

УДК 681.5

И.М. Першин, Г.Е. Веселов, М.И. Першин**АППРОКСИМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Рассматривается важная проблема построения аппроксимационной модели для объектов с распределенными параметрами. Эта проблема приобретает важное значение, поскольку многие технологические процессы, подлежащие автоматизации, описываются уравнениями в частных производных, математические модели которых не имеют аналитического решения. Если аналитическое решение получено (определена реакция объекта на собственные вектор-функции оператора объекта (пространственные моды)), то передаточная функция по каждой пространственной моде может быть представлена в виде отношения аналитических целых функций. Если не имеется аналитического решения, то динамические характеристики таких объектов определяются с использованием аппроксимационных моделей передаточных функций распределенного объекта по выбранным пространственным модам. Рассматриваемые аппроксимационные модели строятся на основе численного моделирования распределенного объекта, либо с использованием результатов экспериментальных исследований. Поскольку распределенные объекты обладают рядом специфических свойств, например передаточные функции распределенных объектов и систем по каждой пространственной моде входного воздействия описываются отношением бесконечных полиномов, то и аппроксимационные модели таких объектов должны учитывать рассмотренные специфические свойства. Классические методы аппроксимации, в виде аperiodического звена и звена с чистым запаздыванием, дают большие погрешности при вычислении динамических характеристик распределенных объектов. Цель статьи – разработка новой аппроксимационной модели передаточной функции объекта по каждой пространственной моде входного воздействия, учитывающей специфические свойства распределенных объектов. Научной задачей является разработка методики определения параметров аппроксимирующего звена. Рассматриваемая методика ориентирована на использование результатов численного моделирования распределенного объекта или экспериментальных исследований на физическом объекте и носить конструктивный характер. В статье так же приводятся результаты сравнения динамических характеристик распределенного объекта, полученных с использованием аналитического решения, аппроксимационной модели и численного моделирования.

Распределенные объекты; аппроксимация; передаточные функции.

I.M. Pershin, G.E. Veselov, M.I. Pershin**APPROXIMATING MODELS OF TRANSFER FUNCTIONS OF DISTRIBUTED
OBJECTS**

Deals with the important problem of constructing approximate models for objects with distributed parameters. This problem is important because many processes to be automated are described by partial differential equations, mathematical models which do not have analytical solutions. If an analytical solution is obtained (determined by the object's reaction to the eigenvector-functions of the operator of the object (spatial modes)), then the transfer function for each spatial mode can be represented as a ratio of analytic entire functions. If you do not have analytical solutions, the dynamic characteristics of such objects are defined using approximation models of transfer functions of distributed object on the selected spatial modes. Consider approximation models are based on the numerical simulation of the distributed object, or using experimental results. Because distributed objects have some specific properties, such as transfer functions of distributed objects and systems at each spatial fashion inputs are described by a relation of infinite polynomials, approximation and model of such facilities should take into account the specific properties. Classical methods of approximation, in the form of aperiodic link and link with a pure time delay, give large errors in the calculation of the dynamic characteristics of distributed objects. The article aims to develop a new approximations model the transfer function of the object for each spatial fashion inputs, taking into account the specific properties of distributed objects. The scientific challenge is to develop methods for determining the parameters of the approximat-

ing segment. The technique focuses on the use of numerical simulation results of the distributed object or experimental studies on the physical object and to be constructive. The article also presents the results of the comparison of dynamic characteristics of distributed object obtained using the analytical solution, approximations models and numerical simulations.

Distributed objects; the approximation of the transfer function.

Введение. В литературе описаны методики аппроксимации передаточных функций объектов по результатам экспериментальных или численных исследований. Это и методы, использующие разложения в ряд Тейлора [1, 2], а так же методы, использующие аппроксимацию передаточных функций распределенных систем в виде отношения конечных полиномов [3, 4]. Одной из основных в сосредоточенных системах, а также ряда распределенных систем, остается методика аппроксимации в виде аperiодического звена, умноженного на звено с чистым запаздыванием [5–7]. При решении ряда практических задач управления рассмотренных в [9–20], так же используется аналогичная аппроксимации. Эта методика, хорошо зарекомендовавшая в сосредоточенных системах, не всегда применима к распределенным объектам (системам), поскольку приводит к существенным ошибкам, при описании динамических характеристик распределенных объектов, что затрудняет процедуру синтеза распределенных систем управления.

Выбор передаточной функции аппроксимирующего звена. Положим, что имеется пластина конечных размеров, в которой осуществляется процесс распространения тепла.

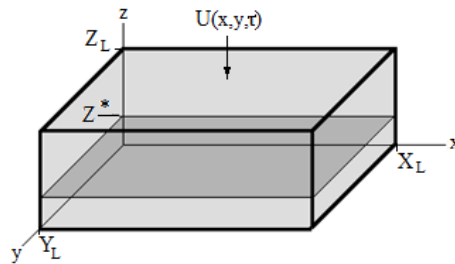


Рис. 1. Объект управления

Математическая модель объекта описывается уравнением:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$0 < x < x_L, \quad 0 < y < y_L, \quad 0 < z < z_L,$$

где $T(x, y, z, \tau)$ – фазовая переменная; x, y, z – пространственные координаты; a – заданный коэффициент; x_L, y_L, z_L – заданные числа.

Граничные и начальные условия для уравнения (1) имеют вид:

$$T(0, y, z, \tau) = T(x, 0, z, \tau) = T(x_L, y, z, \tau) = T(x, y, z, \tau) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\lambda \cdot \partial T(x, y, z_L, \tau) / \partial z = U(x, y, \tau), \quad (4)$$

$$T(x, y, z, 0) = 0. \quad (5)$$

Функцией выхода является значение температурного поля

$$T(x, y, z=Z^*, \tau),$$

где Z^* – заданное число ($0 < Z^* < z_L$).

Разложим входное воздействие $U(x, y, \tau)$ в ряд Фурье. Учитывая граничные условия (2), входное воздействие может быть представлено в виде:

$$U(x, y, \tau) = \sum_{\eta, \gamma=1}^{\infty} C_{\eta, \gamma}(\tau) \cdot \sin(\psi_{\eta} \cdot x) \cdot \sin(\tilde{\varphi}_{\gamma} \cdot y), \quad (6)$$

где $\psi_{\eta} = \pi \cdot \eta / X_L$; $\tilde{\varphi}_{\gamma} = \pi \cdot \gamma / Y_L$.

В [4, 5–7] получена передаточная функция объекта по каждой пространственной моде входного воздействия, которая может быть записана в виде

$$W_{0, \eta, \gamma}(s) = \frac{\exp(\beta_{\eta, \gamma} \cdot z^*) + \exp(-\beta_{\eta, \gamma} \cdot z^*)}{\lambda \cdot \beta_{\eta, \gamma} \cdot (\exp(\beta_{\eta, \gamma} \cdot z_L) - \exp(-\beta_{\eta, \gamma} \cdot z_L))}, \quad (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}), \quad (7)$$

$$\beta_{\eta, \gamma} = \left(\frac{s}{a} + \psi_{\eta}^2 + \tilde{\varphi}_{\gamma}^2 \right)^{1/2},$$

где λ – коэффициент теплопроводности.

Если в качестве входного воздействия служит температура нагревателя, граничное условие (4) записывается в виде

$$T(x, y, z_L, \tau) = U(x, y, \tau),$$

то передаточная функция объекта по каждой пространственной моде входного воздействия имеет вид

$$W_{0, \eta, \gamma}(s) = \frac{\exp(\beta_{\eta, \gamma} \cdot Z^*) + \exp(-\beta_{\eta, \gamma} \cdot Z^*)}{\exp(\beta_{\eta, \gamma} \cdot Z_L) + \exp(-\beta_{\eta, \gamma} \cdot Z_L)}, \quad (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}).$$

Исследования, приведенные в [10] показывают, что

$$\lim_{\beta_{\eta, \gamma} \rightarrow \infty} \left(\frac{\exp(\beta_{\eta, \gamma} \cdot Z^*) + \exp(-\beta_{\eta, \gamma} \cdot Z^*)}{\exp(\beta_{\eta, \gamma} \cdot Z_L) + \exp(-\beta_{\eta, \gamma} \cdot Z_L)} \right) = \exp(-\beta_{\eta, \gamma} \cdot \Delta z), \quad (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}), \quad (8)$$

где $\Delta z = Z_L - Z^*$.

С учетом (7), (8), аппроксимационную модель рассматриваемого объекта запишем в виде

$$W_{a, \eta, \gamma}(s) = \frac{K}{\beta_{\eta, \gamma}} \cdot \exp(-\beta_{\eta, \gamma} \cdot \Delta z), \quad (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}), \quad (9)$$

$$\beta_{\eta, \gamma} = \left(\frac{s}{a} + \psi_{\eta}^2 + \tilde{\varphi}_{\gamma}^2 \right)^{1/2},$$

где K – коэффициент, определяемый с использованием экспериментальных исследований. В рассматриваемом случае, поскольку задана передаточная функция объекта (7), рассматриваемый коэффициент может быть определен (для фиксированных значений η и γ) из следующего соотношения:

$$K_{c, o} = \frac{\exp(\beta_{\eta, \gamma} \cdot z^*) + \exp(-\beta_{\eta, \gamma} \cdot z^*)}{\lambda \cdot \beta_{\eta, \gamma} \cdot (\exp(\beta_{\eta, \gamma} \cdot z_L) - \exp(-\beta_{\eta, \gamma} \cdot z_L))},$$

$$K = K_{c, o} / \left(\frac{1}{\beta_{\eta, \gamma}} \cdot \exp(-\beta_{\eta, \gamma} \cdot \Delta z) \right), \quad (10)$$

$$\beta_{\eta, \gamma} = \left(\psi_{\eta}^2 + \tilde{\varphi}_{\gamma}^2 \right)^{1/2},$$

где $K_{c, o}$ – статический коэффициент усиления объекта по фиксированной пространственной моде.

Полагая $s=j\omega$ (где ω – круговая частота), определим для передаточных функций (7) и (9) модули и фазы и вычислим их рассогласования. При этом, будем полагать, что значения соответствующих параметров равны:

$$\alpha=0.002, Z_L=0.12, Z^*=0.1, X_L=1, Y_L=0.5, \lambda=0.23,$$

$$\psi_{\eta=1}^2 + \tilde{\varphi}_{\gamma=1}^2 = (\pi \cdot 1/1)^2 + (\pi \cdot 1/0.5)^2 = 49.347.$$

Значение коэффициента K , вычисленное с использованием (10) равно 1.52857.

По результатам вычислений построены графики рассогласования (модуль объекта (7) – модуль звена(9), фаза объекта (7) – фаза звена (9)), которые приведены на рис. 2.

На рис. 3 показаны графики рассогласования модулей, вычисленные для различных значений обобщенной координаты G [4]

$$G = \psi_{\eta}^2 + \tilde{\varphi}_{\gamma}^2.$$

Через точки максимальных рассогласований (R_{\max}), построенные по результатам вычислений для различных значений G проведем линию максимальных рассогласований (рис. 3).

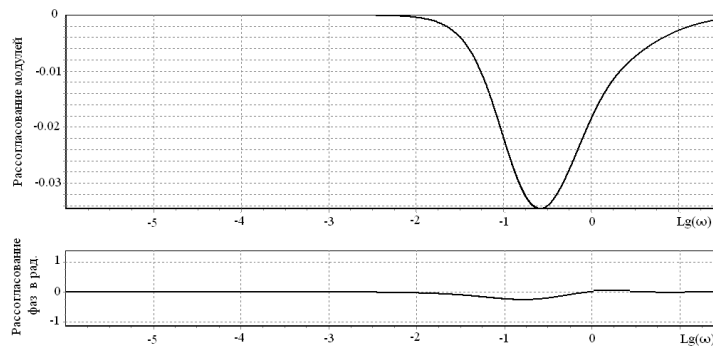


Рис. 2. Рассогласование динамических характеристик распределенного объекта и его аппроксимационной модели

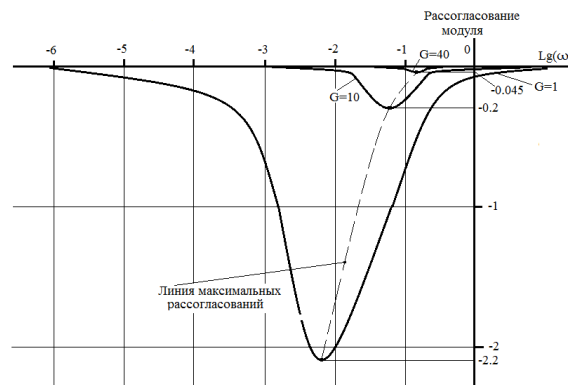


Рис. 3. Рассогласование модулей

На рис. 4 показаны графики изменения максимальных рассогласований в зависимости от обобщенной координаты G .

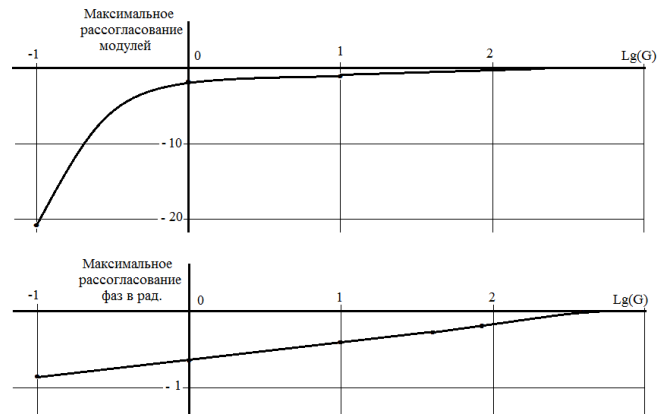


Рис. 4. Графики изменения максимальных рассогласований

На рис. 5 приведены графики изменения статического коэффициента $K_{c,o}$ и график относительной величины рассогласования $abs(R_{max})/K_{c,o}$.

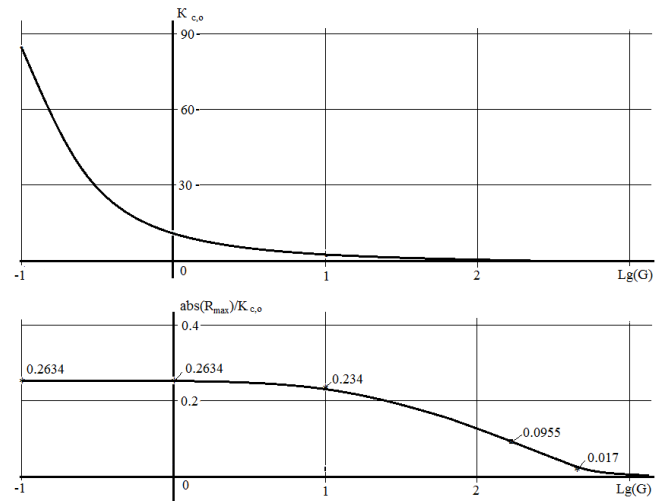


Рис. 5. Графики $K_{c,o}$ и $abs(R_{max})/K_{c,o}$

Результаты моделирования показывают, что аппроксимационная модель (9) может быть использована для объектов с распределенными параметрами. Рассогласование динамических характеристик распределенного объекта и его аппроксимационной модели, при синтезе распределенных систем управления, может быть учтено путем корректирования требований к запасам устойчивости по фазе и по модулю.

Методика определения параметров аппроксимирующего звена. Для описания методики определения параметров звена (9), запишем дискретную модель распределенного объекта (1)–(6) (схема дискретизации распределенного объекта приведена на рис. 6) и проведем численное моделирование для определения реакции объекта на различные входные воздействия:

первая мода

$$U(x, y, \tau) = \sin(\psi_1 \cdot x) \cdot \sin(\tilde{\varphi}_1 \cdot y);$$

третья мода

$$U(x, y, \tau) = \sin(\psi_3 \cdot x) \cdot \sin(\tilde{\varphi}_2 \cdot y);$$

динамическое входное воздействие

$$U(x, y, \tau) = \sin(0.05 \cdot \tau) \cdot \sin(\psi_1 \cdot x) \cdot \sin(\tilde{\varphi}_1 \cdot y).$$

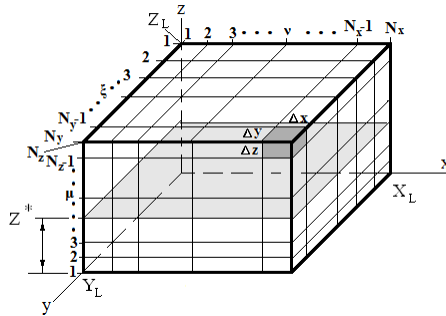


Рис. 6. Схема дискретизации математической модели распределенного объекта

При моделировании будем полагать, что значения параметров равны: $a=0.002$, $Z_L=0.12$, $Z^*=0.1$, $X_L=1$, $Y_L=0.5$, $\lambda=0.23$ (значения параметров заданы в системе СИ).

Число точек дискретизации и по соответствующим координатам выбрано равным:

$$N_x=16, N_y=16, N_z=30.$$

Шаги дискретизации определяются из следующих соотношений

$$\Delta x = X_L / (N_x - 1), \quad \Delta y = Y_L / (N_y - 1), \quad \Delta z = Z_L / (N_z - 1).$$

По результатам моделирования построены графики, приведенные на рис. 7, построенные для точек $T(x=4 \cdot \Delta x, y=9 \cdot \Delta y, Z^*, \tau)$. Вычисленное значение входного воздействия для первой моды $U_{1,1}(x=4 \cdot \Delta x, y=9 \cdot \Delta y, \tau)=0.707$, для третьей моды $U_{3,2}(x=4 \cdot \Delta x, y=9 \cdot \Delta y, \tau)=-0.345$.

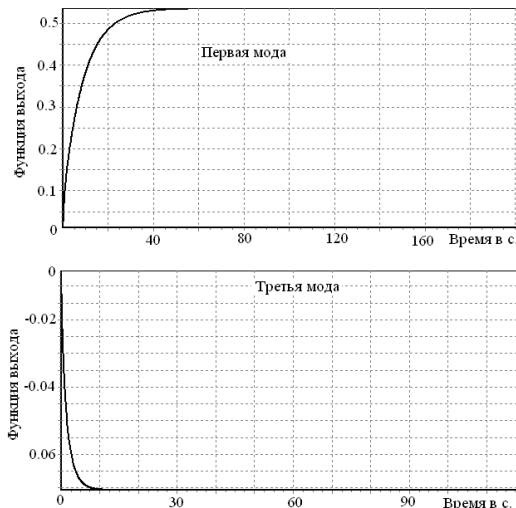


Рис. 7. Результаты моделирования

На рис. 8 построены графики, отражающие реакцию объекта на динамическое входное воздействие по первой пространственной моде

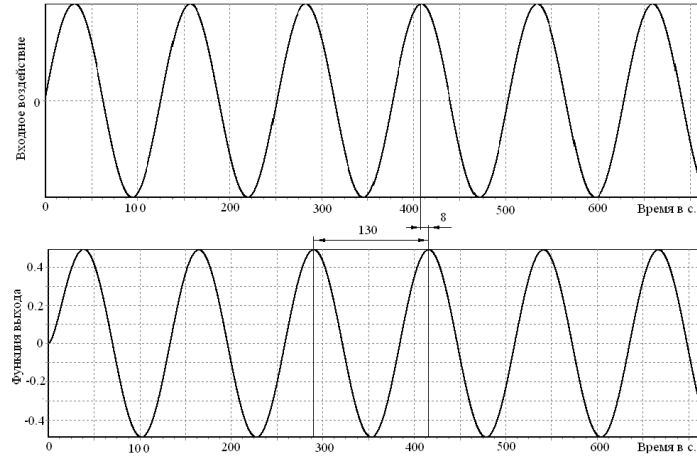


Рис. 8. Реакция объекта на динамическое входное воздействие

Для описания передаточной функции объекта в виде аппроксимирующего звена (9), необходимо определить значения параметров \mathbf{K} , Δz и \mathbf{a} . Для этого используем экспериментальные исследования, результаты которых отражены на графиках рис. 7 и 8.

Методика определения параметров аппроксимирующего звена распадается на следующие этапы:

1. Используя результаты моделирования (или результаты экспериментальных исследований на реальном объекте), определим сдвиг по фазе функции выхода относительно входного воздействия $f = -2\pi \cdot 8 / (130) = -0.3867$, а так же статические коэффициенты усиления по выбранным пространственным модам

$$K_{1,1} = 0.5356 / 0.707 = 0.7576, \quad K_{3,2} = -0.07066 / (-0.345) = 0.20248.$$

2. Определим значения K и Δz для аппроксимирующего звена (9). Приравняв статический коэффициент усиления звена (9), к статическим коэффициентам усиления по выбранным пространственным модам, получим систему уравнений для определения значений K и Δz .

$$\begin{cases} K_{1,1} = \frac{K}{\beta_{1,1}} \cdot \exp(-\beta_{1,1} \cdot \Delta z) \\ K_{3,2} = \frac{K}{\beta_{3,2}} \cdot \exp(-\beta_{3,2} \cdot \Delta z) \end{cases}, \quad (11)$$

$$\beta_{1,1} = (\psi_1^2 + \tilde{\varphi}_1^2)^{1/2}, \quad \beta_{3,2} = (\psi_3^2 + \tilde{\varphi}_2^2)^{1/2},$$

Для рассматриваемого примера $\beta_{1,1} = ((\pi \cdot 1/1)^2 + (\pi \cdot 1/0.5)^2)^{0.5} = 7.0248$,

$$\beta_{3,2} = ((\pi \cdot 3/1)^2 + (\pi \cdot 2/0.5)^2)^{0.5} = 15.708$$

Преобразуя (11), получим

$$\begin{cases} K_{1,1} \cdot \beta_{1,1} = K \cdot \exp(-\beta_{1,1} \cdot \Delta z) \\ K_{3,2} \cdot \beta_{3,2} = K \cdot \exp(-\beta_{3,2} \cdot \Delta z) \end{cases}, \quad (12)$$

Поделив второе уравнение системы (12) на первое, придем к следующему результату

$$\Delta z = \frac{\text{Ln}(K_{3,2} \cdot \beta_{3,2} / (K_{1,1} \cdot \beta_{1,1}))}{-\beta_{3,2} + \beta_{1,1}}. \quad (13)$$

Определим значение Δz для рассматриваемого примера

$$\Delta z = \frac{\text{Ln}(0.238 \cdot 15.708 / (0.87 \cdot 7.0248))}{-15.708 + 7.0248} = 0.05929.$$

Подставляя вычисленное значение Δz в первое уравнение (12) и преобразуя, получим

$$K = K_{1,1} \cdot \beta_{1,1} / \exp(-\beta_{1,1} \cdot \Delta z). \quad (14)$$

Для рассматриваемого примера

$$K = 0.87 \cdot 7.0248 / \exp(-7.0248 \cdot 0.0573) = 8.07$$

3. Определим значение параметра **a**. Для этого воспользуемся вычисленным значением сдвиг по фазе функции выхода относительно входного воздействия $f = -0.3867$ (см. рис. 8). Запишем передаточную функцию аппроксимирующего звена по первой пространственной моде

$$W_{a,1,1}(s) = \frac{K}{\beta_{1,1}} \cdot \exp(-\beta_{1,1} \cdot \Delta z), \quad \beta_{1,1} = \left(\frac{s}{a} + \psi_1^2 + \tilde{\varphi}_1^2 \right)^{1/2}. \quad (15)$$

Полагая $s=j\omega$ ($\omega=0.05$), запишем соотношение для определения фазы аппроксимирующей функции (15)

$$\varphi = -\Delta z \cdot \text{Im}(\beta_{1,1}) - \arctan(\omega / (a \cdot (\psi_1^2 + \tilde{\varphi}_1^2))).$$

Вычислим значение параметра **a**, для которого выполняется условие $\varphi = f$. Результаты вычислений показаны на рис. 9.

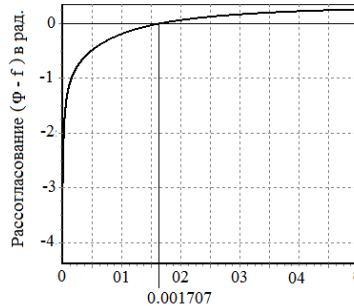


Рис. 9. График рассогласования ($\varphi - f$)

Вычисленное значение $a=0.001707$.

Полученная передаточная функция аппроксимирующего звена записывается в виде

$$W_{a,\eta,\gamma}(s) = \frac{8.07}{\beta_{\eta,\gamma}} \cdot \exp(-\beta_{\eta,\gamma} \cdot 0.05929), \quad (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}), \quad (16)$$

$$\beta_{\eta,\gamma} = \left(\frac{s}{0.001707} + \psi_\eta^2 + \tilde{\varphi}_\gamma^2 \right)^{1/2}.$$

Записывая передаточную функцию (16) в общем виде с использованием обобщенной координаты [], получим:

$$W(s, G) = \frac{K}{\beta(s, G)} \cdot \exp(-\beta(s, G) \cdot \Delta z) \quad (17)$$

$$\beta(s, G) = \left(\frac{s}{a} + G \right)^{1/2}, \quad (\infty > G \geq G_n),$$

$$G_n = \psi_1^2 + \tilde{\varphi}_1^2.$$

Для рассматриваемого примера передаточная функция аппроксимирующего звена записывается в виде

$$W(s, G) = \frac{8.07}{\beta(s, G)} \cdot \exp(-\beta(s, G) \cdot 0.05929), \quad (G_n < G < \infty), \quad (18)$$

$$\beta(s, G) = \left(\frac{s}{0.001707} + G \right)^{1/2}.$$

Сравнение динамических характеристик. Сравним динамические характеристики объекта (7) и аппроксимирующего звена (16). На рис. 10 приведены графики рассогласования модулей (модуль звена (7) – модуль звена(16)) и фаз (фаза звена (7) – фаза звена (16)), построенные по результатам вычислений. Результаты вычислений показывают, что рассогласование модулей не более 0.065. Запишем аналитические соотношения для определения рассогласования фаз звена (9) и (18). Рассматриваемые соотношения запишем с использованием обобщенной координаты

$$W(s, G) = \frac{K}{\beta(s, G)} \cdot \exp(-\beta(s, G) \cdot \Delta z), \quad (19)$$

$$s = j\omega,$$

$$\beta(j\omega, G) = \left(\frac{j\omega}{a} + G \right)^{1/2} = M(\omega, G) \cdot (\cos(\varphi_1 / 2) + j \cdot \sin(\varphi_1 / 2)),$$

$$M(\omega, G) = ((\omega / a)^2 + G^2)^{1/4}, \quad \varphi_1 = \arctan(\omega / (a \cdot G)).$$

$$\varphi(\omega, G) = -\varphi_1 / 2 - M(\omega, G) \cdot \Delta z \cdot \sin(\varphi_1 / 2)$$

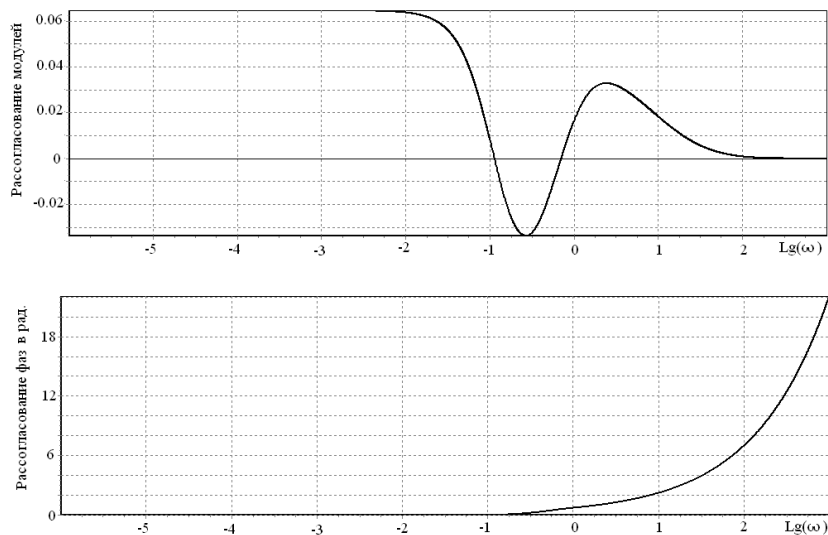


Рис. 10. Рассогласование динамических характеристик

Используя (19) вычислим рассогласование фаз звена (9) и (18). В результате вычислений получено – рассогласование фаз, при $\omega > 0.01$ становится достаточно большим.

Это рассогласование связано с отклонением параметров звена, полученных в результате численного моделирования распределенного объекта ($a=0.001707$, $\Delta z=0.05929$, $K=8.07$) от параметров объекта, используемых при аналитическом решении ($a=0.002$, $\Delta z=0.02$, $K=1/\lambda=1/0.23=4.35$).

Приведем оценочные расчеты рассогласования фаз при «больших» значениях ω

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \varphi_0(\omega, G) - \varphi_a(\omega, G) = -\varphi_{10} / 2 - M_0(\omega, G) \cdot \Delta z_o \cdot \sin(\varphi_{10} / 2) - \\ &(-\varphi_{1a} / 2 - M_a(\omega, G) \cdot \Delta z_a \cdot \sin(\varphi_{1a} / 2)) \approx \\ &\approx -((\omega / a_o)^2 + G^2)^{1/4} \cdot \Delta z_o \cdot \sin(\varphi_{10} / 2) + ((\omega / a_a)^2 + G^2)^{1/4} \cdot \Delta z_a \cdot \sin(\varphi_{1a} / 2), \end{aligned} \quad (20)$$

где индексом о – помечены параметры объекта, а индексом а-помечены параметры аппроксимирующего звена.

В результате моделирования получено: $a_a=0.001707 < a_o=0.002$; $\Delta z_a=0.05929 > \Delta z_o=0.02$, полученные соотношения, с учетом (20), объясняют тенденцию возрастания рассогласования фаз, при увеличении частоты.

Полученные результаты показывают отличие динамических характеристик распределенного объекта от динамических характеристик дискретной модели рассматриваемого объекта.

Заключение. Из приведенных исследований следует, что модель (19), может использоваться для аппроксимации передаточных функций распределенных объектов. Разработана методика определения параметров аппроксимирующего звена. Представленная методика ориентирована на использование результатов численного моделирования или экспериментальных исследований на физическом объекте и носит конструктивный характер. При синтезе распределенных систем управления, рассогласование динамических характеристик распределенного объекта и его аппроксимационной модели может быть учтено при формировании требований к запасам устойчивости по модулю и по фазе. Приведенные результаты численного моделирования распределенного объекта показывают, что динамические характеристики численной модели распределенного объекта отличается от динамических характеристик, полученных аналитически с использованием решения краевой задачи. Это объясняется известным фактом, что при представлении распределенного объекта его дискретной моделью, теряются некоторые свойства исходного распределенного объекта [3, 7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Venot A., Pronrato L., Walter E. And Lebrucnec J.F. A Distribution-free criterion for "Robust Identification, with Applications in systems Modelling and Image Processing // Automatica. – 1986. – Vol. 22, No. 1. – P. 105-109.
2. Pasca La., Levis A.H. and Jin V.Y.-Y. On the design of Distributed Organisational structures // Automatica. – 1988. – Vol. 24, No. 1. – P. 81-86.
3. Валеев К.Г., Жаутыков О.А. Бесконечные системы дифференциальных уравнений. – Алма-Ата: Наука Казахской ССР, 1974. – 415 с.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
5. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Кн. 1. Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования / Под ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1967. – 768 с.
6. Малков А.В., Першин И.М. Синтез распределенных регуляторов для систем управления гидролитосферными процессами. – М.: Научный мир, 2007. – 364 с.
7. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. – М.: Научный мир, 2012. – 476 с.

8. *Першин И.М.* Синтез систем с распределенными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 6. – С. 2-4.
9. *Воронин А.Ю., Першин И.М.* Синтез распределенной системы управления магнитным полем тороидальной камеры. Ч. 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 8. – С. 51-56.
10. *Воронин А.Ю., Першин И.М.* Синтез распределенной системы управления магнитным полем тороидальной камеры. Ч. 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 12. – С. 36-42.
11. *Першин И.М., Малков А.В., Дубогрей В.Ф.* Методика синтеза распределенных систем управления режимами эксплуатации месторождений минеральных вод // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2012. – № 2. – С. 76-81.
12. *Першин М.И.* Проектирование системы управления параметрами Кисловодского месторождения минеральных вод. Технологии развития курортно-рекреационного комплекса СКФО // Сборник трудов 2-й ежегодной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых СКФУ "Университетская наука – региону". Т. 1. – Пятигорск: Изд-во СКФУ, 2014. – С. 143-156.
13. *Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И.* Синтез распределенных систем управления гидролитосферными процессами месторождений минеральных вод // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 8 (157). – С. 123-137.
14. *Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Pershin I.M.* Analysis of the Caucasus Mineral Waters' Field's Modeling // Modern Applied Science. – 2015. – Vol. 9, No. 1. – P. 204-210. ISSN 1913-1844 E-ISSN 1913-1852. Published by Canadian Center of Science and Education.
15. *Alexander B. Chernyshev, Karina V. Martirosyan.* Analysis of the nonlinear distributed control system's sustainability // Journal of Mathematics and Statistics. – 2014. – No. 10 (3). – P. 316-321.
16. *Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Kapuylova T.S.* The model of mineral water deposits sustainable management using the decision support system // World Applied Sciences Journal. – 2013. – No. 27. – P. 101-106.
17. *Martirosyan A.V., Martirosyan K.V.* Modeling of information system "Caucasus Mineral Water's hydromineral resources" // 4th International Scientific and Practical Conference "Science and Society". – London: SCIEURO, 2013. – P. 16-24.
18. *Martirosyan A.V., Yanukyan E.G., Martirosyan K.V.* Methods of complex object's transfer function calculation for distributed control system // Journal of Mathematics and Statistics. – 2014. – No. 10 (3). – P. 23-27.
19. *Григорьев В.В., Першин И.М., Мансурова О.К.* Расширение качественной экспоненциальной устойчивости на линейные распределенные системы. Техногенные процессы в гидролитосфере (идентификация, диагностика, прогноз, управление) // Сборник докладов национального научного форума «НАРЗАН – 2013». – Пятигорск: РИА–КМВ, 2013. – С. 540-553.
20. *William By Porter A.* Sensitivity problems in distributive systems // Int. J. Control. – 1976. – Vol. 5. – P. 159-177.

REFERENCES

1. *Venot A., Pronrato L., Walter E. And Lebrucnec J.F.* A Distribution-free criterion for "Robust Identification, with Applications in systems Modelling and Image Processing, *Automatica*, 1986, Vol. 22, No. 1, pp. 105-109.
2. *Pasca La., Levis A.H. and Jin V.Y.-Y.* On the design of Distributed Organisational structures, *Automatica*, 1988, Vol. 24, No. 1, pp. 81-86.
3. *Valeev K.G, Zhautykov O.A.* Beskonechnye sistemy differentsial'nykh uravneniy [Infinite system of differential equations]. Alma-Ata: Nauka Kazakhskoy SSR, 1974, 415 p.
4. *Lykov A.V.* Teoriya teploprovodnosti [Theory of thermal conductivity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 599 p.
5. *Tekhnicheskaya kibernetika. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. Kn. 1. Matematicheskoe opisanie, analiz ustoychivosti i kachestva sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Technical Cybernetics. The theory of automatic regulation. Book 1. Matematica-mechanical description and analysis of the stability and quality of automatic control systems], By ed. V.V. Solodovnikova. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 768 p.*

6. *Malkov A.V., Pershin I.M.* Sintez raspredelennykh regulyatorov dlya sistem upravleniya gidrolitosfernymi protsessami [The synthesis of distributed controllers for systems management processes hydrolithosphere]. Moscow: Nauchnyy mir, 2007, 364 p.
7. *Malkov A.V., Pershin I.M.* Sistemy s raspredelennymi parametrami. Analiz i sintez [System with distributed parameters. Analysis and synthesis]. Moscow: Nauchnyy mir, 2012, 476 p.
8. *Pershin I.M.* Sintez sistem s raspredelennymi parametrami [Synthesis of systems with distributed parameters], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2005, No. 6, pp. 2-4.
9. *Voronin A.Yu., Pershin I.M.* Sintez raspredelennoy sistemy upravleniya magnitnym polem toroidal'noy kamery [Synthesis of distributed control system for a toroidal magnetic field camera]. Part 1, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2006, No. 8, pp. 51-56.
10. *Voronin A.Yu., Pershin I.M.* Sintez raspredelennoy sistemy upravleniya magnitnym polem toroidal'noy kamery [Synthesis of distributed system of magnetic field toroidal chamber]. Part 2, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2006, No. 12, pp. 36-42.
11. *Pershin I.M., Malkov A.V., Dubogrey V.F.* Metodika sinteza raspredelennykh sistem upravleniya rezhimami ekspluatatsii mestorozhdeniy mineral'nykh vod [The technique of synthesis of distributed control systems modes of operation of deposits of mineral waters], *Izvestiya vys-shikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* [Proceedings of Higher Schools. Geology and Exploration], 2012, No. 2, pp. 76-81.
12. *Pershin M.I.* Proektirovanie sistemy upravleniya parametrami Kislovodskogo mestorozhdeniya mineral'nykh vod. Tekhnologii razvitiya kurortno-rekreatsionnogo kompleksa SKFO [The design of the control system parameters Kislovodsk mineral water deposits. Technology for the development of resort-recreational complex of the North Caucasus Federal district], *Sbornik trudov 2-y ezhegodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii prepodavateley, studentov i molodykh uchenykh SKFU "Universitetskaya nauka – regionu"* [Proceedings of the 2nd annual scientific-practical conference of teachers, students and young scientists of NCFU "University science – the region"]. Vol. 1. Pyatigorsk: Izd-vo SKFU, 2014, pp. 143-156.
13. *Pershin I.M., Veselov G.E., Pershin M.I.* Sintez raspredelennykh sistem upravleniya gidrolitosfernymi protsessami mestorozhdeniy mineral'nykh vod [Synthesis of distributed control systems gidrolitosfernymi processes mineral waters], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 8 (157), pp. 123-137.
14. *Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Pershin I.M.* Analysis of the Caucasus Mineral Waters' Field's Modeling, *Modern Applied Science*, 2015, Vol. 9, No. 1, pp. 204-210. ISSN 1913-1844 E-ISSN 1913-1852. Published by Canadian Center of Science and Education.
15. *Alexander B. Chernyshev, Karina V. Martirosyan.* Analysis of the nonlinear distributed control system's sustainability, *Journal of Mathematics and Statistics*, 2014, No. 10 (3), pp. 316-321.
16. *Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Kapylova T.S.* The model of mineral water deposits sustainable management using the decision support system, *World Applied Sciences Journal*, 2013, No. 27, pp. 101-106.
17. *Martirosyan A.V., Martirosyan K.V.* Modeling of information system "Caucasus Mineral Water's hydromineral resources", *4th International Scientific and Practical Conference "Science and Society"*. London: SCIEURO, 2013, pp. 16-24.
18. *Martirosyan A.V., Yanukyan E.G., Martirosyan K.V.* Methods of complex object's transfer function calculation for distributed control system, *Journal of Mathematics and Statistics*, 2014, No. 10 (3), pp. 23-27.
19. *Grigor'ev V.V., Pershin I.M., Mansurova O.K.* Rasshirenie kachestvennoy eksponentsial'noy ustoychivosti na lineynye raspredelennye sistemy. Tekhnogennye protsessy v gidrolitosfere (identifikatsiya, diagnostika, prognoz, upravlenie) [The expansion of qualitative exponential stability for linear distributed systems. Technogenic processes in hydrolithosphere (identification, diagnosis, prognosis, management)], *Sbornik dokladov natsional'nogo nauchnogo foruma «NARZAN – 2013»* [A collection of reports of the national research forum "NARZAN – 2013"]. Pyatigorsk: RIA-KMV, 2013, pp. 540-553.
20. *William By Porter A.* Sensitivity problems in distributive systems, *Int. J. Control*, 1976, Vol. 5, pp. 159-177.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Малков.

Першин Иван Митрофанович – Северо-Кавказский федеральный университет, филиал в г. Пятигорске; e-mail: ivmp@yandex.ru; 357500, г. Пятигорск, просп. 40 лет октября, 56; тел.: 88793973927; кафедра управления в технический и биомедицинских системах; зав. кафедрой; профессор.

Веселов Геннадий Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: gev@sfedu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: +78634360450; Институт компьютерных технологий и информационной безопасности; директор.

Першин Максим Иванович – e-mail: maksimpershin@bkmail.ru; тел.: 89280093030; Институт компьютерных технологий и информационной безопасности; аспирант.

Pershin Ivan Mitrofanovich – North-Caucasian Federal University, a branch in the town of Pyatigorsk; e-mail: ivmp@yandex.ru; 357500, Pyatigorsk, ave. 40 years on October 56; phone: +78793973927; the department of management of technical and biomedical systems; head of department; professor.

Veselov Gennady Evgen'evich – Southern Federal University; e-mail: gev@sfedu.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634360450; Institute of Computer Technology and Information Security; director.

Pershin Maksim Ivanovich – e-mail: maksimpershin@bkmail.ru; phone: +79280093030; Institute of Computer Technology and Information Security; postgraduate student.

УДК 004.94

В.Н. Гридин, В.И. Анисимов, А.А. Осман

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ВЕБ-СЛУЖБ .NET ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Основной целью статьи является рассмотрение особенностей решения задачи внедрения Интернет-технологий при построении распределенных систем автоматизации схмотехнического проектирования. Показывается, что при построении веб-служб для систем автоматизации схмотехнического проектирования необходимо организовать эффективную передачу и получение большого числа аргументов с простыми и сложными типами данных. Основной проблемой организации клиент-серверных взаимодействий в этом процессе является необходимость работы с многомерными массивами, которые относятся к сложным типам данных. Отмечается, что при этом необходимо учитывать возможную работу веб-службы в гетерогенных средах, когда клиентские и серверные приложения, написаны на различных языках. Для обеспечения гарантированного совместного функционирования клиентских и серверных приложений в гетерогенных средах, предлагается отказаться от передачи информации между такими приложениями через многомерные массивы. Поскольку для описания всех компонентов электронных схем используются двумерные массивы, то единственным решением проблемы является их предварительная упаковка в одномерные массивы с последующей передачей упакованных массивов в качестве аргументов методу веб-службы. Аналогичную процедуру упаковки многомерных массивов следует выполнить перед передачей результатов работы веб-службы клиентскому приложению. Приводится методика приведения сложных типов данных к единой форме, что обеспечивает надежность клиент-серверных взаимодействий в гетерогенных средах. Показывается, что WSDL-документ веб-службы не содержит всей необходимой информации для построения клиентских приложений и устанавливается структура дополнительного информационного метода, который должен входить в состав веб-службы. Использование предлагаемой методики построения веб-служб для распределенных систем автоматизации схмотехнического проектирования позволяет существенно повысить эффективность функционирования таких систем.

Системы автоматизированного проектирования; автоматизация схмотехнического проектирования; Интернет-технологии; веб-службы; распределенные системы.