8} \pi \right] : v_{\varphi_3} = 0,$$

$$\vartheta_3 = \frac{1}{2} \pi + \vartheta_b, \quad (\xi, \varphi_3) \in [0, 1] \times \left[\frac{1}{8} \pi, \frac{3}{8} \pi \right], \quad \vartheta = \arcsin(1 - \cos^2 \vartheta_b \cos^2 \varphi_3)^{1/2},$$

$$\varphi = -\arcsin(\sin \vartheta_b (1 - \cos^2 \vartheta_b \cos^2 \varphi_3)^{-1/2}) :$$

$$p\left(\frac{1}{2} \pi + \vartheta_b, \varphi_3\right) = p(\vartheta, \pi + \varphi),$$

$$v_{\vartheta_b}\left(\xi, \frac{1}{2} \pi + \vartheta_b, \varphi_3\right) = (\vec{e}_{\vartheta_b} \cdot \vec{e}_{\vartheta}) v_{\vartheta}(\xi, \vartheta, \pi + \varphi) + (\vec{e}_{\vartheta_b} \cdot \vec{e}_{\varphi}) v_{\varphi}(\xi, \vartheta, \pi + \varphi),$$

$$\varphi = -\varphi_0, \quad (\xi, \vartheta) \in [0, 1] \times [0, \vartheta_0] : v_{\varphi}(\xi, \vartheta, \pi - \varphi_0) = v_{\varphi}(\xi, \vartheta, \varphi_0), \quad p(\xi, \vartheta, \pi - \varphi_0) = p(\xi, \vartheta, \varphi_0),$$

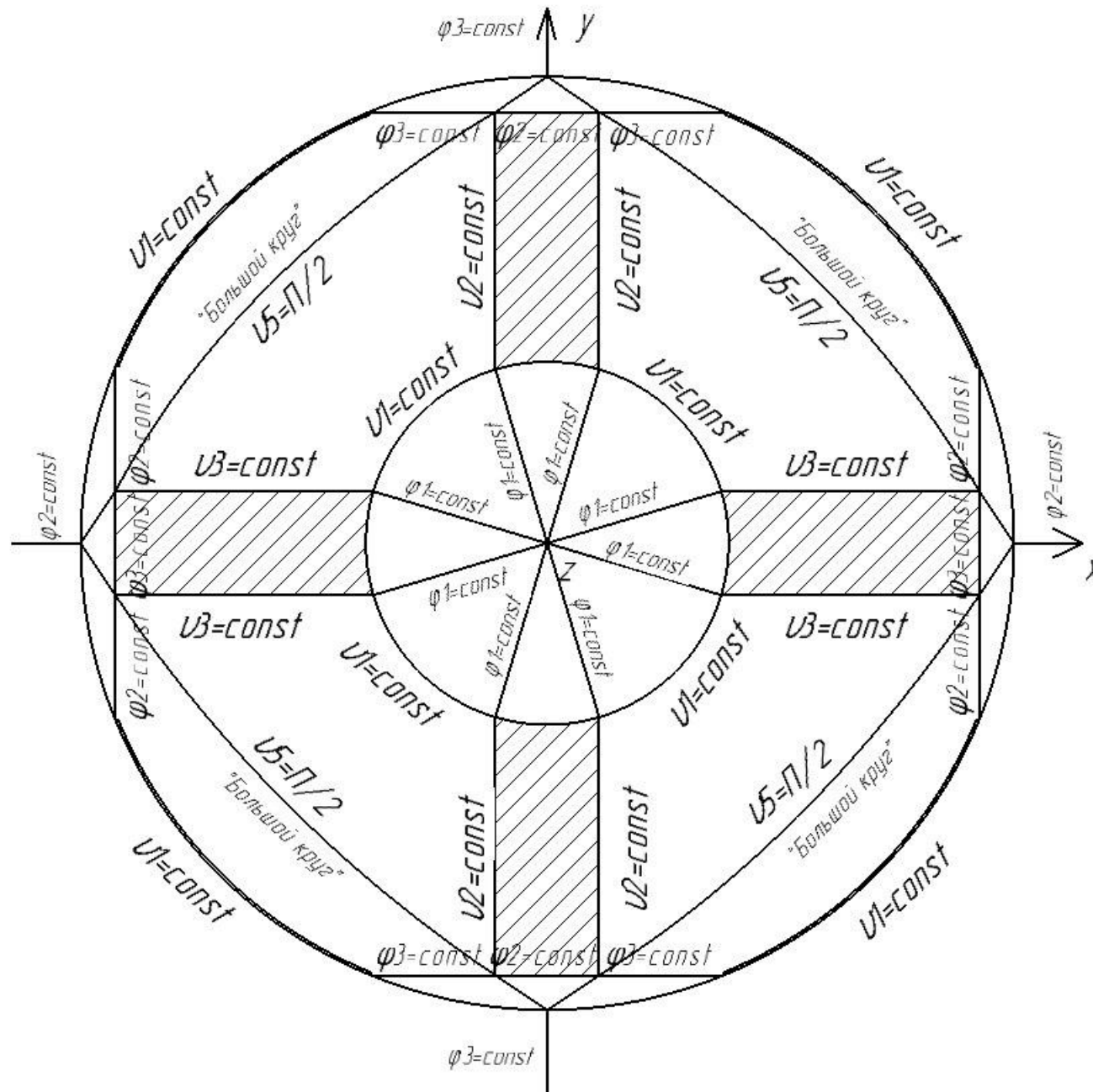
$$\varphi_2 = \frac{1}{2} \pi + \varphi_0, \quad (\xi, \vartheta_2) \in [0, 1] \times [0, \vartheta_0] :$$

$$v_{\varphi_2}\left(\xi, \pi - \vartheta_2, \frac{1}{2} \pi - \varphi_0\right) = -v_{\varphi}\left(\xi, \vartheta_2, \frac{1}{2} \pi + \varphi_0\right), \quad p\left(\xi, \pi - \vartheta_2, \frac{1}{2} \pi - \varphi_0\right) = p\left(\xi, \vartheta_2, \frac{1}{2} \pi + \varphi_0\right),$$

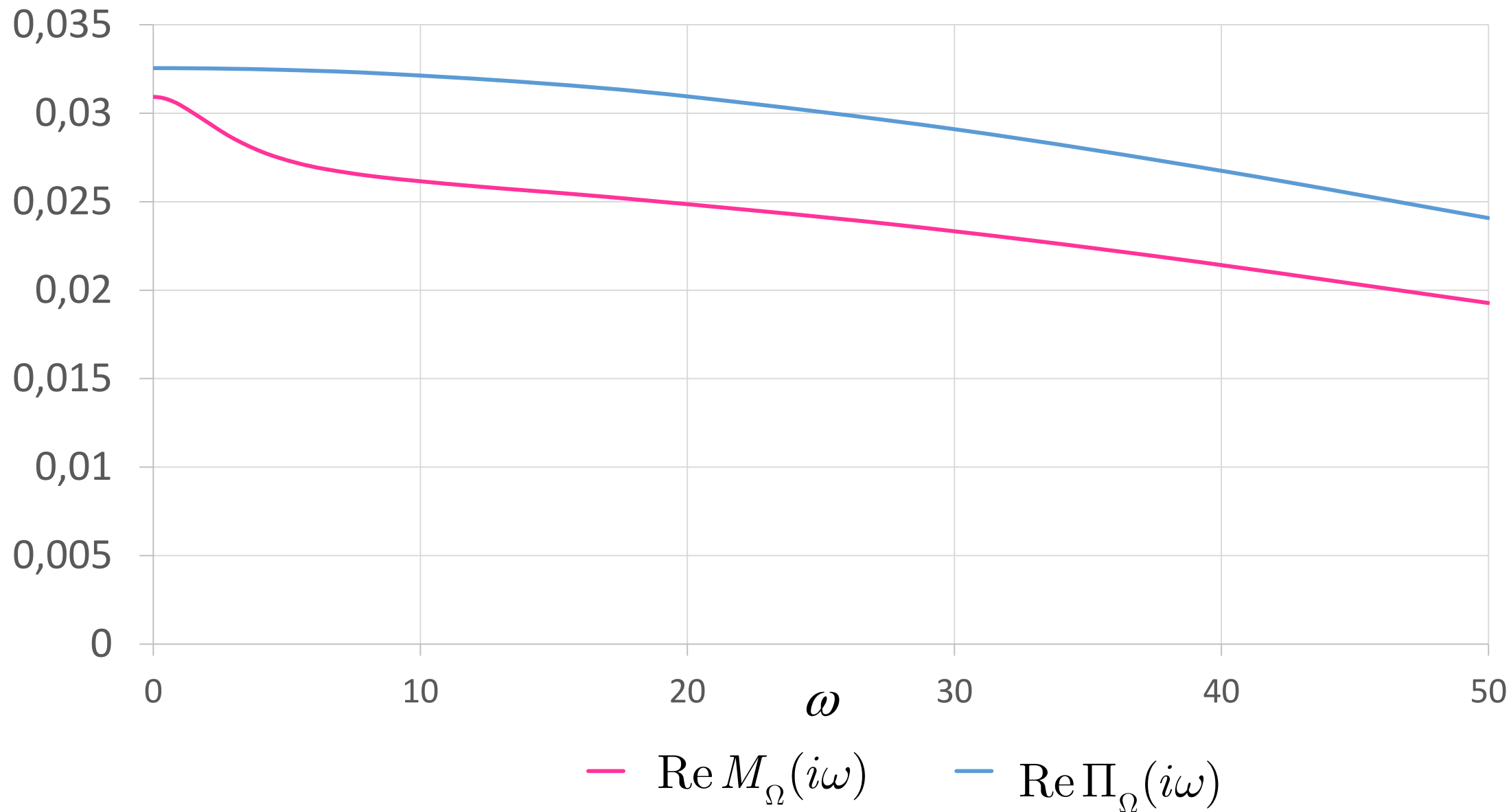
Краевая задача для расчета передаточных функций с учетом перетекания (продолжение 4)

$$\begin{aligned}
 \{M_\Omega(\lambda), M_v(\lambda), M_\omega(\lambda)\} = & -\frac{4hQ_0}{5k_s^2} (Q_2^{(1)} - Q_1^{(1)} + \{0, 2Q_0, 0\}) - \frac{4}{\sigma} \int_S \sin \vartheta \left. \frac{\partial v_\varphi}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} dS + \\
 & + \frac{4}{\sigma} \left[\int_{\pi/2-\vartheta_b}^{\pi/2} \sin^2 \vartheta d\vartheta \left(\int_{\pi/8}^{3\pi/8} \left. \frac{\partial v_\varphi}{\partial \xi} \right|_{\xi=-h} d\varphi + \int_{5\pi/8}^{7\pi/8} \left. \frac{\partial v_\varphi}{\partial \xi} \right|_{\xi=-h} d\varphi \right) + \int_{\pi/2-\vartheta_b}^{\pi/2+\vartheta_b} \sin \vartheta_2 d\vartheta_2 \int_{\pi/8}^{3\pi/8} d\varphi_2 \cdot \right. \\
 & \cdot \left(\cos \varphi_2 \left. \frac{\partial v_{\vartheta_2}}{\partial \xi} \right|_{\xi=-h} - \cos \vartheta_2 \sin \varphi_2 \left. \frac{\partial v_{\varphi_2}}{\partial \xi} \right|_{\xi=-h} \right) - \int_{\pi/2-\vartheta_b}^{\pi/2+\vartheta_b} \sin \vartheta_3 d\vartheta_3 \int_{\pi/8}^{3\pi/8} d\varphi_3 \left(\sin \varphi_3 \left. \frac{\partial v_{\vartheta_3}}{\partial \xi} \right|_{\xi=-h} - \right. \\
 & \left. - \cos \vartheta_3 \cos \varphi_3 \left. \frac{\partial v_{\varphi_2}}{\partial \xi} \right|_{\xi=-h} \right) \left. + 4h \cos \vartheta_b \left[\int_{\pi/8}^{3\pi/8} (p|_{\vartheta_2=\pi/2+\vartheta_b} - p|_{\vartheta_2=\pi/2-\vartheta_b}) \cos \varphi_2 d\varphi_2 - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \int_{\pi/8}^{3\pi/8} (p|_{\vartheta_3=\pi/2+\vartheta_b} - p|_{\vartheta_3=\pi/2-\vartheta_b}) \sin \varphi_3 d\varphi_3 \right] \right.
 \end{aligned}$$

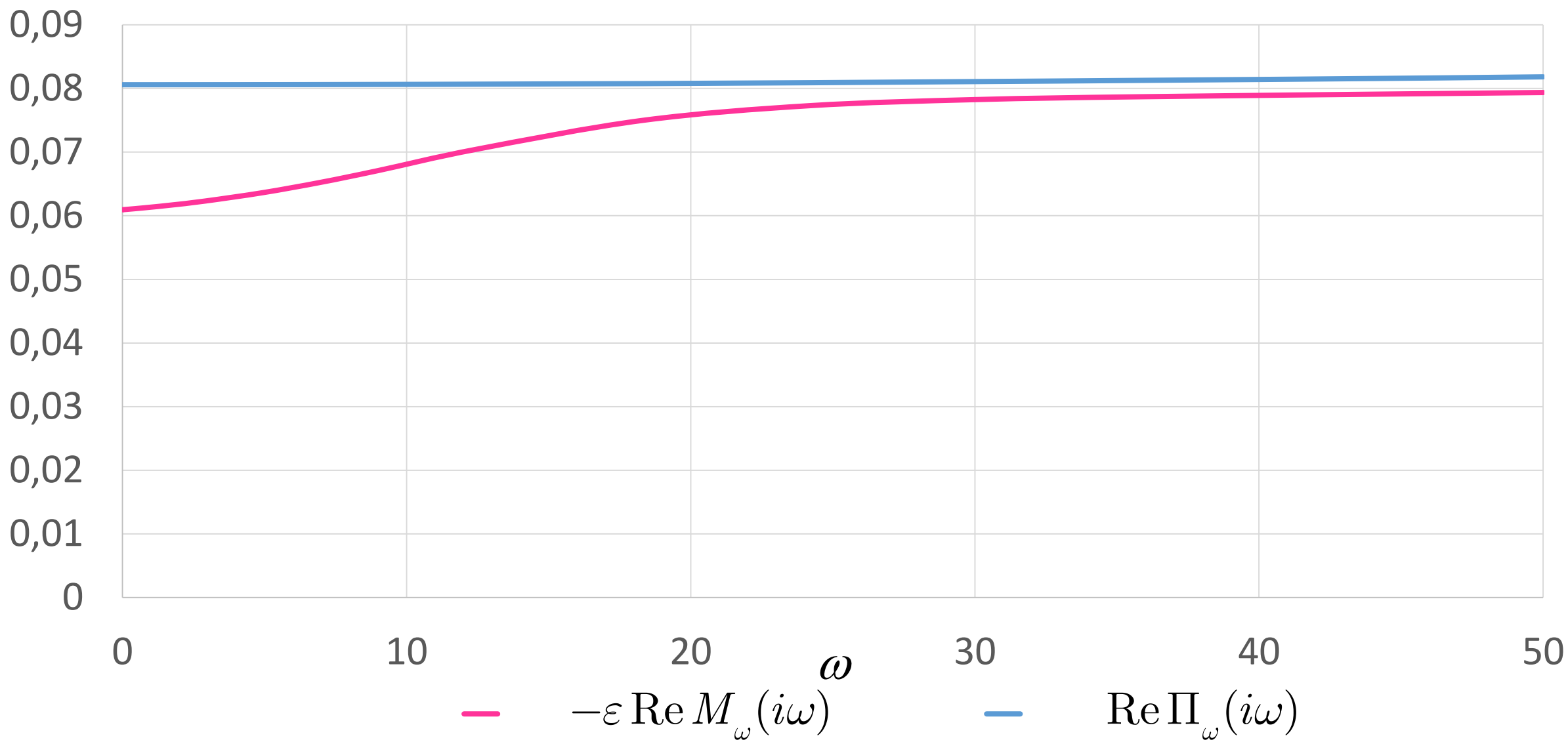
Схема разбиения



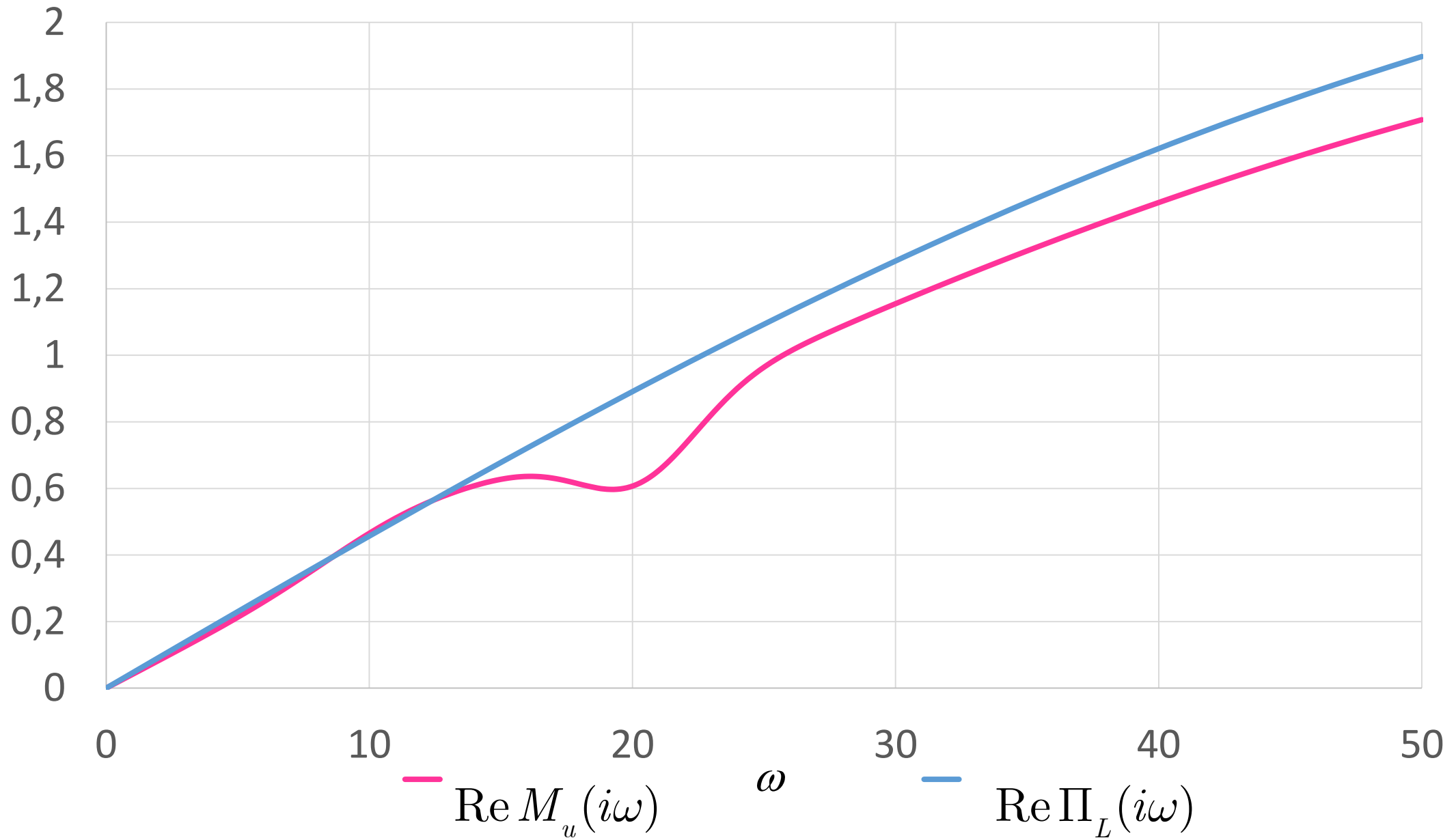
Влияние перетекания жидкости на частотные характеристики



Влияние перетекания жидкости на частотные характеристики



Влияние перетекания жидкости на частотные характеристики



Заключение

- Моделирование эффектов перетекания жидкости между рабочими каналами было выполнено на основе упрощенных трехмерных уравнений Навье-Стокса
- Численное интегрирование линейных и нелинейных краевых задач для трехмерных упрощенных уравнений Навье-Стокса проведено на основе проекционного метода Галеркина
- Влияние эффектов перетекания на вещественные частотные характеристики поддерживающего слоя оценивается величиной порядка от 10 до 15%.
- Эффекты перетекания не будут служить препятствием для создания плавающей гиросtabilизированной платформы с максимальным значением угловой ошибки порядка не более 2 угловых секунд, что существенно для проектирования навигационных систем

Спасибо за внимание!

**САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**