



УДК 681.5

*А. Л. Ляшенко, Е. К. Грудяева*

## **СИНТЕЗ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ВЫСОКОТОЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ПО ПОКАЗАТЕЛЮ КОЛЕБАТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

*Рассмотрена возможность использования аппарата расширенных частотных характеристик (РЧХ) для систем с распределенными параметрами. Сформулирована и решена задача по разработке методики синтеза систем с распределенными параметрами с помощью РЧХ. Разработанная методика позволяет синтезировать распределенный высокоточный регулятор по заданному показателю колебательности.*

**Системы с распределенными параметрами, расширенные частотные характеристики, распределенный высокоточный регулятор, передаточные функции распределенных объектов**

На сегодняшний день известны следующие направления в решении проблемы синтеза регуляторов для распределенных систем:

1. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов, рассматриваемое в работах Т. К. Сиразетдинова, Г. Л. Дегтярева и др.

2. Частотный метод анализа и синтеза, рассмотренный в работах В. А. Бесекерского, Е. П. Попова, В. В. Солодовникова, И. М. Першина и др.

3. Параметрический синтез регуляторов, при котором задается структура распределенного регулятора, а параметры его подбираются в процессе экспериментальных исследований. Основные вопросы параметрического синтеза регуляторов на основе структурной теории рассмотрены в трудах А. Г. Бутковского, В. Л. Рожанского, И. М. Бегимова.

Остановимся более подробно на втором направлении. В настоящее время частотные методы синтеза распределенных регуляторов основываются на применении обычных частотных характеристик [1], при этом, как правило, накладываются ограничения на запас устойчивости по модулю и фазе. В данной статье представлена методика расчета настроек распределенного высокоточного регулятора с применением расширенных частотных характеристик объекта управления, при этом накладываются ограничения на степень колебательности  $m$  переходного процесса.

*Постановка задачи.* Для системы управления распределенным объектом (задана его математическая модель либо имеется возможность проводить экспериментальные исследования с реальным объектом) необходимо синтезировать распределенный высокоточный регулятор. При этом на запасы устойчивости системы наложены следующие ограничения:

- запасы по модулю  $\Delta L \geq \Delta L_{\text{зад}}$ ;
- запасы по фазе  $\Delta \varphi \geq \Delta \varphi_{\text{зад}}$ ;
- степень колебательности  $m = m_{\text{зад}}$ .

Передаточная функция синтезируемого регулятора согласно [2] имеет вид

$$W(x, y, s) = E_1 \left[ \frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \left[ \frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \frac{1}{s} + E_2 \left[ \frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] s,$$

где  $E_1, E_2, E_4$  – коэффициенты усиления;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2};$$

$n_1, n_2, n_4$  – весовые коэффициенты.

*Анализ объекта управления.* Математическая модель имеет вид

$$\frac{\partial Q(x, y, z, t)}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right),$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z.$$

Граничные и начальные условия задаются следующими соотношениями:

$$Q(x, 0, z, \tau) = Q(x, L_y, z, \tau) = 0,$$

$$\frac{\partial Q(0, y, z, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial Q(L_x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0,$$

$$\lambda \frac{\partial Q(x, y, z, \tau)}{\partial z} = U(x, y, \tau),$$

$$\frac{\partial Q(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = 0,$$

$$Q(x, y, z, 0) = 0.$$

Математическая модель объекта описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных. Передаточные функции таких объектов управления могут быть представлены в виде совокупности передаточных функций по каждой пространственной моде [2]. Известно [1], что для тепловых объектов управления передаточные функции по каждой моде входного воздействия могут быть аппроксимированы передаточными функциями вида

$$W_\eta(s) = \frac{K_\eta}{T_\eta s + 1} e^{-\tau_\eta s}, \quad \eta = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Значения параметров  $K_\eta$ ,  $T_\eta$ ,  $\tau_\eta$  определяются по результатам численного моделирования.

Для этого на вход системы подадим входное воздействие вида

$$\alpha(x, y, s) = C_{\eta, \gamma}(s) \sin(\Psi_\eta x) \sin(\bar{\Psi}_\gamma y),$$

где  $C_{\eta, \gamma} = e^{j\omega\tau}$ ,  $\Psi_\eta = \pi\eta/x_l$ ,  $\bar{\Psi}_\gamma = \pi\gamma/r_l$ .

При определении указанных параметров для  $\eta=1, 3$  учитывались динамические свойства процесса распространения теплового поля внутри объекта.

Для частотного анализа объекта положим в (1)

$$s = \omega(j - m)$$

( $\omega$  – круговая частота,  $m$  – степень колебательности) и определим модуль  $M_\eta$  и фазу  $\varphi_\eta$  [3], [4]:

$$M_\eta(m, \omega) = \frac{K_n}{\sqrt{(1 - T_n m \omega)^2 + T_n^2 \omega^2}} e^{m\pi\omega},$$

$$\varphi_\eta(m, \omega) = -\omega \tau_\eta - \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\left(\frac{T_n m \omega - 1}{T_n \omega}\right).$$

По результатам вычислений строим расширенные частотные характеристики.

*Процедура синтеза.* Положим, что фазовый сдвиг, вносимый в систему регулятором, равен нулю. Тогда для определения частот среза модуля разомкнутой системы получим следующие выражения:

$$-\pi + \Delta\varphi_\eta = W(m, j\omega, \eta, \gamma), \quad (2)$$

$$-\pi + \Delta\varphi_\eta = -\omega \tau_\eta - \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\left(\frac{T_n m \omega - 1}{T_n \omega}\right),$$

где  $W(m, j\omega, \eta, \gamma)$  – комплексный передаточный коэффициент объекта управления, определенный численным способом.

Подставляя значения  $T_\eta$ ,  $\tau_\eta$  и  $\Delta\varphi_\eta = \pi/6$  в (2), определим значения частот среза модуля. Подставляя  $\omega = \omega_1$ ,  $\omega = \omega_3$  в выражение

$$\lg \omega = 0.5 \lg K_4(G) - \lg K_2(G),$$

получим систему уравнений:

$$\lg \omega_1 = 0.5 \lg \left( E_4 \left[ \frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{G_1}{n_4} \right] \right) - 0.5 \lg \left( E_2 \left[ \frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{G_1}{n_2} \right] \right), \quad (3)$$

$$\lg \omega_3 = 0.5 \lg \left( E_4 \left[ \frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{G_3}{n_4} \right] \right) - 0.5 \lg \left( E_2 \left[ \frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{G_3}{n_2} \right] \right). \quad (4)$$

Вычитая (3) из (4) придем к следующему результату:

$$\lg \Delta \omega^2 = \lg \left( \frac{n_4 - 1 + G_3}{n_4 - 1 + G_1} \right) - \lg \left( \frac{n_2 - 1 + G_3}{n_2 - 1 + G_1} \right). \quad (5)$$

Используя (5), найдем значения  $n_2, n_4$ . Так как  $\Delta \omega^2 > 1$ , то положим в (3)  $n_2 = \infty$ . Тогда  $n_4$  определяется соотношением

$$n_4 = \frac{\Delta \omega^2 - 1 + G_3 - \Delta \omega^2 G_1}{\Delta \omega^2 - 1},$$

где  $G_1 = \Psi_1 + \overline{\Psi_1} = \frac{\pi \cdot 1}{X_l} + \frac{\pi \cdot 1}{Y_L}$ ,  $G_3 = \Psi_3 + \overline{\Psi_3} = \frac{\pi \cdot 3}{X_l} + \frac{\pi \cdot 3}{Y_L}$ .

Рассматривая совместно уравнение

$$\lg \omega_1 = 0.5 \lg \left( E_4 \left[ \frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{G_1}{n_4} \right] \right) - 0.5 \lg \left( E_2 \left[ \frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{G_1}{n_2} \right] \right)$$

и уравнения:

$$\lg \omega_1 = \lg \left( \frac{1}{K_2(G_1)} \right), \quad \lg \omega_2 = \lg K_4(G_1)$$

получим  $E_4, E_2$ .

Введем параметр  $\Delta G_1$ , выбор значения которого связан с возможностью компенсации параметрических возмущений объекта управления. Для этого к уравнению

$$\lg \omega G_1 = 0.5 \lg [K_4 G_1] - 0.5 \lg [K_2 G_1]$$

допишем уравнение, связывающее параметры  $K_4 G_1$  и  $K_2 G_1$  с параметром  $\Delta G_1$ .

Уравнение связи может быть представлено в виде

$$\Delta G_1 = \lg \omega_1 - \lg \omega_2, \quad (6)$$

$$\Delta G_1 = \lg \left[ \frac{1}{K_2 G_1} \right] - \lg [K_4 G_1].$$

Из полученной системы уравнений (6) найдем  $E_2$  и  $E_4$ .

Подставляя значения  $\omega = \omega_1, \omega = \omega_3$  в уравнение

$$M_{\eta}(m, \omega) = \frac{k_n}{\sqrt{(1 - T_n m \omega)^2 + T_n^2 \omega^2}} e^{m \tau \omega},$$

определим значения модуля  $M_1, M_3$ .

Так как  $\omega = \omega_1, \omega = \omega_3$  являются частотами среза модуля разомкнутой системы, то коэффициенты усиления регулятора в этих точках равны:

$$\overline{M}_1 = (M_1)^{-1}, \quad \overline{M}_3 = (M_3)^{-1}.$$

Определим параметры  $n_1$ ,  $E_1$ :

$$\overline{M}_1 = E_1 \left[ \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G_1}{n_1} \right], \quad (7)$$

$$\overline{M}_3 = E_1 \left[ \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G_3}{n_1} \right]. \quad (8)$$

Поделив (7) на (8), придем к следующему результату:

$$n_1 = \frac{\Delta M - 1 - \Delta M \frac{G_1 + G_3}{\Delta M - 1}}{\Delta M - 1}.$$

Подставляя значения  $n_1$ ,  $\overline{M}_1$ ,  $G_1$  в (7) получим  $E_1$ .

Рассчитав параметры регулятора по изложенной методике, запишем передаточную функцию распределенного высокоточного регулятора:

$$W(x, y, s) = 5.99197 \left[ \frac{246.245 - 1}{246.245} - \frac{1}{246.246} \nabla^2 \right] + \\ + 0.085964 \left[ \frac{15707.189 - 1}{15707.189} - \frac{1}{15707.189} \nabla^2 \right] \frac{1}{s} + 3.664 \left[ 1 - 0 \cdot \nabla^2 \right] s.$$

После преобразования получим:

$$W(x, y, s) = 5.99197 \left[ 0.995939 - 0.00406 \nabla^2 \right] + \\ + 0.085964 \left[ 0.999936 - 0.000063 \nabla^2 \right] \frac{1}{s} + 3.664 \left[ 1 - 0 \cdot \nabla^2 \right] s.$$

С помощью разработанной методики были рассчитаны распределенные высокоточные регуляторы для различных объектов управления. Результаты моделирования замкнутых систем управления свидетельствуют о положительном качестве управления в полном соответствии с предъявляемыми к системам требованиями. Из этого можно сделать вывод, что разработанная методика позволяет рассчитывать настройки распределенного регулятора, реализующего пропорционально-интегрально-дифференциальный закон управления, по заданному значению степени колебательности, а следовательно, и требуемой степени затухания переходного процесса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Першин И. М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: РИА на КМВ, 2007.
2. Рапорт Э. Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высш. шк., 2003.
3. Дудников Е. Г. Основы автоматического регулирования тепловых процессов: Учеб. пособие для вузов. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956.
4. Лазарева Т. Я., Мартемьянов Ю. Ф. Основы теории автоматического управления: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003.

*SYNTHESIS OF THE DISTRIBUTED HIGH-PRECISION REGULATOR ACCORDING TO THE INDEX OF OSCILLATION FOR THE SYSTEM WITH THE DISTRIBUTED PARAMETERS*

*The possibility of use of the device of the expanded frequency characteristics for systems with the distributed parameters is considered. The problem on working out of a technique of synthesis of systems with the distributed parameters by means of the expanded frequency characteristics is formulated and solved. The developed technique allows to make synthesis distributed high-precision regulator on the set index of oscillation.*

**Systems with the distributed parameters, the expanded frequency characteristics, distributed high-precision regulator, transfer functions of the distributed objects**

УДК 28;50

*T. B. Кухарова*

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

*Психическое состояние человека-оператора существенно влияет на технологическую безопасность. Предложен метод определения наличия психического расстройства по результатам измерения параметров кожной электропроводности, позволяющий построить модель наблюдателя психического состояния человека.*

**Технологическая безопасность, психическое состояние, фазовое пространство человеческого организма, параметры кожной электропроводности, дискриминантный анализ, классифицирующие функции**

Современное технологическое оборудование в большой степени механизировано и автоматизировано, однако часть функций и общий контроль любого технологического процесса осуществляются человеком. В связи с этим физическое и психическое состояние человека-оператора существенно влияет на технологическую безопасность.

Особые трудности связаны с определением психического состояния человека, так как психолог при этом в значительной мере использует субъективные представления. Чтобы определить возможность допуска работника к исполнению своих обязанностей, представляется рациональным использовать объективные, но в то же время неинвазивные инструментальные методики оценки психического состояния человека.

Человеческий организм представляет собой сложную, многомерную и нелинейную систему. Состояние человеческого организма характеризуется огромным количеством различных по своей природе параметров: биологических, биохимических, физических, электрофизиологических.

Параметры, зависящие от психического состояния человека (норма или патология), рассматриваем как переменные состояния объекта (человеческого организма), а функции, позволяющие на основе отобранных параметров различить эти состояния – как функции выхода объекта.

Такой подход дает возможность не только диагностировать наличие психического расстройства, но и, при соответствующей постановке эксперимента, определить параметры входных воздействий, переводящие человека в состояние нормы. В качестве входных воздействий на практике могут выступать применяемые для лечения психических патоло-