

ДЖОЛДОШОВ Б. О., ТЕМИРКУЛОВА Н. Т., ТЕРЕНТЬЕВА Е. Ю.
СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ РЕЗЕРВУАРАМИ

Аннотация. В статье ставится задача синтеза системы управления при заданных инженерных требованиях к основным характеристикам системы. Оценка качества процессов управления объектами осуществляется с помощью функциональных соотношений, определяемых непосредственно по переходным процессам рассматриваемой системы.

Ключевые слова: конические резервуары, метод синтеза, система автоматического управления (САУ), устройство управления.

DZHOLDOSHOV B. O., TEMIRKULOVA N. T., THERENTIEVA E. YU.
STRUCTURAL SYNTHESIS OF CONTROL DEVICE FOR TANKS

Abstract. The aim of the article is to investigate the methods of synthesis of the control system that meets the basic engineering requirements to the main characteristics of the control system. Quality assessment of the processes of object management is carried out by using of functional relationships determined directly by the transient processes of the system under consideration.

Keywords: conical tanks, synthesis method, automatic control system, control device.

Необходимость применения резервуаров и резервуарных парков возникает на различных объектах хранения нефти и нефтепродуктов в процессе технологических операций. Резервуары и резервуарные парки являются технологическим объектами различных нефтеперекачивающих станций.

Существуют перекачивающие и промежуточные станции. На промежуточных станциях резервуары являются буферными емкостями и предназначаются для компенсации неравномерности подачи двух соседних перекачивающих станций. На перекачивающих станциях резервуарные парки предназначаются для хранения (резерва) нефти и нефтепродуктов. При некоторых плановых или аварийных остановках одной из промежуточных станций транспортируемая жидкость поступает в резервуарный парк этой станции, а следующая станция продолжает работать за счет нефти и нефтепродукта, имеющегося в ее резервуарном парке.

Резервуарный парк имеет конические виды резервуаров и является объектом со сложнейшей структурой. Управление таким резервуарным парком является интересным как в теоретическом плане, так и в практическом.

Рассмотрим задачу синтеза системы управления расходом смеси химического объекта (рис. 1), состоящего из трех конических резервуаров со свободным истечением жидкости из общего трубопровода, соединяющего выходы резервуаров [1; 2]. В резервуары жидкости поступают по двум каналам питания, при этом одна жидкость подается в первый и второй, а другая – в первый и третий резервуары. Управление уровнями жидкостей во втором и третьем резервуарах производится изменением потока жидкостей по первому (u_1) и второму (u_2) питающим трубопроводам. Расход жидкостной смеси на выходе определяется уровнем жидкости во втором резервуаре.

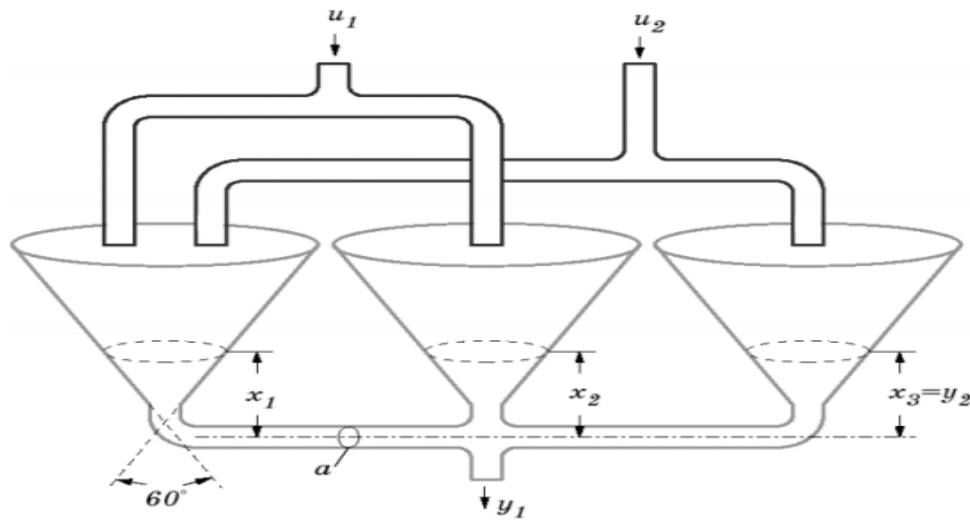


Рис. 1. Функциональная схема объекта управления.

Состояние объекта управления в пространстве фазовых переменных описывается следующим обыкновенным нелинейным уравнением

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -\frac{3a}{\pi x_1^2} f(x_1 - x_2) + \frac{3a}{2\pi x_1^2} (u_1 + u_2); \\ \dot{x}_2(t) = \frac{3a}{\pi x_2^2} [f(x_1 - x_2) - f(x_2 - x_3) - f(x_2)] + \frac{3a}{2\pi x_2^2} u_1; \\ \dot{x}_3(t) = \frac{3a}{\pi x_3^2} f(x_2 - x_3) + \frac{3a}{2\pi x_3^2} u_2; \end{cases} \quad (1)$$

где $f(x_i - x_j) = \sqrt{2g |x_i - x_{i+1}|} \text{sign}(x_i - x_{i+1})$; x_1, x_2, x_3 – соответственно уровни жидкостей в первом, втором и третьем резервуарах, $y_1 = a\sqrt{2gx_2}$ – расход жидкости на выходе объекта.

Требуется определить законы управления u_1 и u_2 , обеспечивающие заданные уровни жидкостей во втором и третьем резервуарах и, следовательно, заданный расход жидкости на выходе, т.е.

$$x_2 = x_{2r} = \frac{y_{1r}^2}{2ga^2}; \quad x_3 = x_{3r} = y_{1r}; \quad x_{1r} = 1,25x_{2r}; \quad (2)$$

В установившемся режиме, согласно (1), выполняются следующие соотношения [1; 2]:

$$f(x_{1r} - x_{2r}) = 0,5f(x_{2r}), \quad af(x_{2r}) = u_{1r} + u_{2r} = y_{1r}, \quad af(x_{2r} - x_{3r}) = -0,5u_{2r}. \quad (3)$$

По заданному x_{2r} (2) из (3) можно найти x_{1r} – уровень жидкости в первом резервуаре в установившемся режиме работы объекта. Отличительной особенностью объекта (1) является присутствие управлений u_1 и u_2 во всех строках правых частей дифференциальных уравнений. Согласно [1], управление u_1 и u_2 всегда можно синтезировать так, чтобы обязательно обеспечить требуемые соотношения (2).

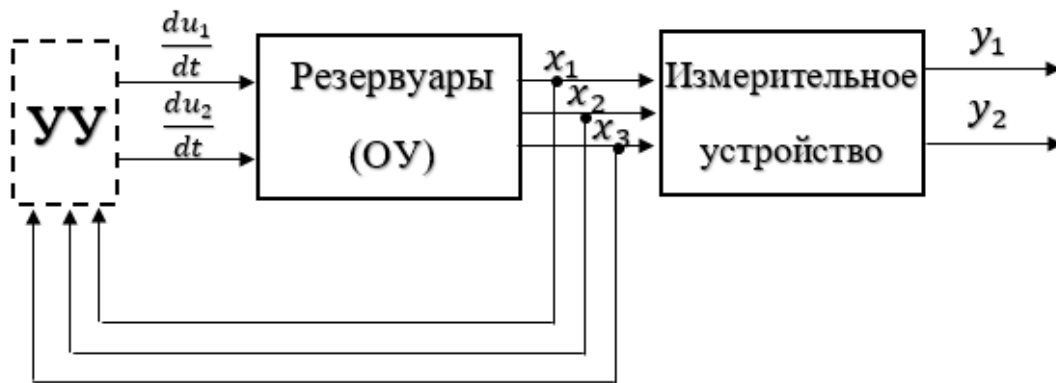


Рис. 2. Структурная схема САУ.

Рассмотрим нелинейный многомерный объект управления, состояния которого описывается следующим нелинейным векторным дифференциальным уравнением [3]:

$$\dot{x}_i(t) = f_i[x(t), u(t), \xi(t), t], \quad x_i(t_0) = x_i^0, \quad i = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_k], \quad (4)$$

где: $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ – вектор переменных состояния или вектор фазовых координат объекта управления; $u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T$ – вектор управления (управляющих или регулирующих воздействий); $f(x, u) = f(x, u, \xi, t) = [f_1(x, u, \xi, t), f_2(x, u, \xi, t), \dots, f_n(x, u, \xi, t)]^T$ – n -мерная вектор-функция, удовлетворяющая условиям Коши; $\xi(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_r(t)]^T$ – вектор возмущающих воздействий.

Будем считать, что объект (4) является полностью управляемым и необходимо стабилизировать его нулевое состояние. Основными показателями качества регулирования будем считать динамическую и статическую точность, а также быстродействие системы

управления. Обозначим через граничные положительные функции $\sigma_i(t)$, с помощью которых задаются границы допустимых областей. Переходные процессы по ошибке управления (невязки) $e_i(t)$ определяют предъявляемые требования к качеству процессов управления синтезируемой системы. Степень достижения цели управления или регулирования $g_i(t)$ характеризуется вектором невязки

$$e(t) = g(t) - x(t). \quad (5)$$

Математическое описание такого инженерного критерия можно задавать на основе следующих модульных неравенств:

$$|x_i(t)| = |e(t)| \leq \sigma_i(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где $\sigma_i(t)$ — положительные, непрерывно-дифференцируемые функции, определяющие точность и быстродействие проектируемой автоматической системы.

Задача управления формулируется таким образом: для управляемого или регулируемого объекта, состояния которого описываются векторным нелинейным дифференциальным уравнением (1), необходимо определить структуру и параметры автоматического регулятора, обеспечивающего выполнение точности и быстродействия проектируемой системы, т.е. качества процесса управления.

Для достижения желаемого качества переходных процессов закон управления $u(t)$ должен обеспечивать выполнение неравенств (6). Один из возможных путей достижения желаемого качества состоит в задании определенных условий для функций $f_i[x(t), u(t), \xi(t), t]$. При этом такие условия должны обеспечивать параметрическую разрешимость соотношений (2), также определение структур и параметров алгоритмов управления.

Желаемую динамику САУ зададим в виде векторного дифференциального уравнения

$$\dot{x}(t) = f^*(x, p), \quad (7)$$

где $f^* = [f_1^*(x, p_1), f_2^*(x, p_1), \dots, f_n^*(x, p_n)]^T$ — n -мерная, в общем случае нелинейная вектор-функция; $p = [p_1, p_2, \dots, p_n]$ — r -мерный вектор-параметр, подлежащий выбору так, чтобы решение $x(t)$ системы (16) удовлетворяло условиям заданного качества управления (6).

В результате введения понятия желаемой динамики для проектируемой замкнутой системы, искомый закон управления $u(t)$ целесообразно определить из условия близости соответствующих компонентов вектор-функций $f(x, u)$ и $f^*(x, p)$ с требуемой точностью. В частности, эти условия целесообразно задавать в виде модульных неравенств:

$$f_i[x(t), u(t), \xi, t] - f_i^*[x(t), p] \leq \delta_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_k], \quad (8)$$

где $\delta_i(t)$ – функции, которые задают точность приближения, они положительные и непрерывно дифференцируемые.

Таким образом, процедура синтеза регулятора для многомерного нелинейного объекта состоит из двух этапов:

- 1) описание подмножества P^* и определение вектор-параметра $p \in P^*$;
- 2) нахождение закона управления $u(x, t)$, обеспечивающего выполнение условий (8).

Введем функцию

$$F_i(x, u) = f_i(x, u, \xi, t) - f_i^*(x, p), \quad i = \overline{1, n}, \quad (9)$$

Тогда неравенства (8) запишутся в виде

$$|F_i(x, u)| \leq \delta_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_k]. \quad (10)$$

где $F(x, u) = [F_1(x, u), F_2(x, u), \dots, F_n(x, u)]^T$.

Тогда уравнение динамики многомерного регулятора имеет вид [3]:

$$\dot{u}(x, t) = L \cdot \left[Y \{ f(x, u, \xi, t) - f^*(x, p) \} - \tilde{Z} \cdot f(x, u) - H \cdot \xi(t) \right]. \quad (11)$$

где $Y = [\gamma_1 \ \gamma_2 \ \dots \ \gamma_n]^T = \{ \gamma_{iv} \}_{n \times n}$ – вещественная матрица, составленная из n -мерных векторов

$$\gamma_1 = [\gamma_{11}, \gamma_{12}, \dots, \gamma_{1n}], \quad \gamma_2 = [\gamma_{21}, \gamma_{22}, \dots, \gamma_{2n}], \dots, \gamma_n = [\gamma_{n1}, \gamma_{n2}, \dots, \gamma_{nn}].$$

где функциональные матрицы

$$\tilde{Z} = \left\{ \frac{\partial F_i}{\partial x_j} \right\}_{n \times n}, \quad M = \left\{ \frac{\partial F_i}{\partial u_v} \right\}_{n \times m}, \quad H = \left\{ \frac{\partial F_i}{\partial \xi_v} \right\}_{n \times r}, \quad (12)$$

а матрица $Y = \{ \gamma_{iv} \}_{n \times n}$ – вещественная матрица, составленная из настроечных параметров γ_{ij} системы; в предположении что существует обратная матрица $W^{-1} = [M^T \cdot M]^{-1}$.

где матрица $L = W^{-1} \cdot M^T$. Если вектор-функция $f^*(x, p)$ задается в линейной форме, т.е.

$$f^*(x, p) = P \cdot x(t), \quad (13)$$

где $P = \{ p_{ij} \}_{n \times n}$ – вещественная $n \times n$ матрица, то тогда закон управления (11) имеет вид [3]

$$\dot{u}(x, t) = L \cdot \left[Y \cdot \{ f(x, u, \xi, t) - P \cdot x(t) \} - \tilde{Z} \cdot f(x, u) - H \cdot \xi(t) \right]. \quad (14)$$

Обобщенная структура системы управления, включающая динамический нелинейный регулятор с законом управления (14), показана на рисунке 3.

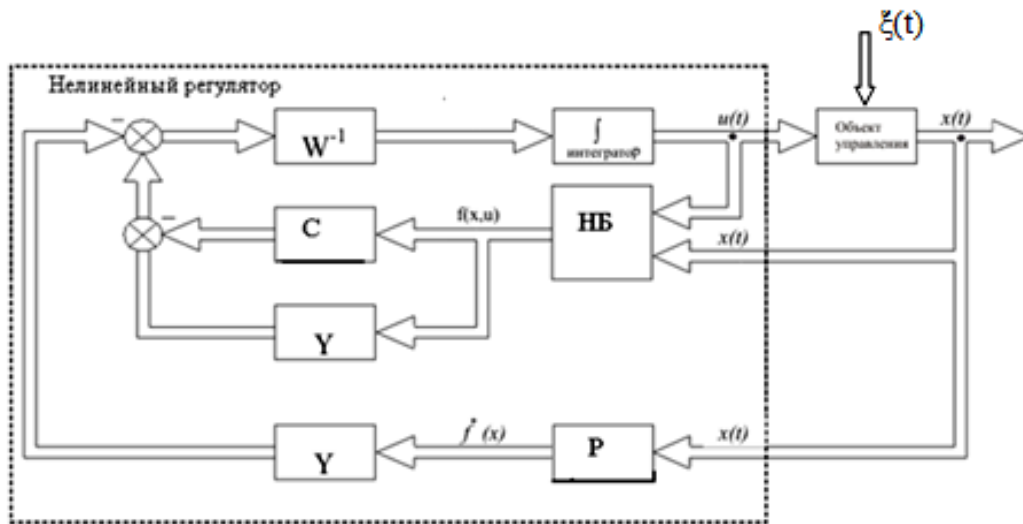


Рис. 3. Обобщенная структура САУ.

На основе прикладного пакета программирования MATLAB в автоматизированном режиме были получены алгоритмы управляющих воздействий, выведены графики уровней нефти в резервуарах, а также выходные переменные группы резервуаров. Управляющие воздействия на объект управления имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{du_1}{dt} = & (p(x_1^2(x_1)^2) + (2x_2^2(x_2)^2)/(3(x_1)^2) - (2px_2^2(x_2)^2)/(3(x_1)^2))(l_{15})/(2px_1^2) - l_{11}/(px_1^2)l_{15}/(px_1^3) - l_{11} / \\ & / (px_1^2) + 2l_{11}/(px_1^3) - l_{12}/l_{16} + l_{15}/(2px_1^2) + l_{11}/(px_1^2)(p_{22} + l_{14}/(px_1^2)) + l_{12}/l_{16} + g_{22}(l_{15})/(2px_1^2) - p_{22}x_2 + (l_{11}/ \\ & (px_1^2)) - (p(x_1^2(x_1)^2 + 2x_2^2(x_2)^2)/(3(x_1)^2) - (2px_2^2(x_2)^2)/(3(x_1)^2))(l_{14})/(px_1^2) + l_{12}/l_{16}(l_{15})/(2px_1^2) + \\ & (l_{11}/(px_1^2)) + g_{11}(p_{11}x_1 - (3(u_1 + u_2))/(2px_1^2) + (l_{11}/(px_1^2)) - (l_{15})/(2px_1^2) - (l_{11}/(px_1^2))(p_{11} + l_{15})/(px_1^3) \\ & + l_{14}px_1^2) - 2l_{11}/(px_1^3) + l_{11}/l_{16} - (2px_2^2(l_{15}))/((2px_1^2) + l_{11}/(px_1^2))((3u_1)/(px_2^3)) + (2al_{11} + \sqrt{2\text{sign}(x_2 - x_3)}) \\ & (l_{18}) - \sqrt{2\text{sign}(x_2)}(l_{19})/(px_2^3) + (3a\sqrt{2\text{sign}(l_{19})} + \sqrt{2\text{sign}(l_{17})} - (\sqrt{2\text{sign}(l_{18})} + l_{12}/(2l_{17} - l_{13}/l_{15} + \\ & (\sqrt{2g\text{sign}(x_2)\text{sign}(x_2)})/(2(l_{19}))/((px_2^2) + ((3u_1)/(2px_2^2)) + l_{11} + \sqrt{2\text{sign}(x_2 - x_1)}(l_{18}) - \sqrt{2\text{sign}(x_2)} \\ & (l_{19})/(px_2^2))(p_{33} + (3a\sqrt{2\text{sign}(l_{18})} + l_{13}/l_{15}/(px_2^2))) + g_{33}((3u_1)/(2px_2^2)) - p_{33}(x_3) + l_{11} + (\sqrt{2\text{sign}(x_2 - x_3)}) \\ & (l_{18}) - \sqrt{2\text{sign}(x_2)}(l_{17}/(px_2^2)) - l_{14} + 3l_{12}/(2(l_{17}))/((3(u_1 - u_2))/(2px_1^2)) - (l_{11}/(px_1^2))/(px_2^2))/3. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{du_2}{dt} = & ((\pi(x_1^2(x_1)^2 + 2x_2^2(x_2)^2))/(3(x_1)^2) - ((2\pi x_2^2(x_2)^2)/(3(x_1)^2))(l_{15})/(2\pi x_1^2) - l_{11}/(\pi x_1^2)(l_{15})/ \\ & (\pi x_1^3) - l_{14}/(\pi x_1^2) + (2(l_{11}))/(\pi x_1^3) - l_{12}/l_{16} + l_{15}/(2\pi x_1^2) + l_{11}/(\pi x_1^2)(p_{22} + l_{14}/(\pi x_1^2)) + l_{12}/(2\pi x_1^2)(l_{17}) + \\ & g_{22}\text{sign}(l_{15})/(2\pi x_1^2) - p_{22}(x_2) + l_{11}/(\pi x_1^2)) - (\pi(x_1^2(x_1)^2 + 2x_2^2(x_2)^2))/(3(x_1)^2) - (2\pi x_2^2(x_2)^2)/ \\ & (3(x_1)^2)(l_{14})/(\pi x_1^2) + (l_{12})/(2\pi x_1^2)(l_{17})(l_{15})/(2\pi x_1^2) + l_{11}/(\pi x_1^2) - l_{15}/(2\pi x_1^2) - l_{11}/(\pi x_1^2)(p_{11} + l_{15}/ \\ & (\pi x_1^3)) + l_{14}/(\pi x_1^2) - (2(l_{11}))/(\pi x_1^3) + l_{12}/(2\pi x_1^2)(l_{17}) + g_{11}\text{sign}(p_{11}(x_1) - l_{15}/(2\pi x_1^2) + l_{11}/(\pi x_1^2)) \\ & - (2\pi x_2^2(l_{15}))/((2\pi x_1^2)) + (l_{11}/(\pi x_1^2))((3u_1)/(\pi x_2^3)) + (2(l_{11}) + \sqrt{2\text{sign}(x_2 - x_3)}(l_{18}) - \sqrt{2\text{sign}(x_2)} \\ & (l_{17})/(\pi x_2^3) + l_{14} + \sqrt{2\text{sign}(l_{17})} - \sqrt{2\text{sign}(l_{18})} + l_{12}/(2l_{17} - l_{13}/2(l_{18}) + (\sqrt{2g\text{sign}(x_2)\text{sign}(x_2)})/ \\ & (2(l_{19}))/(\pi x_2^2)) + ((3u_1)/(2\pi x_2^2) + l_{11} + \sqrt{2\text{sign}(x_2 - x_3)}(l_{18}) - \sqrt{2\text{sign}(x_2)}(l_{19})/(\pi x_2^2))(p_{33} + \end{aligned}$$

$$(3a(\sqrt{2\text{sign}(l_{18})}-l_{13})/(2(l_{11})\pi x_2^2))+g_{33}\text{sign}((3u_1)/(2\pi x_2^2)-p_{33}x_3+l_{11}+\sqrt{2\text{sign}(x_2-x_3)}(l_{18})-\sqrt{2\text{sign}(x_2)}(l_{19})/(\pi x_2^2))-l_{14}+(\sqrt{2g\text{sign}(\text{sign}(x_1-x_2)(x_1-x_2))}/(2(l_{17}))(l_{15})/((2\pi x_1^2)-l_{11})/(\pi x_1^2))/(\pi x_2^2)/3,$$

где

$$l_{11}=(3\sqrt{2a\text{sign}(x_1-x_2)}\sqrt{g|(x_1-x_2)|}); l_{12}=(3\sqrt{2a\text{sign}\cdot\text{sign}(x_2-x_3)}(x_2-x_3));$$

$$l_{13}=\sqrt{2g\text{sign}(\text{sign}(x_2-x_3)(x_2-x_3))}; l_{14}=(3\sqrt{2a\text{sign}}\sqrt{(g|(x_1-x_2)|)});$$

$$l_{15}=(3(u_1+u_2)); l_{16}=(2\pi x_1^2(\sqrt{g|(x_1-x_2)|)}); l_{17}=\sqrt{(g|(x_1-x_2)|)};$$

$$l_{18}=\sqrt{(g|(x_2-x_3)|)}; l_{19}=\sqrt{(g|x_2|)}.$$

Результаты моделирования продемонстрированы на рисунках 4, 5, 6, 7.

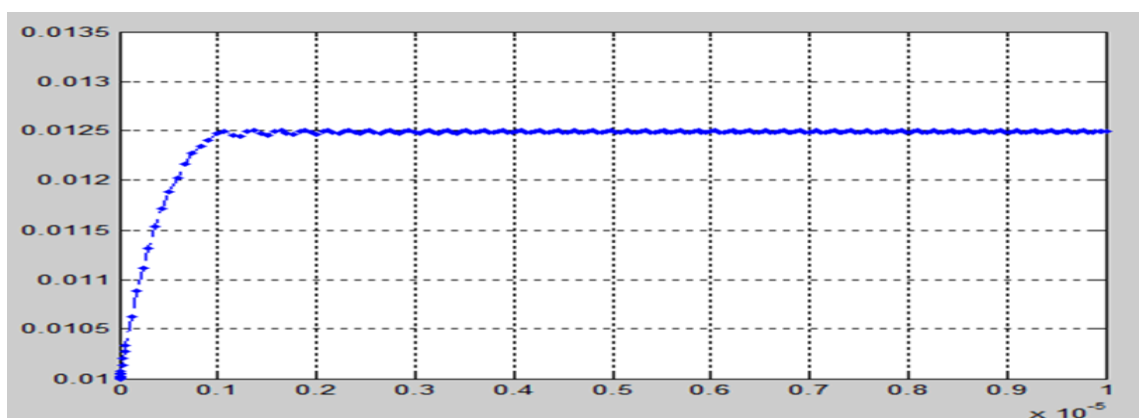


Рис. 4. Уровень жидкости 1-го резервуара $x_1=x_1(t)$.

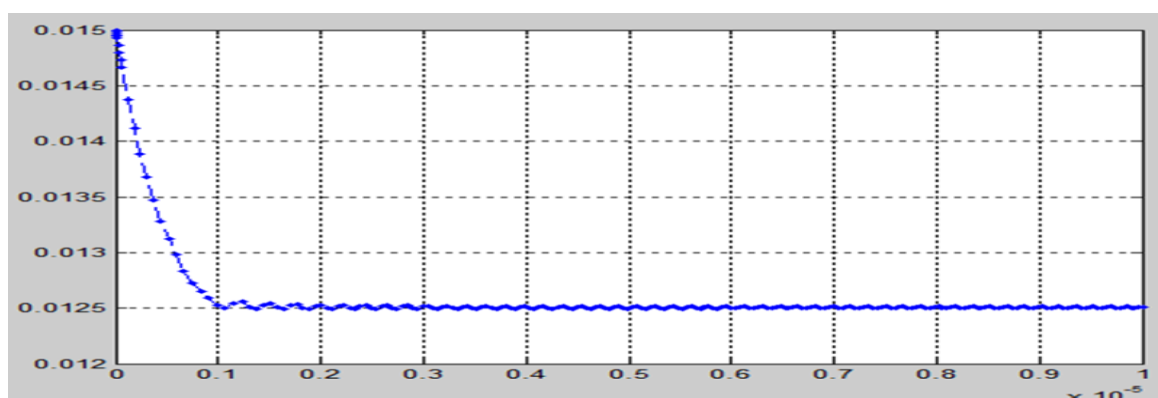


Рис. 5. Уровень жидкости 2-го резервуара $x_2=x_2(t)$.

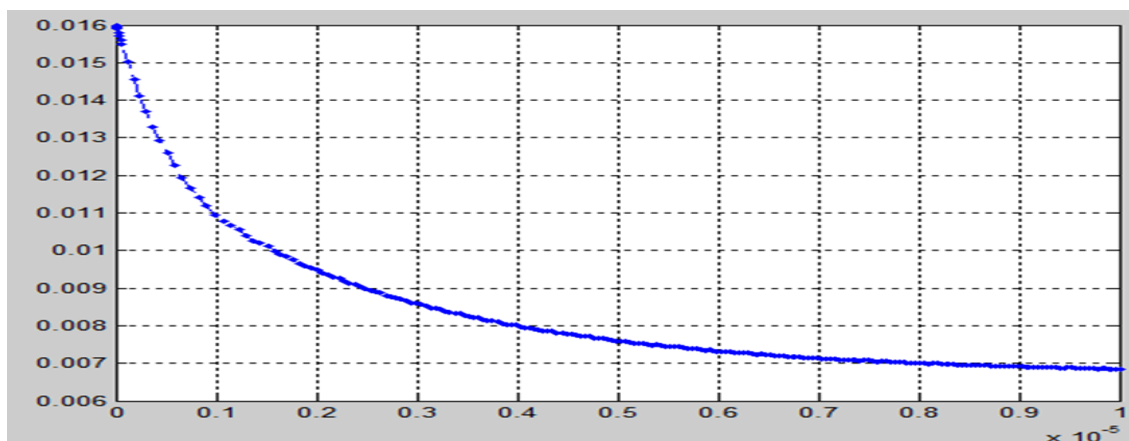


Рис. 6. Уровень жидкости 3-го резервуара $x_3=x_3(t)$

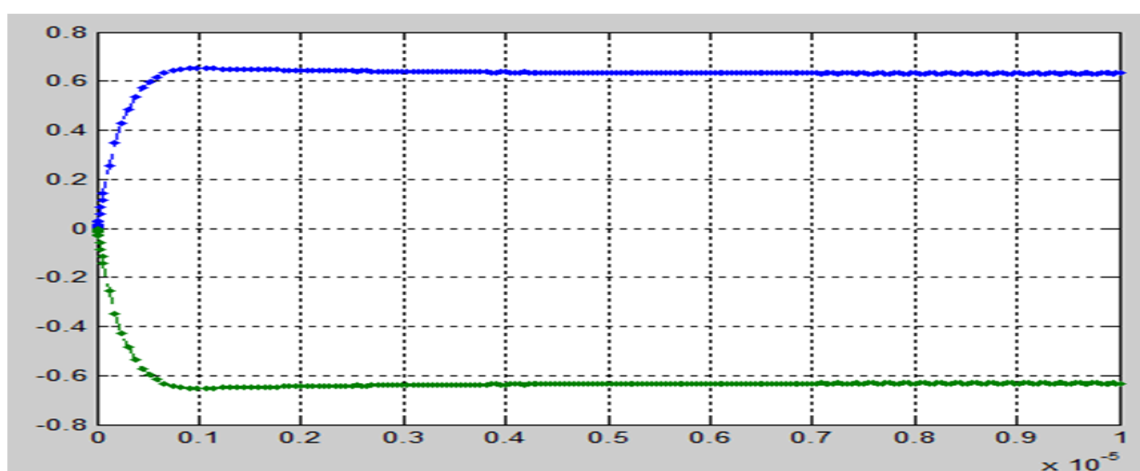


Рис. 7. Поток жидкостей $u_1=u_1(t)$ и $u_2=u_2(t)$.

В данной статье были рассмотрены общие сведения о резервуарах, используемых в нефтегазовой промышленности. В ходе исследования нам удалось выяснить, что автоматизация конического резервуарного парка позволяет увеличить пропускную способность парка, а также повышает качество управления процессом перекачки нефти. Далее были произведены некоторые технологические расчеты.

Таким образом, был разработан алгоритм управления резервуарами на основе метода структурного синтеза, представленного в [3]. На основании постановки задачи исследования использовано математическое описание в виде системы дифференциальных уравнений для трех резервуаров [1; 2], которые описывают состояние каждого резервуара, а также разработано программное обеспечение для реализации поставленных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников А. А. Синергетическая теория управления. – Таганрог, 1994. – 344 с.
2. Keller H. Vereinfacht Ljapunov – Synthese für nichtlineare Systeme // Automatisierungstechnik. – 1990. – № 3. – S. 111–113.
3. Джолдошов Б. О., Темиркулова Н. Т. Динамическое проектирование управляющего устройства для нелинейной системы с учетом инженерных показателей качества // Известия КГТУ. – 2013. – № 29. – С. 196–205.