

11. Kopyltsov A. V. On software quality estimation // 3-я Санкт-Петербург. междунар. конф. «Региональная информатика-94». СПб., 1994. С. 181–185.

12. Копыльцов А. В. Об оценке качества программного обеспечения // Проблемы информатизации (теоретич. и науч.-практ. журн.). СПб., 1994. Вып. 3–4. С. 46–49.

13. Валиев М. К., Кругляков С. В., Юрченко А. А. Функциональное программирование. М.: Знание, 1989.

14. Billingsley P. Ergodic Theory and Information. New York: John Wiley and Sons, 1965.

15. Корнфельд И. П., Синай Я. Г., Фомин С. В. Эргодическая теория. М.: Наука, 1980.

16. Moon P. O. Chaotic Vibrations. Inc. New York: John Wiley and Sons, 1987.

17. Колмогоров А. Н. Алгоритм, информация, сложность. М.: Знание, 1991.

18. Grassberger P., Procaccia I. Characterization of Strange Attractors // Phys. Rev. Lett. 1983. Vol. 50. P. 346–349.

19. Агеев М. И., Алик В. П., Марков Ю. И. Библиотека алгоритмов. М.: Сов. радио, 1976.

A. V. Kopyltsov, V. V. Tsehanovsky
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

APPLICATION OF THE THEORY OF DYNAMIC SYSTEMS FOR SOFTWARE QUALITY ESTIMATION

An approach for software quality estimation by using the tools of the theory of dynamic systems is proposed. If the programs created using algorithmic programming languages are considered to be dynamic systems, then it is possible to estimate the informational entropy and the fractal dimension of the trajectory in the phase space of the program variables. The fractal dimension and entropy can be taken as indicators of quality, as a measure of complexity of a software product. If there are several programs written on the basis of the same algorithm, the values of their informational entropies and fractal dimensions can be used to compare the programs and find out which of the programs implementing the algorithm is more complicated. This approach can be extended to assess the quality of software and hardware, as well as programming languages and other software tools.

Software quality, dynamic system, fractal dimension, informational entropy

УДК 681.5

Ю. В. Ильюшин

Санкт-Петербургский горный университет

М. Ю. Шестопапов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Применение модифицированного критерия Найквиста для анализа импульсных распределенных систем

Классические результаты теории автоматического управления получены в большинстве случаев применительно к системам с сосредоточенными параметрами, поведение которых однозначно характеризуется изменением управляемых величин только во времени и описывается чаще всего обыкновенными дифференциальными уравнениями, что не дает возможности расширения области применения таких систем. В статье рассматривается модификация критерия абсолютной устойчивости Найквиста для применения его в теории систем с распределенными параметрами. Исследованы предельные характеристики параметров, влияющих на вид и форму пространственных годографов типовых распределенных звеньев. Разработан модифицированный критерий абсолютной устойчивости нелинейных распределенных систем управления. Разработан метод анализа абсолютной устойчивости класса нелинейных распределенных систем управления. На примере рассмотрено построение пространственно-распределенного годографа и построена область устойчивости рассматриваемой системы.

Системный анализ, управление, распределенные системы, абсолютная устойчивость

В современных условиях динамически развивающегося рынка минерально-сырьевого сектора все большую роль играет возможность снижения

себестоимости продукции. Добыча нефти является одной из таких отраслей. Системы автоматизации такого технологического процесса создава-

лись еще в 1980-е гг., и с тех пор мало изменились. Такие системы зачастую описываются линейными уравнениями первого или второго порядка, или же дифференциальными уравнениями, или системами обыкновенных дифференциальных уравнений без учета пространственной распределенности исследуемого объекта. Таким образом, полученные методы не учитывают пространственно-временные параметры.

С целью увеличения качества регулирования необходимо рассматривать такие объекты более подробно и применять современный математический аппарат – теорию систем с распределенными параметрами. В таких системах управляемые величины зависят и от времени, и от пространственных координат. Поэтому такие системы обычно описывают дифференциальными уравнениями в частных производных. Данный подход существенно усложняет существующий математический аппарат анализа и синтеза систем управления. Многие положения и догмы требуют адаптации под новые условия. В частности, критерии устойчивости, разработанные для анализа сосредоточенных систем, не применимы для распределенных. Они нуждаются в адаптации. Критерий абсолютной устойчивости релейных систем (критерий устойчивости Попова), был адаптирован Чернышевым А. Б. Однако он не применим при рассмотрении цифровых устройств. Таким образом, в данной работе ставится задача, направленная на развитие теории систем с распределенными параметрами, разработку новых методов анализа устойчивости регуляторов нелинейных распределенных систем управления.

Постановка задачи и ее решение. С целью решения указанных задач рассмотрим импульсную распределенную систему. Положим, что рассматриваемая система принадлежит к классу пространственно-инвариантных. Передаточная функция распределенного корректирующего устройства записывается в виде:

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

где E_1, E_2, E_4 – заданные коэффициенты; n_1, n_2, n_4 – весовые множители ($n_i \geq 1$); s – некоторое число.

Исследуемый распределенный объект управления – пластина из однородного (изотропного) материала с заданным коэффициентом теплопроводности a , имеющей пространственные координаты x, y, z .

В качестве входного воздействия будем рассматривать тепловой поток $U(x, y, \tau)$ поступающий на объект во времени τ [1]–[4].

Математическая модель такого объекта будет описываться следующим уравнением:

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

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

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

Граничные и начальные условия для рассматриваемого объекта имеют вид:

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

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

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

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

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, входное воздействие может быть представлено в виде:

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

где $\psi_{\eta} = \pi \eta / x_L$; $\tilde{\varphi}_{\gamma} = \pi \gamma / y_L$.

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

$$W_{0, \eta, \gamma}(s) = \frac{\exp(\beta_{\eta, \gamma} z^*) + \exp(-\beta_{\eta, \gamma} z^*)}{\lambda \beta_{\eta, \gamma} [\exp(\beta_{\eta, \gamma} z_L) - \exp(-\beta_{\eta, \gamma} z_L)]},$$

$$(\eta, \gamma = \overline{1, \infty}),$$

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

где λ – коэффициент теплопроводности. В [1]–[4] введено понятие обобщенной координаты (G), дискретные значения которой $G_{\eta, \gamma}$ определяются из соотношения:

$$G_{\eta,\gamma} = \psi_{\eta}^2 + \tilde{\varphi}_{\gamma}^2, \quad \eta, \gamma = \overline{1, \infty}.$$

Запишем передаточную функцию объекта с использованием обобщенной координаты G :

$$\begin{aligned} W_0(G_{\eta,\gamma}, s) &= \\ &= \frac{\exp(\beta(G_{\eta,\gamma}z^*)) + \exp(-\beta(G_{\eta,\gamma}z^*))}{\lambda\beta(G_{\eta,\gamma}) \left[\exp(\beta(G_{\eta,\gamma})z_L) - \exp(-\beta(G_{\eta,\gamma})z_L) \right]}, \\ \beta &= \left(\frac{s}{a} + G_{\eta,\gamma} \right)^{1/2}. \end{aligned}$$

Таким образом, на основании методик, полученных в [1]–[6], можно записать функцию пространственно-распределенного корректирующего звена следующим образом:

$$\begin{aligned} W_H(G_{\eta,\gamma}, s) &= \left[E_1 \left(\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_{\eta,\gamma} \right) + \right. \\ &+ E_4 \left(\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{1}{n_4} G_{\eta,\gamma} \right) \frac{1}{s} + \\ &+ E_2 \left(\frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{1}{n_2} G_{\eta,\gamma} \right) s \left. \right] \times \\ &\times \frac{\exp(\beta(G_{\eta,\gamma}z^*)) + \exp(-\beta(G_{\eta,\gamma}z^*))}{\lambda\beta(G_{\eta,\gamma}) \left[\exp(\beta(G_{\eta,\gamma})z_L) - \exp(-\beta(G_{\eta,\gamma})z_L) \right]}, \\ \beta &= \left(\frac{s}{a} + G_{\eta,\gamma} \right)^{1/2}. \end{aligned}$$

Функция, описывающая форму прямоугольного импульса, имеет вид:

$$W_f(s) = [1 - \exp(-st)]/s$$

Передаточная функция разомкнутой импульсной системы может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} W_P^*(G_{\eta,\gamma}, s) &= (1 - \exp(-st)) \frac{1}{s} \times \\ &\times \sum_{r=-\infty}^{r=\infty} \left(E_1 \left(\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_{\eta,\gamma} \right) + \right. \\ &+ E_4 \left(\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{1}{n_4} G_{\eta,\gamma} \right) \frac{1}{s} + \\ &+ E_2 \left(\frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{1}{n_2} G_{\eta,\gamma} \right) s \left. \right) \times \\ &\times \frac{\exp(\beta(G_{\eta,\gamma}z^*)) + \exp(-\beta(G_{\eta,\gamma}z^*))}{\lambda\beta(G_{\eta,\gamma}) \left[\exp(\beta(G_{\eta,\gamma})z_L) - \exp(-\beta(G_{\eta,\gamma})z_L) \right]}, \\ \beta &= \left(\frac{s + jr\omega_u}{a} + G_{\eta,\gamma} \right)^{1/2}, \\ \eta, \gamma &= \overline{1, \infty}. \end{aligned}$$

Передаточная функция разомкнутой импульсной системы по каждой пространственной моде может быть представлена в виде отношения трансцендентных функций.

Передаточная функция импульсной распределенной системы по η -, γ -контурам управления допускает эквивалентные преобразования.

Замкнутую распределенную систему со скалярной функцией входа структурно можно представить бесконечной совокупностью независимых контуров.

Передаточная функция замкнутой системы по выбранной пространственной моде может быть представлена в виде:

$$W_{\eta,\gamma}^{**}(s) = \frac{W^*(G_{\eta,\gamma}, s)}{1 + W^*(G_{\eta,\gamma}, s)}.$$

Пусть передаточная функция по η -, γ -контурам ($\eta, \gamma = \overline{1, \infty}$) управления имеет вид:

$$W_{\eta,\gamma}^{**}(s) = \frac{\Pi_{\eta,\gamma}(s)}{M_{\eta,\gamma}(s)},$$

$$\begin{aligned} M_{\eta,\gamma}(s) &= a_{0,\eta,\gamma} \exp(st) + a_{1,\eta,\gamma} \exp(2st) + \\ &+ a_{2,\eta,\gamma} \exp(3st) + a_{3,\eta,\gamma} \exp(4st) + \dots, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{\eta,\gamma}(s) &= b_{0,\eta,\gamma} \exp(st) + b_{1,\eta,\gamma} \exp(2st) + \\ &+ b_{2,\eta,\gamma} \exp(3st) + b_{3,\eta,\gamma} \exp(4st) + \dots, \end{aligned}$$

где M и Π – характеристические полиномы по η , γ пространственной моды a и b соответственно. Полагая $\exp(st) = z$, характеристический полином может быть записан в виде:

$$\begin{aligned} M_{\eta,\gamma}(z) &= a_{0,\eta,\gamma} z + a_{1,\eta,\gamma} z^2 + \\ &+ a_{2,\eta,\gamma} z^3 + a_{3,\eta,\gamma} z^4 + \dots \end{aligned}$$

Известно, что для устойчивости системы по η , γ пространственной моде, корни характеристического полинома должны находиться внутри окружности $r = 1$.

Работать с бесконечным набором окружностей не всегда удобно. Перейдем от набора окружностей по каждой пространственной моде к функциональной зависимости (G, s) . Для этого заменим $G_{\eta,\gamma}$ непрерывной функцией G с областью определения $[G = G_{1,1} \dots \infty]$.

В этом случае при изменении G до $G_{1,1} \dots \infty$ охватаются все дискретные значения функции $G_{\eta,\gamma}$, определенные для любых значений $\eta, \gamma \in [1, \infty]$. От совокупности окружностей, перейдем к цилиндру.

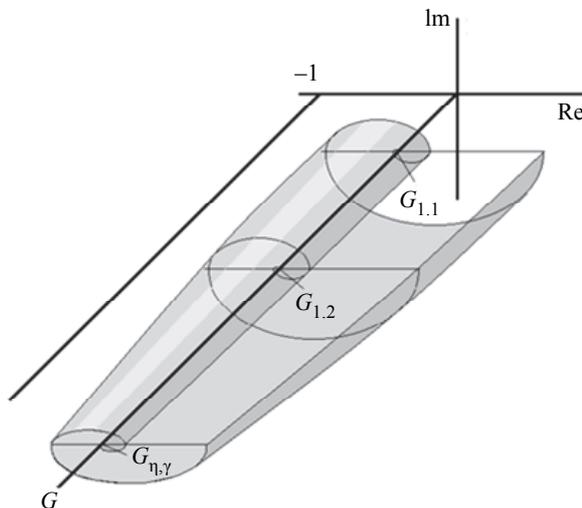
Критерий устойчивости импульсных распределенных систем формулируется следующим образом: для устойчивости импульсной распределенной системы достаточно, чтобы все корни характеристического полинома пространственных мод находились внутри цилиндра ($r = 1$, $G_{1,1} \leq G \leq \infty$).

С использованием обобщенной координаты передаточная функция замкнутой системы может быть записана в виде:

$$W^{**}(G, s) = \frac{W^*(G, s)}{1 + W^*(G, s)},$$

$$G_{1,1} \leq G \leq \infty.$$

В графическом виде это представлено на рисунке (пространственный годограф импульсной системы).



Приведенные исследования позволяют сформулировать критерий устойчивости Найквиста для импульсных распределенных систем: положим, что разомкнутая импульсная распределенная система не имеет полюсов, лежащих в правой полуплоскости, тогда для устойчивости замкнутой системы достаточно, чтобы при изменении ω от 0 до $\omega/2$

пространственный годограф $W^*(G, j\omega)$ не охватывал линию ($\text{Re} = -1$, $\text{Im} = 0$, G) (рисунок).

Таким образом, расширение возможностей критерия устойчивости Найквиста на класс систем с распределенными параметрами выполнена. Однако существует ограничение данного критерия. Система, проверяемая на устойчивость, должна принадлежать к классу пространственно-инвариантных.

В заключение хотелось бы отметить, что использование пространственно-распределенных систем управления требует не только детальной проработки математического аппарата, но и технических изменений в конструкции регуляторов. В частности, применение предложенного метода оценки абсолютной устойчивости позволило создать принципиально новое устройство – термобур с импульсными секционными нагревателями, что позволило снизить стоимость процесса добычи высокопарафинистой нефти на 5 %.

Другим примером внедрения полученных результатов является совершенствование технологии термообработки изделий в туннельных печах конвейерного типа. В частности, были созданы такие технические устройства, как карбидокремниевые нагревательные элементы с импульсными секционными нагревателями. Их внедрение в различные технологические процессы повлекло снижение себестоимости товара на 5...30 %.

В данной статье предложено развитие прикладной теории и методов синтеза распределенных нелинейных объектов управления.

Основные результаты работы:

- разработан модифицированный критерий абсолютной устойчивости нелинейных распределенных систем управления на основе критерия Найквиста [1]–[12];
- разработан метод анализа абсолютной устойчивости класса нелинейных распределенных систем управления.

Таким образом, результаты, представленные в данной статье, вносят вклад в развитие теории систем с распределенными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Першин И. М., Веселов Г. Е., Першин М. И. Системы передачи и обработки распределенной информации // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2015. № 5 (166). С. 198–211.
2. Малков А. В., Першин И. М., Помеляйко И. С. Математическая модель кислородного месторождения углекислых минеральных вод // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2015. № 7 (168). С. 116–125.
3. Першин И. М., Веселов Г. Е., Першин М. И. Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2015. № 7 (168). С. 126–138.
4. Першин И. М., Веселов Г. Е., Першин М. И. Синтез распределенных систем управления гидротитосферными процессами месторождений минеральных вод // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2014. № 8 (157). С. 123–137.
5. Ильюшин Ю. В., Чернышев А. Б. Устойчивость распределенных систем с дискретными управляющими воздействиями // Изв. ЮФУ. 2010. № 12. С. 166–171.
6. Ilyushin Yu. V., Afanaseva O. V. Analysis and processing of the hydrolitospheric plast information remote sensing through the theory of systems with distributed // Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2018. Vol. № 18. P. 35–40.

7. Ilyushin Yu. V., Afanaseva O. V. Analysis and synthesis of distributed icedrill heating control system of mountain reconnaissance drilling rig / Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2018. Vol. 2, № 18. P. 41–48.

8. Ilyushin Yu. V., Novozhilov I. M., Kivayev I. N. Improving the quality of training specialists in subsoil use at the expense of introduction of automated training systems // IEEE 6th Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations). 2018. № 3. P. 125–127.

9. Ilyushin Yu. V., Novozhilov I. M., Kivayev I. N. Classification of modern educational programs by functional purpose // IEEE 6th Forum Strategic Partnership of Universities

and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations). 2018. № 3. P. 96–99.

10. Document Improving energy efficiency of tunnel furnaces of the pipeline type-the solution of the problem / Yu. V. Ilyushin, O. V. Afanasyeva, M. P. Afanasyev, S. V. Kolesnichenko, D. A. Pervukhin // ARPN J. of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 6, № 12. P. 1801–1812.

11. Ilyushin Yu. V., Mokeev A. B. The control system of the thermal field in tunnel furnace of a Conveyor type // ARPN J. of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 22, № 12. P. 6595–6605.

12. Ilyushin Yu. V., Mokeev A. B. Tunnel furnace of a conveyor type: Technical controlling of the temperature field // Intern. J. of Applied Engineering Research 2017. Vol. 20, № 12. P. 9377–9389.

Yu. V. Ilyushin

Saint Petersburg mining university

M. Yu. Shestopalov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

APPLICATION OF THE MODIFIED NYQUIST CRITERION FOR THE ANALYSIS OF IMPULSE DISTRIBUTED SYSTEMS

The classical results of the theory of automatic control are obtained in most cases in relation to systems with lumped parameters, whose behavior is uniquely characterized by changing controlled quantities only in time and is described most often by ordinary differential equations, which makes it impossible to expand the scope of such systems. The article discusses the modification of the Nyquist absolute stability criterion for its application in the theory of systems with distributed parameters. The limiting characteristics of parameters affecting the type and shape of spatial hodographs of typical distributed links are investigated. A modified criterion of absolute stability of nonlinear distributed control systems has been developed. A method for analyzing the absolute stability of a class of nonlinear distributed control systems has been developed. By example, the construction of a spatially distributed hodograph is considered and the stability region of the system under consideration is constructed.

System analysis, control, distributed systems, absolute stability

УДК 004.056.55

Ю. О. Чернышев, А. С. Сергеев, А. Н. Рязанов

Донской государственный технический университет

Исследование и разработка параллельного комбинированного биоинспирированного алгоритма для решения задач криптоанализа

Рассматривается задача криптоанализа с использованием новой модели оптимизационных стратегий – комбинированного биоинспирированного алгоритма. Описано применение комбинированного биоинспирированного алгоритма на основе гибридизации вложением (генетический алгоритм и алгоритм муравьиных колоний) для реализации криптоанализа шифров перестановок. Приводится описание комбинированного алгоритма, показано, что вероятность получения оптимального варианта решения при реализации гибридных алгоритмов криптоанализа не может быть меньше вероятности получения оптимального решения при использовании классических биоинспирированных алгоритмов. Приводится описание основных операций, допускающих параллельное выполнение на глобальном уровне, также представлены структурная схема параллельного алгоритма, информационно-логическая граф-схема, приведено описание матрицы следования. На основе определения множеств взаимно независимых операторов и критического пути в графе решается задача определения минимального числа процессоров для реализации параллельного комбинированного алгоритма.

Криптоанализ, комбинированные биоинспирированные алгоритмы, гибридизация вложением, генетический алгоритм, алгоритм муравьиных колоний, информационно-логическая граф-схема, матрица следования, матрица независимости

Известно, что научное направление «природные вычисления», объединяющее математические

методы, в которых заложен принцип природных механизмов принятия решений, в последние годы
