

Раздел III. Безопасность сложных систем

УДК 28;50

И.М. Першин, Г.Е. Веселов, М.И. Першин

СИНТЕЗ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЛИТОСФЕРНЫМИ ПРОЦЕССАМИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД

Рассматривается важная проблема построения систем управления параметрами гидролитосферных процессов. Эта проблема в последние годы приобретает важное значение, поскольку нацелена на сохранение важнейшего природного ресурса-минеральных вод. Геологические объекты, в отличие от технических, обладают рядом особенностей. Строение их, как правило, до конца неизвестно. Изучение требует значительных затрат и сопровождает весь процесс эксплуатации месторождения. Технологическими схемами разработки месторождений, в обязательном порядке предусматривается обоснование рациональных режимов эксплуатации. Рассматривается построение системы управления параметрами Кисловодского месторождения минеральных вод. Приводится математическая модель рассматриваемого месторождения и методика синтеза распределенных регуляторов с использованием качественной теории. Согласно качественной теории, корни исходного объекта (системы) должны располагаться в круге заданного радиуса с центром в заданной точке. Приводятся исследования влияния параметров рассматриваемого круга на статические характеристики разомкнутой системы. Рассмотренная методика синтеза распределенных систем управления с успехом может применяться и других отраслях. Показано, что при проектировании систем управления гидролитосферными процессами основной целевой функцией служит обеспечение технологической и экологической безопасности эксплуатации гидроминеральной базы и региона.

Гидролитосферные процессы; методика синтеза; распределенные системы управления.

I.M. Pershin, G.E. Veselov, M.I. Pershin

SYNTHESIS OF DISTRIBUTED CONTROL SYSTEMS GIDROLITOSFERNYMI PROCESSES MINERAL WATERS

We consider the important issue of building control systems parameters gidrolitosfernyh processes. This is a problem in recent years, gaining in importance, as is aimed at the preservation of the most important natural resursa-mineral waters. Geological features, as opposed to technical, have a number of features. Their structure is usually known to the end. The study requires a significant investment, and follow the whole process of operation of the deposit. Development plan deposits, mandatory study provides rational modes of operation. The article examines the construction of the control system parameters Kislovodsk mineral water. A mathematical model of the considered fields and methods of synthesis of distributed controllers using the qualitative theory. According to the qualitative theory, the roots of the original object (system) should be placed in a circle of a given radius centered at the given point. The paper presents the study of the influence of parameters considered in the range of static characteristics of the open-loop system. Our procedure for synthesis of distributed control systems can be successfully applied, and other industries. It is shown that the design of control systems gidrolitosfemymi processes primary function is to ensure technological and environmental safety manual hydromineral base and the region.

Gidrolitosfernye processes; methods of synthesis; distributed control systems.

Введение. Сфера природопользования является весьма значимым пространством проявления, реализации и согласования экономических интересов регионов Северо-Кавказского федерального округа (далее СКФО). Уникальное сочетание бальнеологических ресурсов – лечебной грязи, минеральных питьевых и термальных вод, составляющих, соответственно, около 30 и более 70 % национальных запасов, а также горных ландшафтов, морских пляжей, особо охраняемых природных территорий обеспечивает благоприятные условия для эффективного функционирования туристско-рекреационного комплекса. Кроме того, природопользование имеет особое значение в контексте реализации перспективных интересов южных регионов (см. Стратегия социально-экономического развития Северо-Кавказского федерального округа до 2025 г.). Экономические интересы регионов СКФО – это не внешняя по отношению к природопользованию категория, а форма, в которой проявляется природопользование как экономических отношений [1]. Если экономические интересы важны в аспекте решения межрегиональных эколого-ресурсных проблем Северного Кавказа, например, загрязнения Терского речного бассейна, воспроизводства рыбных ресурсов Каспийского моря, деградации пашенных и пастбищных угодий, то экономические интересы субрегионов, подобных, например, Кавказским Минеральным Водам, следует связывать с рациональным использованием уникального природно-ресурсного потенциала как основы их функциональной ориентированности [1].

Устойчивое социально-экономическое развитие Северо-Кавказских регионов невозможно без учета и реализации экономических интересов в сфере природопользования [1]. Однако, если руководствоваться фактами о современном состоянии окружающей природной среды в СКФО, есть основание говорить об абстрагировании от указанных интересов как в прошлые периоды развития южных территорий, так и ныне [1].

Проведенный анализ гидролитосферных процессов региона Кавказских Минеральных Вод за два последних десятилетия позволяет сделать вывод, что реальная картина гидролитосферы региона существенно отличается от ожидаемой:

- ◆ объем добычи минеральных вод увеличился более чем вдвое, что существенным образом изменило общую картину распределения природных вертикальных гидравлических градиентов в верхней части гидролитосферы. Это привело к тому, что вертикальные гидравлические градиенты в гидролитосфере поменяли свое направление на противоположное;
- ◆ изменение естественных вертикальных гидравлических градиентов на противоположное направление приводит к активизации нисходящих потоков и поступление загрязненных техногенными и коммунально-бытовыми стоками грунтовых и поверхностных вод в рабочие водоносные горизонты.

Рассмотренные выше проблемы в гидролитосфере требуют системного подхода для обеспечения технологической и экологической безопасности эксплуатации гидроминеральной базы и региона.

Целеполагание такой системы:

- ◆ сохранение гидроминеральной база региона;
- ◆ определение допустимых технологически безопасных режимов эксплуатации месторождений минеральных вод (определение целевых функции для систем управления параметрами месторождений);
- ◆ организация системы управления и мониторинга ключевых показателей добывающей отрасли.

Рассмотрим на примере синтеза распределенных регуляторов для системы управления гидrolитосферными процессами Кисловодского месторождения минеральных вод, методику синтеза распределенных регуляторов для систем управления параметрами месторождений.

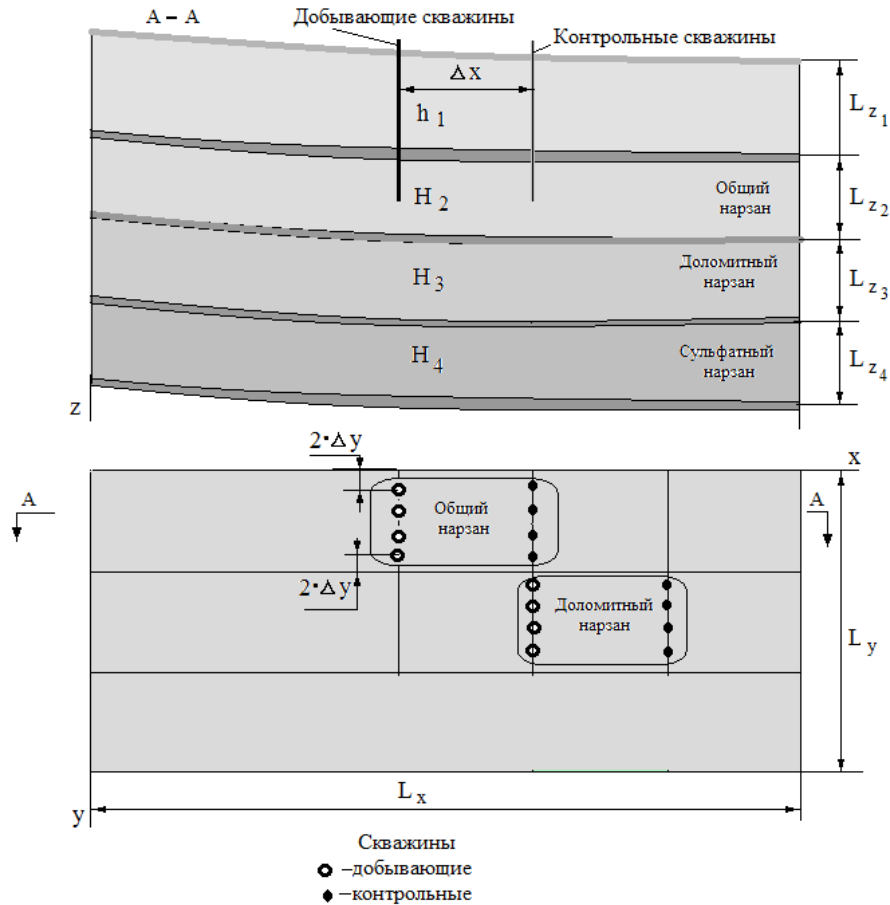


Рис. 1. Схема расположения добывающих и контрольных скважин

Описание объекта управления. В Кисловодском месторождении осуществляют добычу трех видов нарзанов – сульфатного, доломитного и общего. Рассмотрим проектирование систем управления параметрами добывающих скважин общего и доломитного нарзана (см. рис. 1).

Математическая модель гидrolитосферных процессов записывается в следующем виде:

◆ грунтовые воды

$$\frac{\partial h_1(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = k_{1,x} \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{1,y} \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{1,z} \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial z_1^2};$$

$$0 < x < L_x; 0 < y < L_y; 0 < z < L_{z_1}.$$

◆ верхний пласт

$$\frac{\partial H_2(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_2} \left(k_{2,x} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{2,y} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{2,z} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) -$$

$$- F_{2,x} \cdot \frac{\partial H_2(x, y, z, \tau)}{\partial x} + V_1(y_{2,j}, \tau) \cdot \delta_2(x_{0,j}, y_{0,j}, z_{0,j});$$

$$0 < x < L_x; 0 < y < L_y; 0 < z < L_{z_2}.$$

◆ средний пласт

$$\frac{\partial H_3(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_3} \left(k_{3,x} \frac{\partial^2 H_3(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{3,y} \frac{\partial^2 H_3(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{3,z} \frac{\partial^2 H_3(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) -$$

$$- F_{3,x} \cdot \frac{\partial H_3(x, y, z, \tau)}{\partial x} + V_2(y_{3,j}, \tau) \cdot \delta_3(x_{0,j}, y_{0,j}, z_{0,j});$$

$$0 < x < L_x; 0 < y < L_y; 0 < z < L_{z_3}.$$

◆ нижний пласт

$$\frac{\partial H_4(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_4} \left(k_{4,x} \frac{\partial^2 H_4(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{4,y} \frac{\partial^2 H_4(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{4,z} \frac{\partial^2 H_4(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) -$$

$$- F_{4,x} \cdot \frac{\partial H_4(x, y, z, \tau)}{\partial x} + V_3(y_{4,j}, \tau) \cdot \delta_4(x_{0,j}, y_{0,j}, z_{0,j});$$

$$0 < x < L_x; 0 < y < L_y; 0 < z < L_{z_4},$$

где h_1 – напор в горизонте грунтовых вод; H_i – напор в изучаемом i -м водоносном горизонте ($i=2..4$); $V_i(y_{ij}, \tau)$ – понижение напора i -го пласта, вызванное воздействием j -й добывающей скважины (в рассматриваемом случае $j=1..4$, $i=2..4$); $\delta_i(x_{0,j}, y_{0,j}, z_{0,j})$ – функция, равная единице, если $x=x_{0,j}$, $y=y_{0,j}$, $z=z_{0,j}$, для i -го пласта и равная нулю в других случаях; $k_{i,x}, k_{i,y}, k_{i,z}$ – коэффициенты фильтрации по пространственным координатам в горизонте грунтовых вод ($i=1$) и i -го пласта ($i=2..4$); η_i – упругость i -го пласта ($i=2..4$); $F_{i,x}$ – скорость течения в i -м водоносном горизонте ($i=2..4$); x, y, z – пространственные координаты; τ – время.

Граничные условия между пластами задаются в виде (условия Дарси):

Грунтовые воды – верхний пласт

$$h_1(x, y, L_{z_1}, \tau) = h_1(x, y, L_{z_1}, \tau) + b_1 \cdot (H_2(x, y, 0, \tau) - h_1(x, y, L_{z_1}, \tau)),$$

$$H_2(x, y, 0, \tau) = H_2(x, y, 0, \tau) - b_1 \cdot (H_2(x, y, 0, \tau) - h_1(x, y, L_{z_1}, \tau)).$$

Верхний пласт – средний пласт

$$H_2(x, y, L_{z_2}, \tau) = H_2(x, y, L_{z_2}, \tau) + b_2 \cdot (H_3(x, y, 0, \tau) - H_2(x, y, L_{z_2}, \tau)),$$

$$H_3(x, y, 0, \tau) = H_3(x, y, 0, \tau) - b_2 \cdot (H_3(x, y, 0, \tau) - H_2(x, y, L_{z_2}, \tau)).$$

Средний пласт – нижний пласт

$$H_3(x, y, L_{z_3}, \tau) = H_3(x, y, L_{z_3}, \tau) + b_3 \cdot (H_4(x, y, 0, \tau) - H_3(x, y, L_{z_3}, \tau)),$$

$$H_4(x, y, 0, \tau) = H_4(x, y, 0, \tau) - b_3 \cdot (H_4(x, y, 0, \tau) - H_3(x, y, L_{z_3}, \tau)),$$

где b_i – параметры перетекания i -го пласта ($i=1..3$).

Нижняя граница нижнего пласта

$$\partial H_4(x, y, L_{z_4}, \tau) / \partial z = 0.$$

Боковые грани

$$h_1(0, y, z, \tau) = h_{1,0}; H_2(0, y, z, \tau) = H_{2,0};$$

$$H_3(0, y, z, \tau) = H_{3,0}; H_4(0, y, z, \tau) = H_{4,0};$$

$$\partial h_1(L_x, y, z, \tau) / \partial x = 0; \partial H_2(L_x, y, z, \tau) / \partial x = 0;$$

$$\partial H_3(L_x, y, z, \tau) / \partial x = 0; \partial H_4(L_x, y, z, \tau) / \partial x = 0.$$

При формировании граничных условий по координате y , полагаем, что мощность пластов такова, что возмущения от заборных скважин не влияют на состояние пласта в граничных точках

$$h_1(x, 0, z, \tau) = h_1(x, L_y, z, \tau) = h_{1,0};$$

$$H_i(x, 0, z, \tau) = H_i(x, L_y, z, \tau) = H_{i,0}, (i=2..4),$$

где $h_{1,0}, H_{2,0}, H_{3,0}, H_{4,0}$ – начальные состояния невозмущенных грунтовых вод и пластов:

Поскольку приведенная математическая модель объекта управления не имеет аналитического решения, то для оценки динамики объекта составим дискретную модель объекта управления. Входным воздействием на объект управления служит функция $U_{ij}(\tau)$, которая связана с функцией $V_i(y_{ij}, \tau)$ – понижение напора i -го пласта, вызванное воздействием j -й добывающей скважиной (в рассматриваемом случае $j=1..4, i=2..4$) следующим соотношением $V_i(y_{ij}, \tau) = 0.001 \cdot U_{ij}$. Методика проведения экспериментальных исследований (определения реакции системы на заданную пространственную моду входного воздействия) описана в [2, 3] и заключается в следующем. В установленном режиме скачком подаем входное воздействие на объект управления в виде выбранной пространственной моды. В рассматриваемом случае входное воздействие реализуется с помощью 4-х добывающих скважин. Полагая, что воздействие от первой и последней добывающих скважин, на расстоянии $2 \cdot \Delta y$, при скачкообразном понижении напора, равно нулю, то входное воздействие может быть записано в виде

$$U_{ij} = \sin(\psi_\xi \cdot y_j), \quad \psi_\xi = \pi \cdot \xi / (8-1), \quad y = (j-1) \cdot \Delta y, \quad G_\xi = (\pi \cdot \xi / ((8-1) \Delta y))^2,$$

где ξ – номер моды; j – точки расположения добывающих скважин j -го пласта; Δy – шаг дискретизации по оси y ; G_ξ – значения обобщенной координаты [2, 3].

Таблица 1

Геометрические данные

| Lx | Ly | Lz ₁ | Lz ₂ | Lz ₃ | Lz ₄ |
|--------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 350 м. | 1150 м. | 140 м. | 50 м. | 60 м. | 50 м. |

Физические параметры, используемые при моделировании объекта управления, были заданы в виде:

$$\text{водоотдача: } \eta_2 = 0.00101/\text{м.}, \eta_3 = 0.0006 \text{ 1/м.}, \eta_4 = 0.0005 \text{ 1/м.},$$

коэффициенты фильтрации по соответствующим координатам:

$$k_{1,x} = 0,192 \text{ м/сут.}, k_{1,y} = 0,192 \text{ м/сут.}, k_{1,z} = 0,0195 \text{ м./сут.},$$

$$k_{2,x} = 0,19 \text{ м/сут.}, k_{2,y} = 0,19 \text{ м/сут.}, k_{2,z} = 0,019 \text{ м./сут.},$$

$$k_{3,x} = 0,14 \text{ м/сут.}, k_{3,y} = 0,19 \text{ м/сут.}, k_{3,z} = 0,019 \text{ м./сут.},$$

$$k_{4,x} = 0,14 \text{ м/сут.}, k_{4,y} = 0,19 \text{ м/сут.}, k_{4,z} = 0,019 \text{ м./сут.},$$

параметр перетекания: $b_1 = 0,0003 \text{ сут.}^{-1}, b_2 = 0,00033 \text{ сут.}^{-1}, b_3 = 0,00035 \text{ сут.}^{-1},$

начальные состояния невозмущенных пластов (в геологии напор измеряется в м.): $h_{1,0} = z_m, (0 < z < L_z), H_{2,0} = 220 \text{ м.}, H_{3,0} = 270 \text{ м.}, H_{4,0} = 350 \text{ м.},$

шаги дискретизации по соответствующим координатам:

$$\Delta x = L_x / (N_x - 1) \text{ м.}, \Delta y = L_y / (N_y - 1) \text{ м.}, \Delta z_i = L_{z_i} / (N_{z_i} - 1) \text{ м.}, (i=1..4),$$

где N_x, N_y, N_{z_i} , – число точек дискретизации по соответствующим координатам (в рассматриваемом примере были выбраны следующие значения $N_x=8, N_y=24, N_{z_i}=8, (i=1..4)$).

Была составлена вычислительная программа для анализа динамических характеристик объекта управления. В результате численного эксперимента получено, что объект принадлежит к классу пространственно-инвариантных. Реакция объекта на первую и третью пространственные моды входного воздействия, полученная в точке расположения 2-й контрольной скважины, представлена на рис. 2–5.

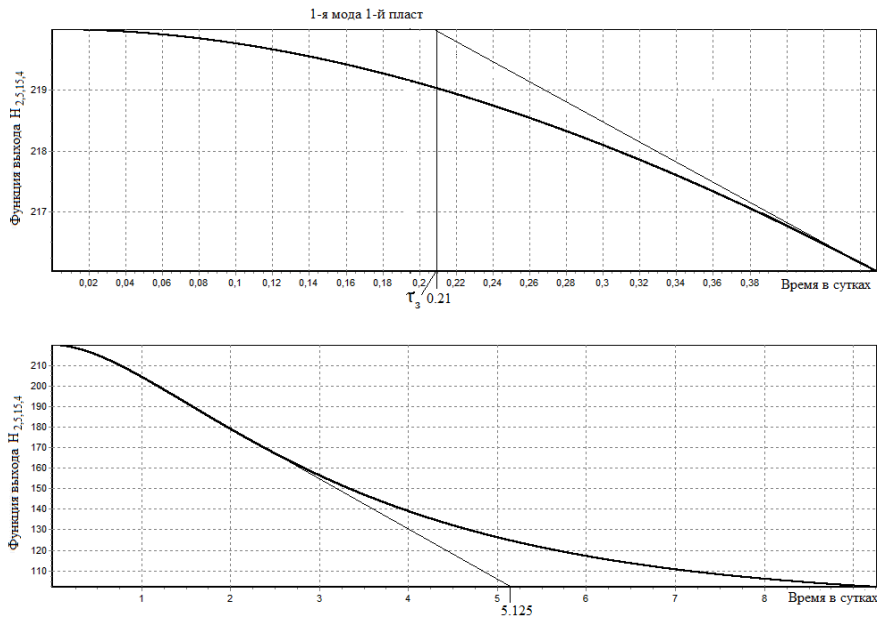


Рис. 2. 1-й пласт, 1-я мода

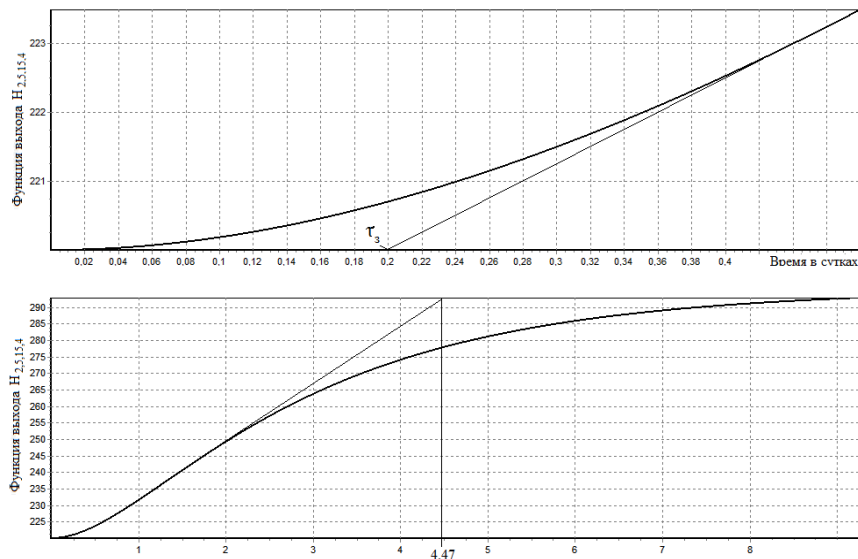


Рис. 3. 1-й пласт, 3-я мода

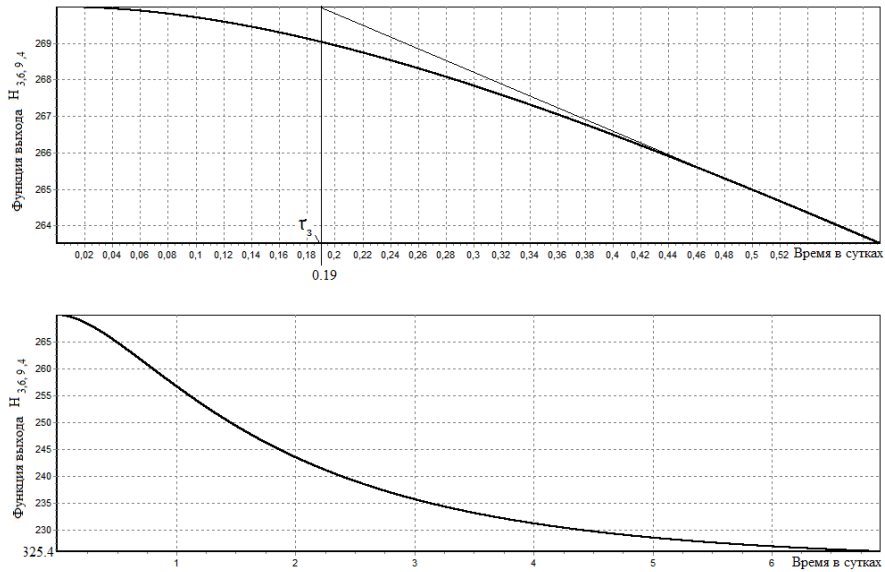


Рис. 4. 2-й пласт, 1-я мода

Аппроксимируем передаточную функцию по выбранным пространственным модам передаточной функцией вида

$$W_\nu(G, s) = \frac{k_\nu(G)}{T_\nu(G)s + 1} \cdot e^{-p\tau_\nu(G)}, \quad (\nu=1,2), \quad (1)$$

где ν – номер пласта.

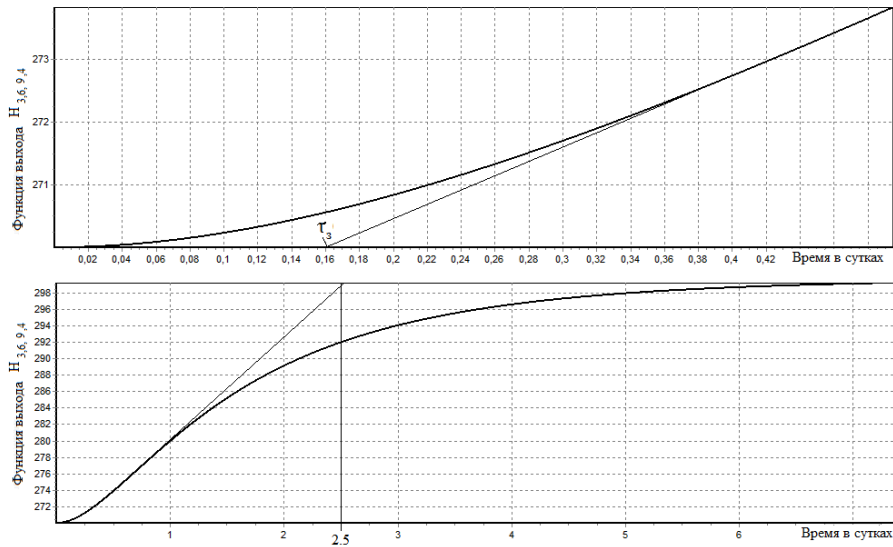


Рис. 5. 2-й пласт, 3-я мода

В результате численного моделирования получены следующие значения параметров передаточной функции, при условии, что входное воздействие U_j (j -й добывающей скважины) связано с функцией понижения напора следующим соотношением $V_\nu(y_j, \tau) = 0.001 \cdot U_j$, (в рассматриваемом случае $j=1..4$):

Для первого пласта (см. рис. 2, 3) получим:

первая мода

$$\eta=1, G_1=(\pi \cdot 1/350)^2=8.057 \cdot 10^{-5}, K_1(G_1)=110/(1 \cdot (\sin(\pi \cdot 3/7)))=112.8, \\ T_1(G_1)=(5.125-0.21) \cdot 24=117.96 \text{ час.}, \tau_3(G_1)=5.04 \text{ час.};$$

третья мода

$$\eta=3, G_3=7.25 \cdot 10^{-4}, K_1(G_3)=74/(1 \cdot (\sin(\pi \cdot 3 \cdot 3/7)))=94.6, \\ T_1(G_3)=(4.47-0.2) \cdot 24=102.48 \text{ час.}, \tau_3(G_3)=4.8 \text{ час.}$$

Для второго пласта (см. рис. 4, 5) получим:

первая мода

$$\eta=1, G_1=8.057 \cdot 10^{-5}, K_2(G_1)=44.6/(1 \cdot (\sin(\pi \cdot 3/7)))=45.75, \\ T_2(G_1)=(3-0.19) \cdot 24=67.44 \text{ час.}, \tau_3(G_1)=4.56 \text{ час.};$$

третья мода

$$\eta=3, G_3=7.25 \cdot 10^{-4}, K_2(G_3)=29.2/(1 \cdot (\sin(\pi \cdot 3 \cdot 3/7)))=37.35, \\ T_2(G_3)=(2.5-0.16) \cdot 24=56.16 \text{ час.}, \tau_3(G_3)=3.84 \text{ час.}$$

Основные сведения из качественной теории. Под качественным распределением мод понимается расположение мод в круге радиуса r больше нуля, с центром в точке $(\beta, j0)$, причем значению $\beta+r$ должно быть меньше нуля, т.е. данный круг должен лежать в левой полуплоскости комплексной плоскости корней, где параметр β определяет среднюю скорость сходимости процессов к положению равновесия, а параметр r – отклонения траекторий движения от их средних значений [4–7]. Задача установления факта качественного распределения мод сводится к классической задаче определения устойчивости, для чего вводится конформное отображение в следующем виде:

$$s_1 = \frac{1+s}{1-s} \cdot r - \beta, \text{ или } s = \frac{s_1 - r + \beta}{r + s_1 + \beta}.$$

Полгая, что $S = j\omega$; $S_1 = j\omega_1$, и преобразуя, получим

$$j\omega = \frac{j\omega_1 - r + \beta}{r + j\omega_1 + \beta} = \frac{j\omega_1 + (\beta - r)}{j\omega_1 + (r + \beta)} \cdot \frac{j\omega_1 - (r + \beta)}{j\omega_1 - (r + \beta)}.$$

Преобразуя, приходим к следующему результату:

$$j\omega = j \cdot (2\omega_1 \cdot r / (\omega_1^2 + (r + \beta)^2)) + (\omega_1^2 - (r^2 - \beta^2)) / (\omega_1^2 + (r + \beta)^2). \quad (2)$$

Характеристический полином замкнутой системы должен иметь все корни, относительно переменной s_1 , в левой полуплоскости. Другими словами, все корни должны иметь отрицательные значения вещественных частей, а корни исходного объекта (системы) при этом должны лежать в круге радиуса r больше нуля, с центром в точке $(\beta, j0)$, причем в значении $\beta+r$ должно быть меньше нуля (контур по каждой пространственной моде качественно экспоненциально устойчив с параметрами β и r). В [6] показано, что критерий устойчивости Найквиста может быть применен и к распределенным системам.

Методика синтеза. Методика синтеза распределенных регуляторов с использованием качественной теории распадается на следующие этапы:

1. Синтезируем ПИД-регулятор. Используя передаточную функцию (1) и вычисленные значения параметров по первой пространственной моде первого пласта, синтезируем регулятор, реализующий пропорционально – интегрально-дифференциального закона управления (ПИД). В процессе синтеза ПИД по первой пространственной моде ($\eta=1$, $K_1(G_1)=112,8$, $T_1(G_1)=117,96 \text{ час.}$, $\tau_3(G_1)=5,04 \text{ час.}$) частотным методом сосредоточенных систем (с использованием программного комплекса МИРЭА) получены значения параметров регулятора ПИД:

$$W_{1mo} = K + 1/(T_i \cdot s) + T_d \cdot s,$$

где $K=0,2256$; $T_i=6501,9$ час.; $T_d=0,0033$ час. ($\Delta=4$ [2,3]), (запас устойчивости по фазе был выбран $\Delta\varphi=\pi/6$).

В процессе синтеза ПИД по первой пространственной моде второго пласта ($\eta=1, K_2(G_1)=45,75$, $T_2(G_1)=67,44$ час., $\tau_2(G_1)=4,56$ час.) частотным методом сосредоточенных систем (с использованием программного комплекса МИРЭА) получены значения параметров регулятора ПИД

$$W_{2mod} = K + 1/(T_i \cdot s) + T_d \cdot s,$$

где $K=0,3589$; $T_i=1146,6$ час.; $T_d=0,0148$ час. ($\Delta=4$), (запас устойчивости по фазе был выбран $\Delta\varphi=\pi/6$).

2. Оптимизируем выбор значений параметров β и r . Выберем параметры β и r , обеспечивающие минимальный статический коэффициент усиления разомкнутой системы по первой моде первого пласта.

Используя модифицированную передаточную функцию разомкнутой системы и изменяя значения параметров β и r ($abs(\beta) > abs(r)$), определим соотношение параметров r/β , обеспечивающее минимальный модифицированный статический коэффициент усиления рассматриваемой разомкнутой системы $Re(W_{c1}(G_1, j\omega_1=0))$ (рис. 6). Результаты вычислений показывают, что минимальный модифицированный статический коэффициент обеспечивает соотношение параметров $r/\beta=0,6585$.

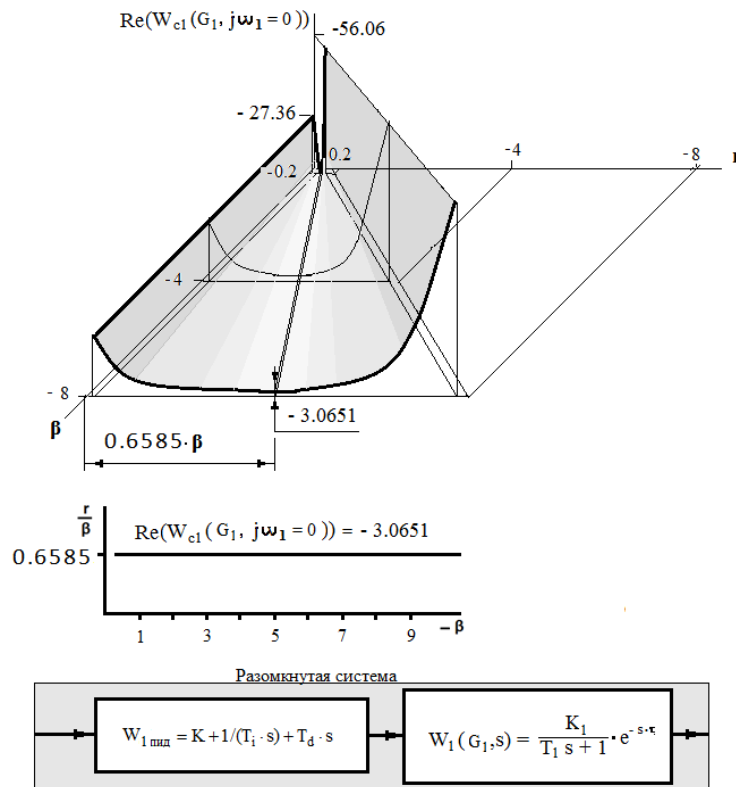


Рис. 6. Оптимизация параметров β и r по первой пространственной моде разомкнутой системы первого пласта

Выберем параметры β и r , обеспечивающие минимальный статический коэффициент усиления разомкнутой системы для второго пласта по первой моде. Для этого, используя модифицированную передаточную функцию разомкнутой системы и изме-

няя значения параметров β и r ($abs(\beta) > abs(r)$), определим соотношение параметров r/β , обеспечивающее минимальный модифицированный статический коэффициент усиления рассматриваемой разомкнутой системы $Re(W_{c2}(G_1, j\omega_1=0))$ (рис. 7). Результаты вычислений показывают, что минимальный модифицированный статический коэффициент обеспечивает соотношение параметров $r/\beta=0,6097$.

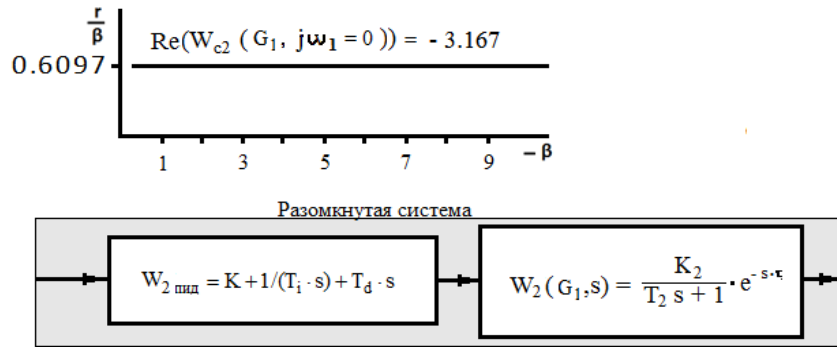


Рис. 7. Оптимизация параметров β и r по первой пространственной моде разомкнутой системы второго пласта

3. Синтезируем распределенный регулятор, реализующий статический закон управления.

3.1. Построим модифицированные годографы разомкнутой системы по выбранным пространственным модам, с учетом вычисленных значений параметров r/β , при этом выберем значение $\beta = -0,6$.

Для первого пласта $r = -0,3951$.

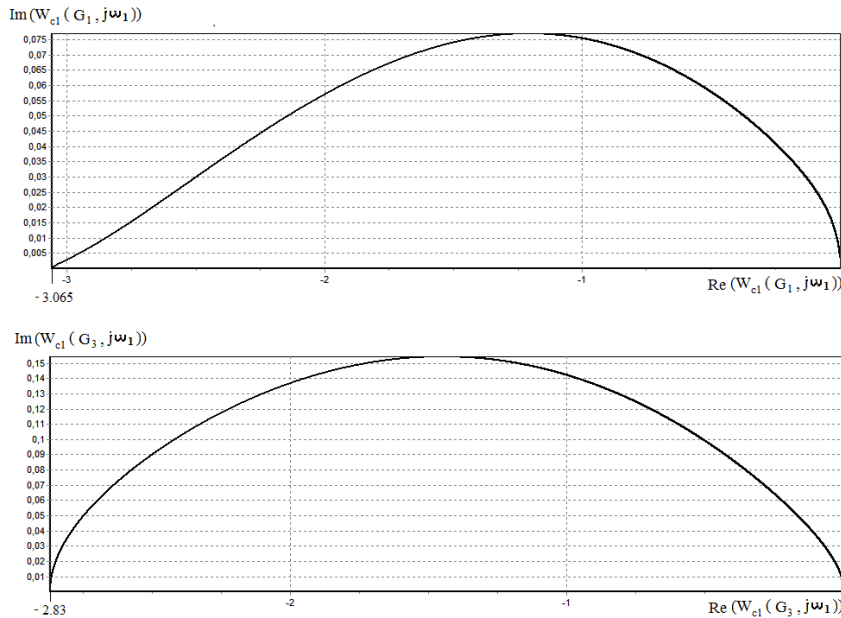


Рис. 8. Модифицированный годограф разомкнутой системы первого пласта

Для второго пласта $\gamma = -0,36585$

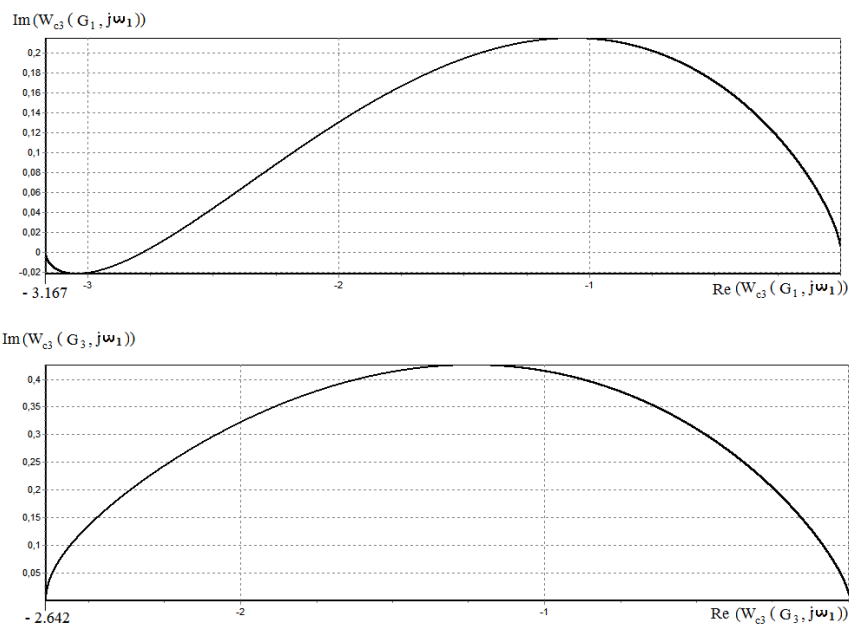


Рис. 9. Модифицированный годограф разомкнутой системы второго пласта

3.2. Синтезируем распределенный регулятор, реализующий статический закон управления для первого пласта. Передаточная функция такого регулятора имеет вид $W_1 = E_1((n_1-1)/n_1 + G/n_1)$ [2, 3].

Для выбранных пространственных мод (G_1 и G_3 , см. рис. 8) определим желаемые коэффициенты усиления регулятора \bar{M}_G

$$\bar{M}_{G_1} = -1 / (-3,065) = 0,326, \quad \bar{M}_{G_3} = -1 / (-2,83) = 0,3533.$$

Для определения параметров распределенного регулятора запишем следующие уравнения:

$$\bar{M}_{G_1} = E_1 \cdot [(n_1 - 1) / n_1 + G_1 / n_1], \quad (3)$$

$$\bar{M}_{G_3} = E_1 \cdot [(n_1 - 1) / n_1 + G_3 / n_1]. \quad (4)$$

Поделив (4) на (3), приходим к следующему результату:

$$n_1 = \frac{-1 + \Delta M - \Delta M \cdot G_1 + G_3}{\Delta M - 1}, \quad (5)$$

где $\Delta M = \frac{\bar{M}_{G_3}}{\bar{M}_{G_1}}$.

Подставляя вычисленные значения в (5), получим

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{-1 + \Delta M - \Delta M \cdot G_1 + G_3}{\Delta M - 1} = \\ &= \frac{-1 + 1.084 - 1.084 \cdot 0.00008057 + 0.000725}{0.084} = 1, \end{aligned}$$

где $\Delta M = \frac{\bar{M}_{G_3}}{\bar{M}_{G_1}} = 0.3533 / 0.326 = 1.084$.

Подставляя вычисленное значение n_1 в (3) и преобразуя, получим

$$E_1 = 0.326 / \left[0 + \frac{0.00008057}{1} \right] = 4046.17.$$

Передаточная функция регулятора для первого пласта может быть записана в виде

$$R_1(y, s) = E_1 \cdot \left[-\frac{\nabla^2}{n_1} \right] \cdot (K + 1/(T_i \cdot s) + T_d \cdot s),$$

где $E_1 = 4046.17$; $n_1 = 1$; $K = 0.2256$; $T_i = 6501.9$ час.; $T_d = 0.0033$ час.

3.3. Синтезируем распределенный регулятор, реализующий статический закон управления для второго пласта. Передаточная функция такого регулятора имеет вид $W_2 = E_2((n_2-1)/n_2 + G/n_2)$ [2, 3].

Для выбранных пространственных мод (G_1 и G_3 , см. рис. 9) определим желаемые коэффициенты усиления регулятора \bar{M}_G

$$\bar{M}_{G_1} = -1/(-3.167) = 0.316. \quad \bar{M}_{G_3} = -1/(-2.642) = 0.379,$$

$$\Delta M = \frac{\bar{M}_{G_3}}{\bar{M}_{G_1}} = 0.379/0.316 = 1.2,$$

$$n_2 = \frac{-1 + \Delta M - \Delta M \cdot G_1 + G_3}{\Delta M - 1} =$$

$$= \frac{-1 + 1.2 - 1.2 \cdot 0.00008057 + 0.000725}{0.2} = 1.$$

$$E_2 = 0.316 / \left[0 + \frac{0.00008057}{1} \right] = 3922.$$

Полученная передаточная функция регулятора для второго пласта может быть записана в виде

$$R_2(y, s) = E_2 \cdot \left[-\frac{\nabla^2}{n_2} \right] \cdot (K + 1/(T_i \cdot s) + T_d \cdot s),$$

где $E_2 = 3922$; $n_2 = 1$; $K = 0.3589$; $T_i = 1146.6$ час.; $T_d = 0.0148$ час.

Анализ замкнутых систем управления. Структурная схема замкнутой системы управления приведена на рис.10. Входное воздействие (целевая функция) на объект управления формировалось в виде следующей функции:

$$F_v = H_v + 1, 0 - 2$$

где v – номер пласта.

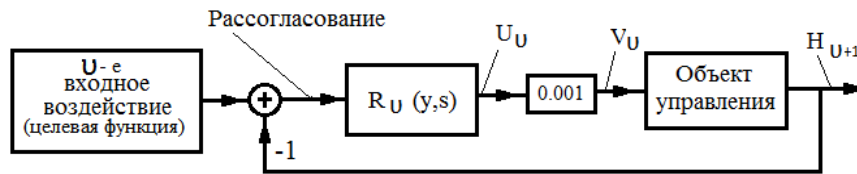


Рис. 10. Структурная схема системы управления

По результатам моделирования построены графики, приведенные на рис. 11. Функция рассогласования приведена для точки установки 2-й контрольной скважины. Аналогичные функции получены и для точек установки остальных контрольных скважин. Как следует из результатов моделирования, синтезированный

регулятор достаточно эффективно управляет рассматриваемым гидродинамическим процессом и может быть рекомендован к реализации в реальных системах (см. рис. 12).

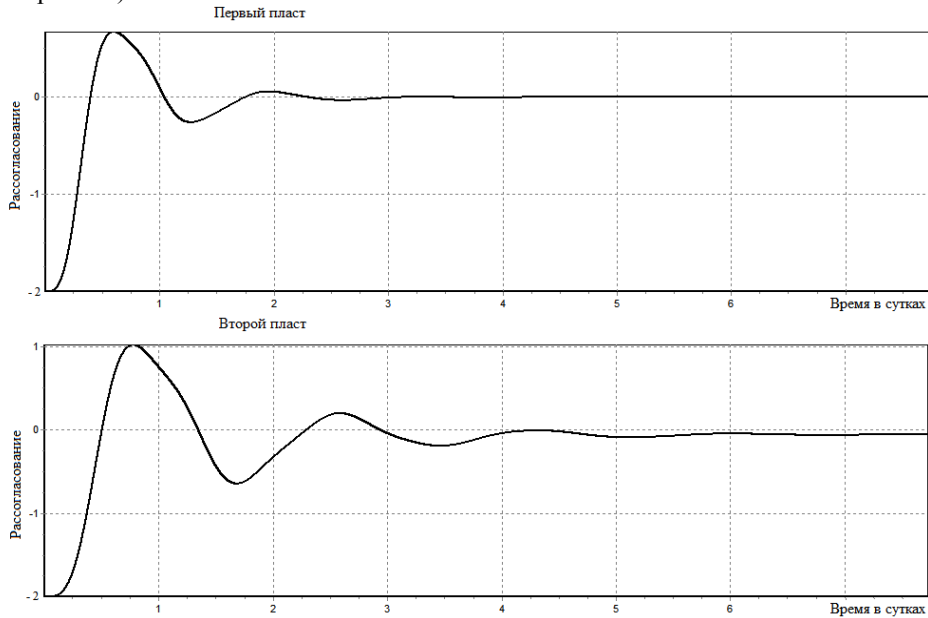


Рис. 11. График переходного процесса

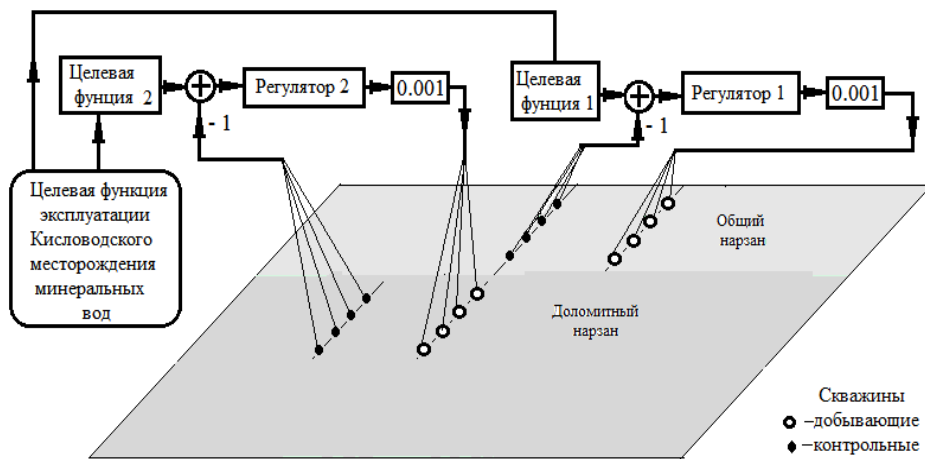


Рис. 12. Структурная схема системы управления Кисловодским месторождением минеральных вод

Проблема управления гидролитосферными процессами требует перехода на принципиально новую концепцию – обеспечение технологической и экологической безопасности эксплуатации гидроминеральной базы и региона в целом. Технологически и технически не существует проблем, препятствующих решению поставленной задачи: – сохранения гидроминеральных источников региона. Разработанные в настоящее время методы синтеза позволяют реализовать оперативное

управление процессами эксплуатации месторождений в режиме реального времени и без особого участия человека. При этом разработаны методы формирования целевых функций для систем управления параметрами рассматриваемых месторождений [2, 8–10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Медяник Н.В.* Сфера природопользования как пространство противоречий экономических интересов регионов Северо-Кавказского федерального округа // Проблемы современной экономики. – 2011. – № 2 (38).
2. *Малков А.В., Першин И.М.* Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. – М.: Научный мир, 2012. – 476 с.
3. *Першин И.М.* Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. – Изд-во РИА КМВ, 2007. – 243 с.
4. *Григорьев В.В., Быстров С.В., Рабыш Е.Ю., Мансурова О.К.* Использование условий качественной неустойчивости для оценки динамических процессов // Научно-технический вестник СПбГУИТМО. – 2012. – Т. 77, № 1. – С. 41-46.
5. *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.
6. *Григорьев В.В., Быстров С.В., Наумова А.К., Рабыш Е.Ю., Черевко Н.А.* Использование условий качественной экспоненциальной устойчивости для оценки динамических процессов // Известия вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54, № 6. – С. 24-30.
7. *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.
8. *Першин И.М., Кузьмин Н.Н., Малков А.В.* Формирование целевых функций в задачах управления гидrolитосферными процессами // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2012). – СПб.: ОАО «Концерн «Электроприбор», 2012. – С. 622-632.
9. *Малков А.В., Першин И.М., Цаплева В.В.* Технологическая безопасность эксплуатации гидроминеральных источников // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 4 (129). – С. 25-31.
10. *Першин И.М., Малков А.В.* Проектирование систем управления гидrolитосферными процессами // Аналитическая механика, устойчивость и управление. Труды X Международной Четаевской конференции. 4 том (2 часть секции Управление). – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. – С. 123-128.

REFERENCES

1. *Medyanik N.V.* Sfera prirodopol'zovaniya kak prostranstvo protivorechiy ekonomicheskikh interesov regionov Severo-Kavkazskogo federal'nogo okruga [The sphere of nature as a space of contradictions economic interests of the regions of the North Caucasian Federal district], *Problemy sovremennoy ekonomiki* [Problems of the modern economy], 2011, No. 2 (38).
2. *Malkov A.V., Pershin I.M.* Sistemy s raspredelennymi parametrami. Analiz i sintez [Systems with distributed parameters. Analysis and synthesis]. Moscow: Nauchnyy mir, 2012, 476 p.
3. *Pershin I.M.* Analiz i sintez sistem s raspredelennymi parametrami [Analysis and synthesis of systems with distributed parameters]. Izd-vo RIA KMV, 2007, 243 p.
4. *Grigor'ev V.V., Bystrov S.V., Rabysh E.Yu., Mansurova O.K.* Ispol'zovanie usloviy kachestvennoy neustoychivosti dlya otsenki dinamicheskikh protsessov [The use of the terms qualitative instability for evaluation of dynamic processes], *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik SPbGUITMO* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2012, Vol. 77, No. 1, pp. 41-46.

5. *Bystrov S.V., Grigor'v V.V., Rabysh E.Yu., Mansurova O.K.* Analiz kachestva perekhodnykh protsessov v nepreryvnykh i diskretnykh sistemakh na osnove usloviy kachestvennoy eksponentsial'noy ustoychivosti [The quality analysis of transient processes in continuous and discrete systems based on the conditions of exponential stability] [The quality analysis of transient processes in continuous and discrete systems based on the conditions of exponential stability], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2012, No. 9, pp. 32-36.
6. *Grigor'ev V.V., Bystrov S.V., Naumova A.K., Rabysh E.Yu., Cherevko N.A.* Ispol'zovanie usloviy kachestvennoy eksponentsial'noy ustoychivosti dlya otsenki dinamicheskikh protsessov [Using quality conditions of exponential stability for the estimation of dynamic processes], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya of Higher Educational institutions. Instrumentation], 2011, Vol. 54, No. 6, pp. 24-30.
7. *Grigor'ev V.V., Bystrov S.V., Mansurova O.K., Pershin I.M.* Analiz ustoychivosti li-neynykh sistem s raspredelennymi parametrami [The stability analysis of linear systems with distributed parameters], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2013, No. 9, pp. 2-5.
8. *Pershin I.M., Kuz'min N.N., Malkov A.V.* Formirovanie tselevykh funktsiy v zadachakh upravleniya gidrolitosfernymi protsessami [The formation of the objective functions in problems of control processes hydrolithosphere], *Materialy konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v upravlenii» (ITU-2012)* [Materials of the conference "Information technologies in management"]. St. Petersburg: OAO «Kontsern «Elektropribor», 2012, pp. 622-632.
9. *Malkov A.V., Pershin I.M., Tsapleva V.V.* Tekhnologicheskaya bezopasnost' ekspluatatsii gidromineral'nykh istochnikov [Process safety operating hydro sources], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 4 (129), pp. 25-31.
10. *Pershin I.M., Malkov A.V.* Proektirovanie sistem upravleniya gidrolitosfernymi protsessami [Systems engineering management processes hydrolithosphere], *Analiticheskaya mekhanika, ustoychivost' i upravlenie. Trudy X Mezhdunarodnoy Chetaevskoy konferentsii. 4 tom (2 chast' sekcii Upravlenie)* [Analytical mechanics, stability and control. Proceedings of the X International Chetaevsky conference. 4 (part 2 of the Control section)]. Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta, 2012, pp. 123-128.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

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 технических и биомедицинских системах; зав. кафедрой; профессор.

Веселов Геннадий Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: gev@sfnu.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@sfnu.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.