

## СИНТЕЗ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЛИТОСФЕРНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

С. В. БЫСТРОВ<sup>1</sup>, В. В. ГРИГОРЬЕВ<sup>1</sup>, О. К. МАНСУРОВА<sup>2</sup>,  
И. М. ПЕРШИН<sup>3</sup>, М. И. ПЕРШИН<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Филиал Северо-Кавказского федерального университета, 357501, Пятигорск, Россия

E-mail: ivmp@yandex.ru

<sup>4</sup>Южный федеральный университет, 344006, Ростов-на-Дону, Россия

Рассматривается проблема синтеза систем управления гидrolитосферными процессами. Практическое построение автоматизированных систем управления для добывающих скважин, обеспечивающих качественное протекание технологических процессов, связано с разработкой теоретических методик проектирования распределенных регуляторов. Предложена методика синтеза распределенной системы управления гидrolитосферным процессом, базирующаяся на сочетании обычного частотного метода синтеза и качественной теории распределения мод.

**Ключевые слова:** распределенные объекты, аппроксимация, синтез распределенных регуляторов, качественная теория

Методы синтеза систем с распределенными параметрами для систем управления различными процессами представлены в работах [1—9]. Поскольку распределенные процессы характеризуются рядом специфических свойств [1, 10—12], то целесообразно использование совокупности различных подходов при синтезе распределенных регуляторов.

Для улучшения динамических характеристик замкнутой системы управления рассмотрим на примере гидrolитосферного процесса сочетание обычного частотного метода синтеза и качественной теории.

Для системы управления распределенным объектом, передаточная функция которого по пространственным модам описывается соотношением, приведенным в работе [13], необходимо синтезировать распределенный регулятор вида

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

где  $\nabla^2$  — лапласиан, при этом на запас устойчивости разомкнутой системы по фазе  $\Delta f$  и на параметр  $\Delta$  наложены следующие ограничения:  $\Delta f \geq 0,523599$ ,  $\Delta = 3$ .

В работах [1, 2] исследованы частотные характеристики рассматриваемого распределенного регулятора, которые показаны на рис. 1, где  $a$  — амплитудная и  $b$  — фазовая частотные характеристики,  $\omega(G)$  — линия перегиба (фазовый сдвиг регулятора для частот  $\omega$ , принадлежащих рассматриваемой линии, равен нулю),  $G$  — обобщенная координата, в данном случае  $G = \psi_i^2$ .

\* В данной работе использованы обозначения, аналогичные принятым в предыдущей статье [13].

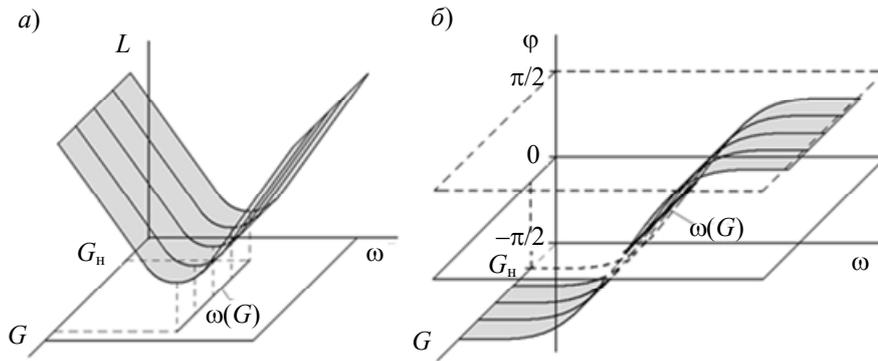


Рис. 1

В соответствии с методикой синтеза распределенного регулятора, представленной в [1, 2], предполагается, что линия  $\omega(G)$  совпадает с желаемой линией среза модуля разомкнутой системы. В этом случае уравнение линии перегиба имеет вид

$$\lg \omega_i = 0,5 \lg \left( E_4 \left[ \frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{\Psi_i^2}{n_4} \right] \right) - 0,5 \lg \left( E_2 \left[ \frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{\Psi_i^2}{n_2} \right] \right).$$

В результате синтеза получены следующие значения параметров:  $E_1=11,958229$ ,  $n_1=1,093933$ ,  $E_2=5919,052185$ ,  $n_2 \Rightarrow \infty$ ,  $E_4=0,000520$ ,  $n_4=1,121298$ . Тогда передаточная функция синтезированного регулятора записывается как

$$W(y, s) = 11,958 \left[ \frac{0,093}{1,093} - \frac{1}{1,093} \nabla^2 \right] + 0,00052 \left[ \frac{0,121}{1,121} - \frac{1}{1,121} \nabla^2 \right] \frac{1}{s} + 5919,052s. \quad (1)$$

Входное воздействие на систему управления (см. рис. 2) задано в виде

$$H^*(y_{0,j}, \tau) = H_{2,0} - 5.$$

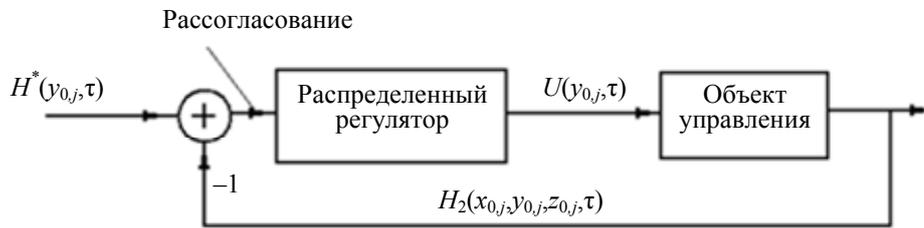


Рис. 2

По результатам моделирования замкнутой системы управления (объект описывается уравнениями в частных производных, а регулятор — в виде (1)) построен график переходного процесса для примера только во второй рабочей скважине (рис. 3). Аналогичные графики могут быть построены и для других рабочих скважин.

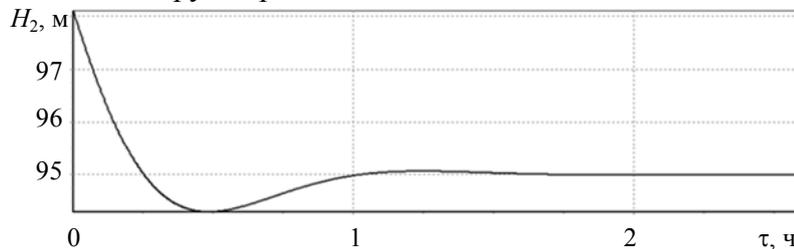


Рис. 3

Перерегулирование рассматриваемого процесса составляет 16 %, время регулирования 1 ч.

Передаточная функция разомкнутой системы по каждой пространственной моде входного воздействия, записанная с использованием обобщенной координаты  $G$  [1, 2] имеет вид

$$W_{p,c}(G, s) = W(G, s)W_0(G, s); \quad (2)$$

$$W(G, s) = E_1 \left[ \frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} G \right] + E_4 \left[ \frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} G \right] \frac{1}{s} + E_2 s;$$

$$W_0(G, s) = \frac{K}{\beta(G) + 1} \exp(-\beta(G, s)\Delta z),$$

$$\beta(G, s) = \left( \frac{s}{0,000391} + G \right)^{1/2}.$$

Приняв в (2)  $s=j\omega$ , получим комплексный передаточный коэффициент разомкнутой системы.

Используя качественную теорию [14—18], скорректируем рассматриваемую систему. Применяя преобразование

$$j\omega = j(2\omega_1 r / (\omega_1^2 + (r + B)^2)) + (\omega^2 - (r^2 - B^2)) / (\omega_1^2 + (r + B)^2),$$

перейдем из области частот  $\omega$  в область  $\omega_1$ , где параметр  $B$  определяет среднюю скорость сходимости процессов к положению равновесия, а параметр  $r$  — отклонения траекторий движения от их средних значений. Выбирая  $B = -0,9$  и  $r = -0,1$ , построим годограф комплексного передаточного коэффициента разомкнутой системы по первой пространственной моде в области частот  $\omega_1$ . При этом выберем  $E_1 = 11,958229 \cdot 50$ . Структурная схема разомкнутой системы приведена на рис. 4, а, годограф разомкнутой системы, построенный по результатам вычислений, — на рис. 4, б. Изменяя значение обобщенной координаты  $G$ , построим пространственный годограф разомкнутой системы (рис. 4, в).

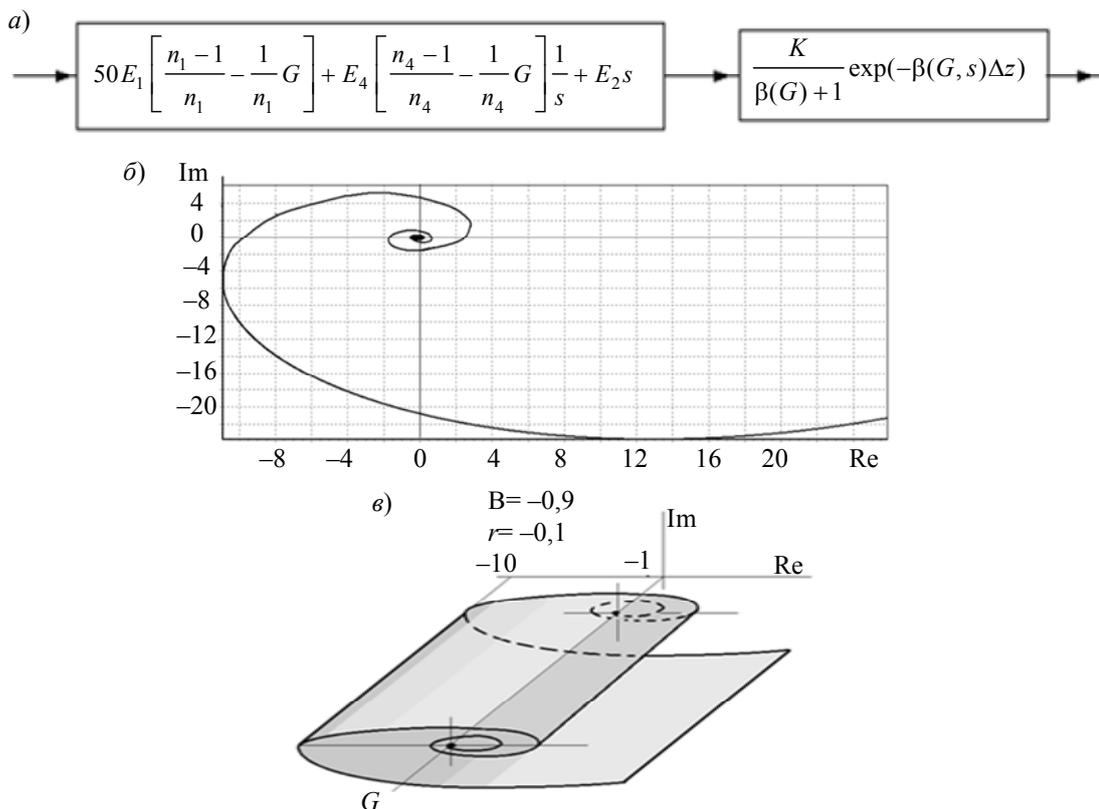


Рис. 4

В соответствии с критерием устойчивости [19] замкнутая система будет неустойчива. Скорректируем систему, введя дополнительный коэффициент усиления, равный 0,1 (рис. 5, а). По результатам вычислений построим пространственный годограф скорректированной

разомкнутой системы (см. рис. 5, б). В соответствии с критерием устойчивости [19] замкнутая система будет устойчива.

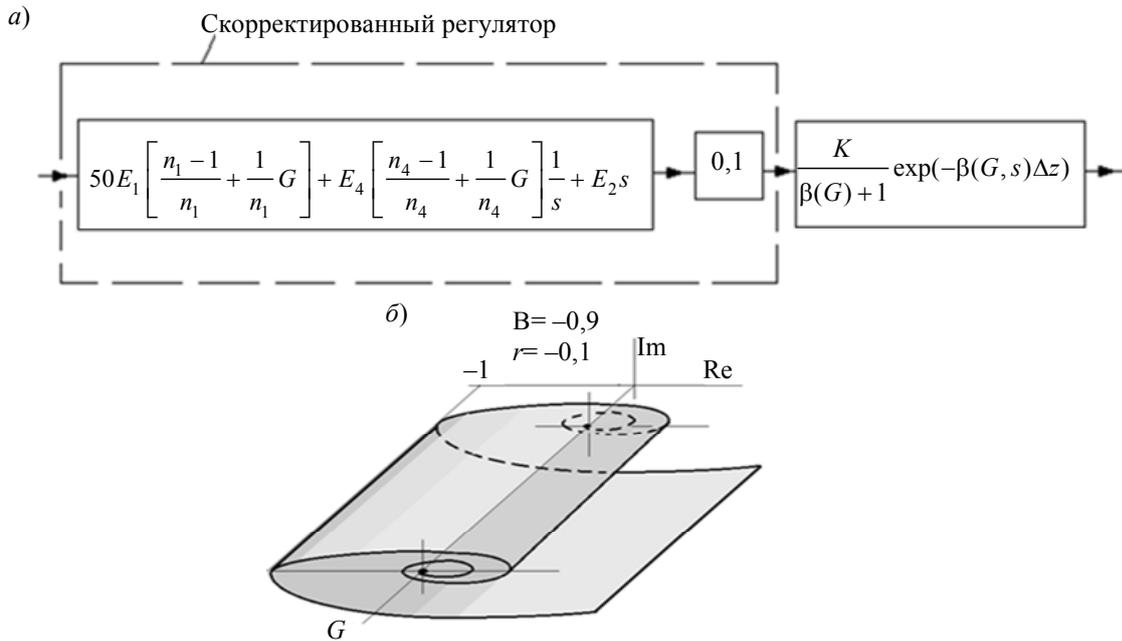


Рис. 5

По результатам моделирования работы замкнутой системы управления (объект описывается уравнениями в частных производных, а скорректированный регулятор показан на рис. 5, а) построен график переходного процесса во второй рабочей скважине (рис. 6). Аналогичные графики могут быть построены и для других рабочих скважин.

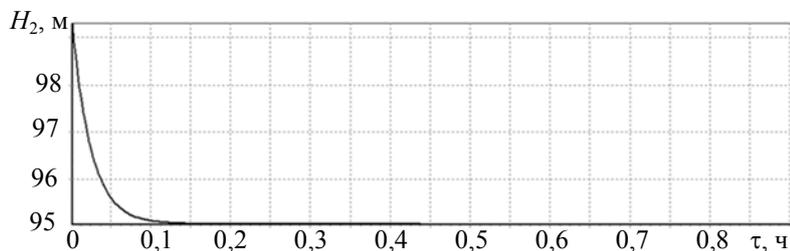


Рис. 6

Как следует из результатов моделирования, применение качественной теории при коррекции распределенной системы управления позволяет существенно улучшить динамические характеристики переходного процесса замкнутой системы управления.

Формирование областей качественного расположения пространственных мод, параметры которых связаны с показателями качества процессов проектируемой системы, диктуется практической необходимостью повышения качества процессов управления в распределенных системах. Результаты моделирования показывают, что предлагаемая методика синтеза, использующая модифицированный годограф и частотные методы синтеза сосредоточенных и распределенных систем, может быть использована при синтезе различных законов управления для систем с распределенными параметрами. По сути, эта методика распадается на два этапа — на первом этапе с помощью методов проектирования детерминированных систем синтезируется заданный закон управления, на втором этапе с использованием модифицированного годографа разомкнутой системы синтезируются параметры пространственно-усилительного блока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод: Системный анализ, диагностика, прогноз, управление / А. В. Малков, И. М. Першин, И. С. Помеляйко и др. М.: Наука, 2015. 283 с.
2. Малков А. В., Першин И. М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. М.: Научный мир, 2012. 476 с.
3. Першин И. М., Веселов Г. Е., Першин М. И. Синтез распределенных систем управления гидро-литосферными процессами месторождений минеральных вод // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2014. № 8. С. 123—137.
4. Martirosyan A. V., Martirosyan K. V., Pershin I. M. Analysis of the Caucasus mineral waters' field's modeling // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9, N 1. P. 204—210.
5. Першин И. М., Малков А. В., Першин М. И. Оперативное и стратегическое управление режимами эксплуатации гидrolитосферных процессов // Недрапользование XXI век. 2014. № 6. С. 40—47.
6. Першин И. М., Кузьмин Н. Н., Малков А. В. Формирование целевых функций в задачах управления гидrolитосферными процессами // Материалы 5-й Рос. мультikonф. по проблемам управления: „Информационные технологии в управлении“ (ИТУ-2012). 2012. С. 622—632.
7. Григорьев В. В., Быстров С. В., Першин И. М. Синтез распределенных регуляторов: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 200 с.
8. Малков А. В., Першин И. М. Синтез распределенных регуляторов для систем управления гидrolитосферными процессами // Мир лингвистики и коммуникации: электронный науч. журн. 2007. № 2. С. 235—241.
9. Першин И. М., Малков А. В., Кристал В. А. Построение системы управления параметрами эксплуатации системы добычи минеральной воды в регионе КМВ // Современная наука и инновации. 2013. № 1. С. 17—23.
10. Першин М. И. Исследование погрешностей динамических характеристик распределенных объектов при аппроксимации // Современная наука и инновации. 2014. № 4(8). С. 46—50.
11. Першин И. М., Веселов Г. Е., Першин М. И. Методы аппроксимации передаточных функций распределенных объектов // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. тр. 7-й Всерос. науч. конф., 5—9 окт. 2015 г., Таганрог. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. С. 106—117.
12. Веселов Г. Е., Першин М. И. Проектирование распределенных систем управления гидrolитосферными процессами // Изв. вузов. Геология и разведка. 2016. № 1. С. 99—105.
13. Быстров С. В., Григорьев В. В., Мансурова О. К., Першин И. М., Першин М. И. Математическая модель гидrolитосферных процессов // Наст. вып. С. 863—868.
14. Qualitative exponential stability and instability of dynamical systems / V. V. Grigoriev, O. K. Mansurova. St. Petersburg. 2001. Preprint of the 5th IFAK Symp. on Nonlinear Control Systems (NOLCOS'01).
15. Григорьев В. В., Быстров С. В., Рабыш Е. Ю., Мансурова О. К. Использование условий качественной неустойчивости для оценки динамических процессов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. Т. 77, № 1. С. 41—46.
16. Быстров С. В., Григорьев В. В., Рабыш Е. Ю., Мансурова О. К. Анализ качества переходных процессов в непрерывных и дискретных системах на основе условий качественной экспоненциальной устойчивости // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 9. С. 32—36.
17. Григорьев В. В., Быстров С. В., Наумова А. К., Рабыш Е. Ю., Черевко Н. А. Использование условий качественной экспоненциальной устойчивости для оценки динамических процессов // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 6. С. 24—30.
18. Григорьев В. В., Быстров С. В., Мансурова О. К., Першин И. М. Анализ устойчивости линейных систем с распределенными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 9. С. 2—5.
19. Григорьев В. В., Быстров С. В., Мансурова О. К., Першин И. М., Першин М. И. Качественное распределение мод в системах с распределенными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 7. С. 12—18.

## Сведения об авторах

**Сергей Владимирович Быстров**

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: sbystrov@mail.ru

- Валерий Владимирович Григорьев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: grigvv@yandex.ru
- Ольга Карибековна Мансурова** — канд. техн. наук, доцент; СПбГУ, кафедра автоматизации технологических процессов и производств; E-mail: erke7@mail.ru
- Иван Митрофанович Першин** — д-р техн. наук, профессор; Филиал СКФУ, кафедра управления в технических и биотехнических системах, Пятигорск; E-mail: ivmp@yandex.ru
- Максим Иванович Першин** — аспирант; ЮФУ, Ростов-на-Дону; E-mail: Pershinmaksim1992@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
систем управления и информатики  
НИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
21.03.17 г.

**Ссылка для цитирования:** Быстров С. В., Григорьев В. В., Мансурова О. К., Першин И. М., Першин М. И. Синтез распределенных систем управления гидролитосферными процессами // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 9. С. 869—874.

#### SYNTHESIS OF DISTRIBUTED CONTROL SYSTEMS FOR HYDROLITHOSPHERIC PROCESSES

S. V. Bystrov<sup>1</sup>, V. V. Grigoriev<sup>1</sup>, O. K. Mansurova<sup>2</sup>,  
I. M. Pershin<sup>3</sup>, M. I. Pershin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Branch of North-Caucasus Federal University, 357501, Pyatigorsk, Russia  
E-mail: ivmp@yandex.ru

<sup>4</sup>South Federal University, 344006, Rostov-on-Don, Russia

The problem of synthesis of control systems for hydrolithospheric process is considered. It is noted that practical creation of automated control systems for production wells providing high-quality flow of technological processes, calls for development of theoretical methods of distributed regulators design. A method for synthesis of distributed control system for hydrolithospheric process is proposed; the approach is based on combination of the conventional frequency synthesis method with qualitative theory of modes distribution.

**Keywords:** distributed objects, approximation, synthesis of distributed regulators, qualitative theory

#### Data on authors

- Sergey V. Bystrov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Computer Science and Control Systems; E-mail: sbystrov@mail.ru
- Valery V. Grigoriev** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Computer Science and Control Systems; E-mail: grigvv@yandex.ru
- Olga K. Mansurova** — PhD, Associate Professor; Saint Petersburg Mining University, Department of Technological Process Automation and Production; E-mail: erke7@mail.ru
- Ivan M. Pershin** — Dr. Sci., Professor; North-Caucasus Federal University, Pyatigorsk Branch, Department of Control of Technical and Biotechnical Systems; E-mail: ivmp@yandex.ru
- Maxim I. Pershin** — Post-Graduate Student; South Federal University, Rostov-on-Don; E-mail: Pershinmaksim1992@yandex.ru

**For citation:** Bystrov S. V., Grigoriev V. V., Mansurova O. K., Pershin I. M., Pershin M. I. Synthesis of distributed control systems for hydrolithospheric processes. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 9. P. 869—874 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-9-869-874