Инженерный вестник Дона, №1 (2015)
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/3348

Синтез законов квазиоптимального управления технологическими объектами первого порядка

М.Н. Мохсен, Р.А. Нейдорф

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Целью статьи является выработка методологии автоматизации объектов производственных процессов, для которых производительность является фактором эффективности. Решается задача разработки метода синтеза быстродействующих законов автоматического управления, реализуемых при технологических ограничениях. Параллельно решается задача обеспечения асимптотической устойчивости систем, управляемых этими законами, что обеспечивает надежность реализации технологического процесса. Сформулированная общая проблема сложна, поэтому задачи решаются для простейших объектов первого порядка. Сущность подхода состоит в организации такого влияния на характер изменения производной выходной переменной объекта, которое обеспечивает быстродействующий, но асимптотически устойчивый переходный процесс ее изменения. Такое свойство формируется специальной нелинейной функцией, обусловливающей быстрое изменение переменной в удалении от равновесия, и асимптотическое приближение к равновесной точке. Разработана структура функции, формирующей математическую модель управляемой системы первого порядка. Функция параметрически зависит от двух факторов, обеспечивающих ей заданные свойства. В нее введен параметр ограничения производной выходной переменной, и параметр степени квазиоптимальности ее быстродействия. Управляющее воздействие, сформированное такой функцией, отвечает свойствам близости к оптимальному быстродействию, ограниченности производной и асимптотичности затухания переходных процессов управляемой системы. Асимптотическая устойчивость является одним из основных условий робастности динамической системы. Полученный результат важен для практических задач автоматизации технологических процессов большинства производств. Для ряда объектов быстродействие-это производительность, а устойчивость и робастность - решающий фактор надежности системы автоматического управления. Робастность необходима системам технологического регулирования, особенно химических процессов, ведущихся в критических каталитических режимах, а также для технологических линий производства пленки, бумажной ленты и т.п., в которых даже временное нарушение синхронности приводит к значительным и необратимым потерям. Полученные в работе результаты имеют как теоретическое значение, так и очевидное практическое применение, что делает ее публикацию актуальной.

Ключевые слова*:* производство, технология, процесс, объект, управление, производительность, быстродействие, ограничение, устойчивость, асимптотичность, квазиоптимальность, параметрическая настройка.

Введение.

Проблема оптимизации законов управления является одной из важнейших проблем современной теории автоматического управления [1-5]. Однако для задач оптимального управления характерно, что их аналитическое решение удается получить лишь в редких случаях. Это оказывается возможным, когда математическая модель объекта управления имеет невысокий порядок и содержит несложные нелинейности [1,6-8]. В связи с этим разрабатываются различные способы упрощенного решения задачи построения закона управления, близкого к оптимальному [1,8,9]. Такие законы называют квазиоптимальными [1,9].

Одной из наиболее актуальных задач теории оптимального управления является задача синтеза систем оптимального быстродействия [1,6,8,9]. Время регулирования входит в число основных показателей качества систем автоматического управления. В частности, для технических объектов, технология работы которых связана с механическим движением, повышение быстродействия системы имеет решающее практическое значение [10,11].

Классическим подходом к решению задач оптимального быстродействия является принцип максимума Понтрягина [12]. Однако он предлагает лишь формулировку необходимых и достаточных условий существования оптимума. Этот принцип не дает универсальной методики решения задачи синтеза закона управления для систем произвольного порядка и с произвольными нелинейностями. Поэтому точные аналитические решения задач оптимального быстродействия на основе этого принципа известны лишь для систем второго, максимум третьего порядков с нелинейностью типа «ограничение». Наличие в математических моделях других нелинейностей требует для решения задачи синтеза специальных научных исследований. Поэтому принцип максимума Понтрягина, оказывается практически малопригодным для решения подобных задач. Проблема состоит в отсутствии робастности у получаемых законов управления. Неадекватность динамических свойств управляемого объекта расчетным данным приводит к потере качества управления. Важнейшей причиной этого феномена является неасимптотичность релейно управляемых автоматических систем. Закон управления формирует поведение системы на интервале, определенном решением задачи о максимальном быстродействии. Дальнейшее ее поведение определено собственными свойствами [12]. Однако многие объекты управления (ОУ), в особенности летательные аппараты [9,13-19], транспортные средства, каталитические и ядерные реакторы и др., обладают либо нейтральной, либо неустойчивой динамикой.

Таким образом, благодаря полученному в [12] результату, теория автоматического управления была поставлена перед выбором между линейными и разрывными законами управления. Линейные системы привлекательны гладкими, асимптотически устойчивыми и робастными процессами. Системы с разрывными, но естественно ограниченными оптимальными законами управления позволяют максимально использовать динамические ресурсы объектов. Естественное стремление сочетать достоинства обоих подходов привели к появлению и развитию многих направлений: системы с переменной структурой, адаптивное управление, а также квазиоптимизация управления [9, 20-22].

В данной работе рассматривается вариант реализации квазиоптимального по быстродействию управления техническими объектами или технологическими системами, опирающийся на формировании в законе движения динамической системы (ДС) нелинейных инвариантных многообразий, обеспечивающих предельное быстродействие [20, 23]. Если в основу принципа построения такого многообразия положить результаты, полученные для систем первого порядка, то, применяя системные принципы, можно на основе таких результатов строить системы более высокого порядка. Поэтому в настоящей работе дается решение задачи построения нелинейных математических моделей (ММ) первого порядка, сочетающих асимптотически устойчивые решения с форсированной динамикой переходных процессов при достаточно широком классе нелинейностей ОУ.

Это должно позволить построение системы квазиоптимального быстродействия более высокого порядка на основе рекуррентной процедуры.

Квазиоптимизация быстродействия динамической системы первого порядка. Постановка задачи.

Пусть вход-выходная ММ нелинейной ДС 1-го порядка задана в стандартной форме Коши выражением

$$\dot{y}(t)=\varphi_1\left[y(t),u(t)\right] \tag{1}$$

где $\varphi_1[\circ]$ - некоторая нелинейная аналитическая функция выходной и управляющей переменных [23].

Необходимо найти структуру и параметры функции $\varphi_1(y,u)$, обеспечивающую в ДС ограниченные по скорости переходные процессы, приближающиеся к переходным процессам оптимального быстродействия, но сохраняющие асимптотическую устойчивость. Причем в структуру функции $\varphi_1(y,u)$ должен входить параметр, обеспечивающий настройку степени приближения процессов к оптимальным по быстродействию. То есть функция $\varphi_1(y,u)$ должна содержать параметр настройки квазиоптимальности.

Необходимо заметить, что свойство квазиоптимального быстродействия должны иметь как собственные, так и вынужденные переходные процессы конструируемой ДС. Наиболее естественно решить сначала задачу обеспечения квазиоптимальности собственных движений ДС 1-го порядка.

Однородное дифференциальное уравнение 1-го порядка с квазиоптимальным по быстродействию решением

В общем виде однородное дифференциальное уравнение (1) нелинейной ДС можно выбрать следующей структуры:

$$\dot{y}=\alpha(y,\mathrm{P})\cdot y \tag{2}$$

где $\alpha(y,\mathrm{P})$ - некоторая нелинейная аналитическая функция переменной состояния и некоторого множества параметров $\mathrm{P}=\{\pi_i\}$, значения которых должны обеспечить сформулированные в постановке задачи требования. Более строго эти требования сформулированы в нижеследующих пунктах [20, 23].

1. Требование асимптотической устойчивости.

Методом функций Ляпунова можно показать, что для асимптотической устойчивости решения (2) достаточно выполнения следующего условия

$$\forall\, y \neq 0 \rightarrow \alpha(y,\mathrm{P}) < 0 \tag{3}$$

2. Требование ограничения интенсивности движения.

Это требование выражается следующим условием

$$|\,\dot{y}\,| = |\,\alpha(y,\mathrm{P}) \cdot y\,| \leq s_m \tag{4}$$

где $S_m = \max\left(\left|\frac{d\,y}{d\,t}\right|\right) > 0$ - максимально допустимая скорость изменения переменной y.

3. Требование высокого быстродействия.

Основным требованием к ДС (2) является поддержание максимально близкого к предельному значения производной $\dot{y}$ на всем временном отрезке активного изменения переменной y при ограничении (4). Принцип максимума для такого ограничения дает известное решение:

$$\dot{y} = \begin{cases} -S_m \cdot sign(y) \;\forall\, y \neq 0; \\ 0 \;\forall\, y = 0. \end{cases} \tag{5}$$

Однако нелинейная разрывная функция правой части (5) не обеспечивает асимптотичности переходного процесса в общем случае, а значит и робастности. В связи с этим необходимо поступиться точным оптимальным решением, но максимально приблизиться к нему, сохраняя свойство аналитичности решения уравнения (2).

4. Требование аналитичности.

В соответствии с этим требованием при реализации функции $\alpha(y, \mathrm{P})$, необходимо обеспечить ее дифференцируемость. Следовательно, необходимо незначительно поступиться быстродействием, и построить аналитическую функцию, которая может приближаться по свойствам к правой части (5). Эту задачу можно решить различными способами.

Исследования позволили выделить в качестве наиболее перспективной функцию $\alpha(\circ)$ со следующими структурой и параметрами [9,20,26].

$$\alpha_{quasy}(y, s_m, \varepsilon) = -S_m \cdot \left(y^2 + \varepsilon^2\right)^{-1/2} \tag{6}$$

где ε - вещественное число, которое структурно обеспечивает аналитичность функции (6), а количественно обеспечивает заданную степень приближения ее к аппроксимируемой функции (4).Наличие в формуле параметра ε обеспечивает исключение неопределенности функции в точке y=0. При уменьшении параметра ε степень приближения (5) к (4) увеличивается [20].

Таким образом, нелинейную функцию $\alpha(\circ)$ в уравнении ДС (2) можно представить параметрически зависимым выражением (5) с $\mathrm{P} = \{S_m, \varepsilon\}$ [9,20]. Тогда уравнение (2) может быть представлено в следующей форме:

$$\dot{y} = \alpha_{quasy}(y, S_m, \varepsilon) \cdot y = -S_m \cdot \left(y^2 + \varepsilon^2\right)^{-1/2} \cdot y \tag{7}$$

Уравнение (7) удовлетворяет требованию аналитичности, условию асимптотической устойчивости (3) и условию ограниченности производной $\dot{x}$ - (4). Это нетрудно проверить. Кроме того, уравнение (7) обеспечивает условие квазиоптимальности быстродействия в пределах ограничения (4). Для доказательства этого свойства необходимо исследовать закон изменения времени затухания решения однородного дифференциального уравнения (7) при произвольных ненулевых начальных условиях.

Время затухания $t_r^{kvop}(y_0, s_m, \varepsilon, \delta)$ решения (7) при отклонении y_0 и заданной допустимой ошибке δ определится выражением

$$t_r^{kvop}(y_0, s_m, \delta, \varepsilon) = \frac{1}{S_m} \cdot \left[\left(y_0{}^2 + \varepsilon^2\right)^{1/2} - \left(\delta^2 + \varepsilon^2\right)^{1/2} + \right.$$

$$\left. + \varepsilon \cdot \ln(y_0/\delta) + \varepsilon \cdot \ln\left(\left[\varepsilon + \left(\delta^2 + \varepsilon^2\right)^{1/2}\right] / \left[\varepsilon + \left(y_0{}^2 + \varepsilon^2\right)^{1/2}\right]\right) \right] \quad (8)$$

Предел правой части (8) определится выражением

$$t_r^{opt} = \lim_{\varepsilon \to 0} \left[t_r^{kvop}(y_0, s_m, \delta, \varepsilon) \right] = \left(|y_0| - \delta \right) / S_m \quad (9)$$

Нетрудно проверить, что предел (9) есть минимальное время достижения переменной y некоторой δ-границы стационарного состояния ДС при наличии ограничения S_m на скорость $\dot{y}$.Это показано на рисунке 2.Свойство (9) доказывает «параметрическую квазиоптимальность» ДС (7) и возможность настройки «степени квазиоптимальности» этой ДС параметром ε .

Исследования показывают, что параметрически квазиоптимальные модели обладают во много раз более высоким быстродействием, чем линейные. Они уступают оптимальным моделям, но, в зависимости от величины ε , на 2 - 10% от оптимального времени регулирования.

Вместе с квазиоптимальными по быстродействию свободными движениями на рис.1 для сравнения показаны линейные и строго оптимальные по быстродействию процессы. Хорошо видно, что квазиоптимальные процессы Y_{quasy} существенно выигрывают у линейных процессов Y_{linear} в быстродействии, и незначительно уступают по времени затухания оптимальным процессам Y_{opt}. Однако квазиоптимальные процессы обладают чрезвычайно ценным свойством - асимптотической устойчивостью.

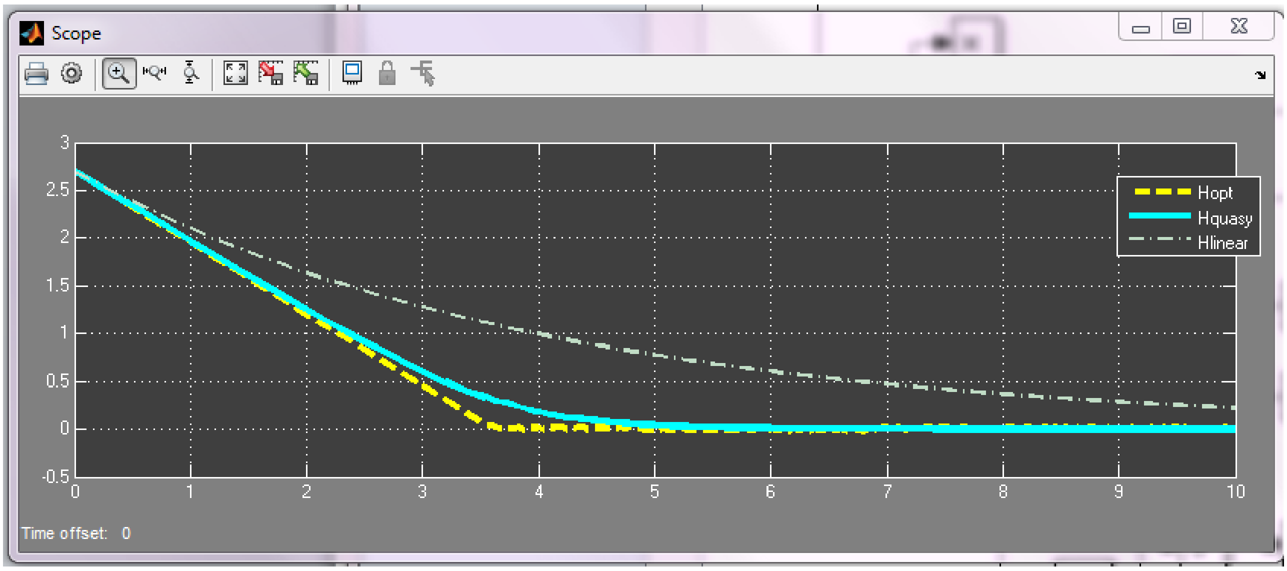

Рис. 1. – Собственные движения в оптимальной, квазиоптимальной и линейной ДС 1-го порядка

Следует заметить, что термин «квазиоптимальность по быстродействию» не может считаться строгим, пока не введено и не обосновано понятие «степени квазиоптимальности» как меры приближения к оптимальному значению оптимизируемого критерия. Полученный в [20] результат позволил создать такую меру в виде оценки μ_τ, вычисляемой как отношение правых частей выражений (9) и (8), в виде следующей формулы:

$$\mu_\tau = \left(\left|y_0\right| - \delta\right) / \left[S_m \cdot t_r^{kvop}\left(y_0, s_m, \delta, \varepsilon\right)\right] \qquad (10)$$

Используя формулу (10) можно вычислить неявно заданную величину ε, обеспечивающую требуемую степень квазиоптимальности μ_τ. Для этого нужно задаться величиной δ-границы и значением начального состояния y_0.

Синтез системы квазиоптимального быстродействия первого порядка

Полученная выше квазиоптимальная по быстродействию ММ 1-го порядка представлена однородным дифференциальным уравнением (ДУ). Математические модели систем автоматического управления (САУ) должны описываться неоднородными ДУ. В их правые части должны входить задающие воздействия $z(t)$. Наиболее информативной переменной САУ является ошибка регулирования $e(t) = z(t) - y(t)$ [9,20]. Поэтому ДУ, задающее ММ квазиоптимальной по быстродействию (КОБ) системы 1-го порядка, примет форму

$$\dot{y} = \alpha_{quasy}(e, s_m, \varepsilon) \cdot y = -s_m \cdot e \cdot \left(e^2 + \varepsilon^2\right)^{-1/2} \qquad (11)$$

Другими словами ММ автоматической системы ОУ с выходной переменной y, которая характеризуется квазиоптимальным быстродействием затухания переходного процесса подавления ошибки регулирования (во введенном в [20 и 9] понимании), может быть представлена нелинейным ДУ следующего вида:

$$\dot{y}(t) = s_m \cdot [z(t) - y(t)] \cdot \left\{[z(t) - y(t)]^2 + \varepsilon^2\right\}^{-1/2} \qquad (12)$$

Дифференциальное уравнение (12) проанализировано по аналогии с анализом ММ (7). Анализ показал полное соответствие этой модели требованиям, сформулированным в постановке задачи.

Задача синтеза закона управления (ЗУ) технологическим объектом состоит в построении ЗУ следующего общего вида

$$u(t) = \upsilon_1[z(t), y(t), v(t)] \qquad (13)$$

где $\upsilon_1(\circ)$ - некоторая, в общем случае нелинейная, аналитическая функция времени t, которая при этом зависит от задающего воздействия $z(t)$, выходной переменной $y(t)$ и возмущающего воздействия $v(t)$.

Эта зависимость должна быть такой, чтобы воздействие $u(t)$ на произвольный объект (возможно, нелинейный), описываемый ДУ первого порядка общего вида (1), обеспечивало поведение замкнутой САУ по закону (13) [23-25]. Получить подобный результат для уравнений (1) и (12) не представляется сложным, т.к. оба из них имеют форму Коши. В самом деле, ввиду того, что левые части обоих уравнений представлены первой производной одной и той же переменной - $y(t)$, можно приравнять и их правые части. Тогда

$$\varphi_1[y(t),u(t)] = s_m \cdot [z(t) - y(t)] \cdot \left\{[z(t) - y(t)]^2 + \varepsilon^2\right\}^{-1/2} \tag{14}$$

Выражение (14), в общем случае, является неявным относительно переменной $u(t)$, что значительно затрудняет выделение из него управляющего воздействия. Однако во многих ММ ТО структура $\varphi_1[y(t),u(t)]$ разделить переменные. Примером может служить простая аддитивная форма вида

$$\dot{y}(t) = \varphi_1^y[y(t)] + \varphi_1^u[u(t)] + \varphi_1^v[v(t)], \tag{15}$$

или мультипликативно-аддитивная, например,

$$\dot{y}(t) = \varphi_1^y[y(t)] \cdot \varphi_1^u[u(t)] + \varphi_1^v[v(t)], \tag{16}$$

где $\forall y(t) \in Y \to \varphi_1^y[y(t)] \neq 0$.

Для каждой из структур ММ ТО типа (25), (36) и других возникает возможность построить типовую структуру нелинейного КОБ ЗУ, и создать набор типовых КОБ законов, наподобие типовых линейных ЗУ. Однако в данной статье эта задача не решается ввиду ее ограниченного объема. Авторы ограничиваются постановкой задачи и иллюстрацией ее применения на реальном примере, предполагая продолжить тему в дальнейших публикациях.

Пример синтеза и исследования КОБ САУ для поддержания запаса в буферной технологической емкости.

В качестве примера рассмотрим синтез квазиоптимального по быстродействию закона управления уровнем в буферной технологической емкости, схематически изображенной на рис.2. Такой

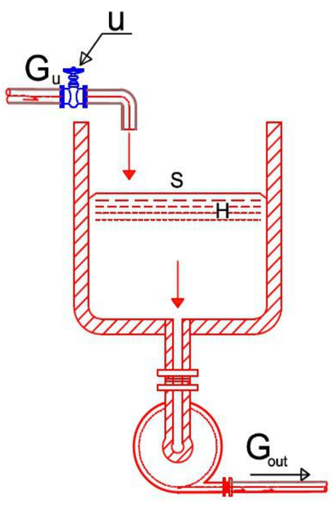

Рис. 2. – Расчетная схема модели технологической буферной емкости

объект в первом приближении с достаточной точностью описывается ДУ

$$\dot{H}(t) = k_u \cdot [G(t) - G_{out}] \quad (17)$$

где $H(t)$ - текущий уровень в буферной емкости (м); $k_u = 1/S$ =0,25 - коэффициент влияния управляющего воздействия (расхода технологического потока $G(t)$) на скорость роста уровня $H(t)$ в емкости (м$^{-2}$); S=4,0 м^2 - площадь зеркала жидкости в емкости [26].

Максимальный расход через входной трубопровод (G_m=0,06 м^3/с) конструктивно ограничен пропускной способность управляющего клапана: $G(t) \le G_m$.

При интенсивном отборе жидкости из буферной емкости, или при смене уставки на необходимый технологический запас возникает проблема очень затянутого процесса ликвидации ошибки линейным типовым регулятором. С другой стороны, слишком сложное схемное решение, связанное с реализацией оптимального по быстродействию закона управления, экономически неоправданно. Поэтому построение закона квазиоптимального управления, хоть и нелинейного, но сравнительно просто реализуемого, как схемно, так и программно, видится целесообразным.

В соответствии с результатом (12) ММ проектируемой квазиоптимальной по быстродействию автоматической системы управления уровнем в буферной емкости для получения квазиоптимального быстродействия заполнения должен иметь следующую форму:

$$\dot{H}(t) = \frac{G_m}{\sqrt{(H_z(t) - H(t))^2 + \varepsilon^2}} \cdot (H_z(t) - H(t)) \quad (18)$$

где $H_z(t)$ - текущее заданное значение уровня.

Несложными преобразованиями можно получить, что для описания ММ (14), автоматическая система объекта с ММ (13) должна иметь следующий закон управления, представленный схемно на рис.3:

$$G(t) = G[H(t), H_z(t)] = \frac{G_m}{k_u} \cdot [H_z(t) - H(t)] \cdot \left\{[H_z(t) - H(t)]^2 + \varepsilon^2\right\}^{-0,5}. \qquad (19)$$

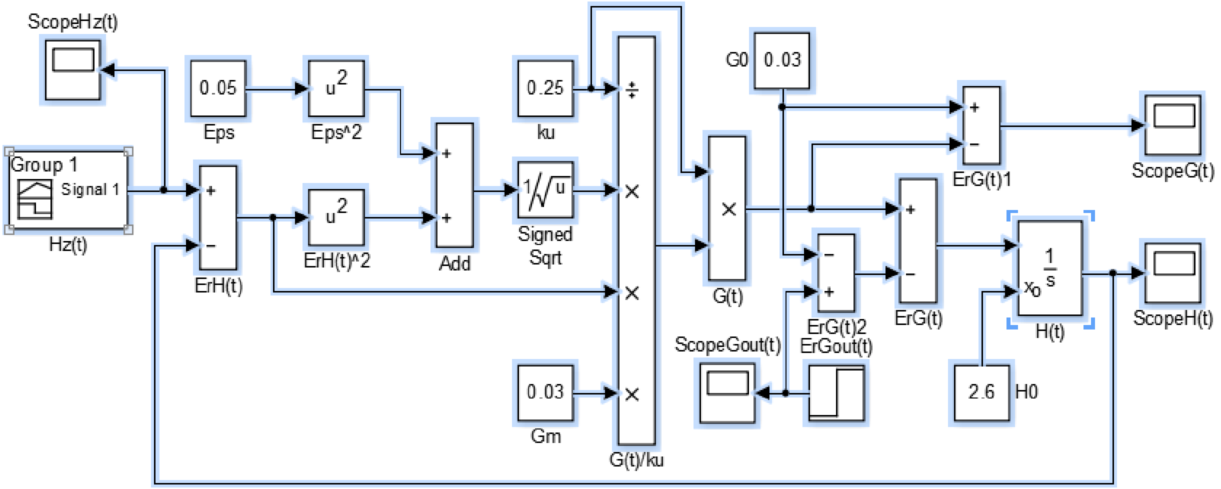

Рис. 3. – Схема моделирования квазиоптимальной по быстродействию САУ управления запасом в технологической буферной емкости

Корректность результатов синтеза автоматической системы проверена имитационным моделированием с помощью схемы ее моделирования, спроектированной для КОБ управления уровнем. Схема на рис. 3 построена в приложении Simulink пакета Matlab.

На рисунке 4 приведены графики входных воздействий и переходных процессов в КОБ системе, полученные моделированием. На скриншоте "ScopeHz(t)" показана последовательная смена задающего воздействия $Hz(t)$. На скриншоте "ScopeH(t)" показаны кривые изменения уровня $H(t)$, происходящего под управляющим воздействием $G(t)$ (скриншот "ScopeG(t))"). На скриншоте "ScopeGout(t)" показан вариант ступенчатой смены расхода $G_{out}(t)$, имитирующего технологическое возмущение. Хвостовая часть кривой изменения уровня $H(t)$ отображает реакцию, переходного скриншоте "ScopeH(t)" иллюстрирует реакцию КОБ системы на это возмущение.

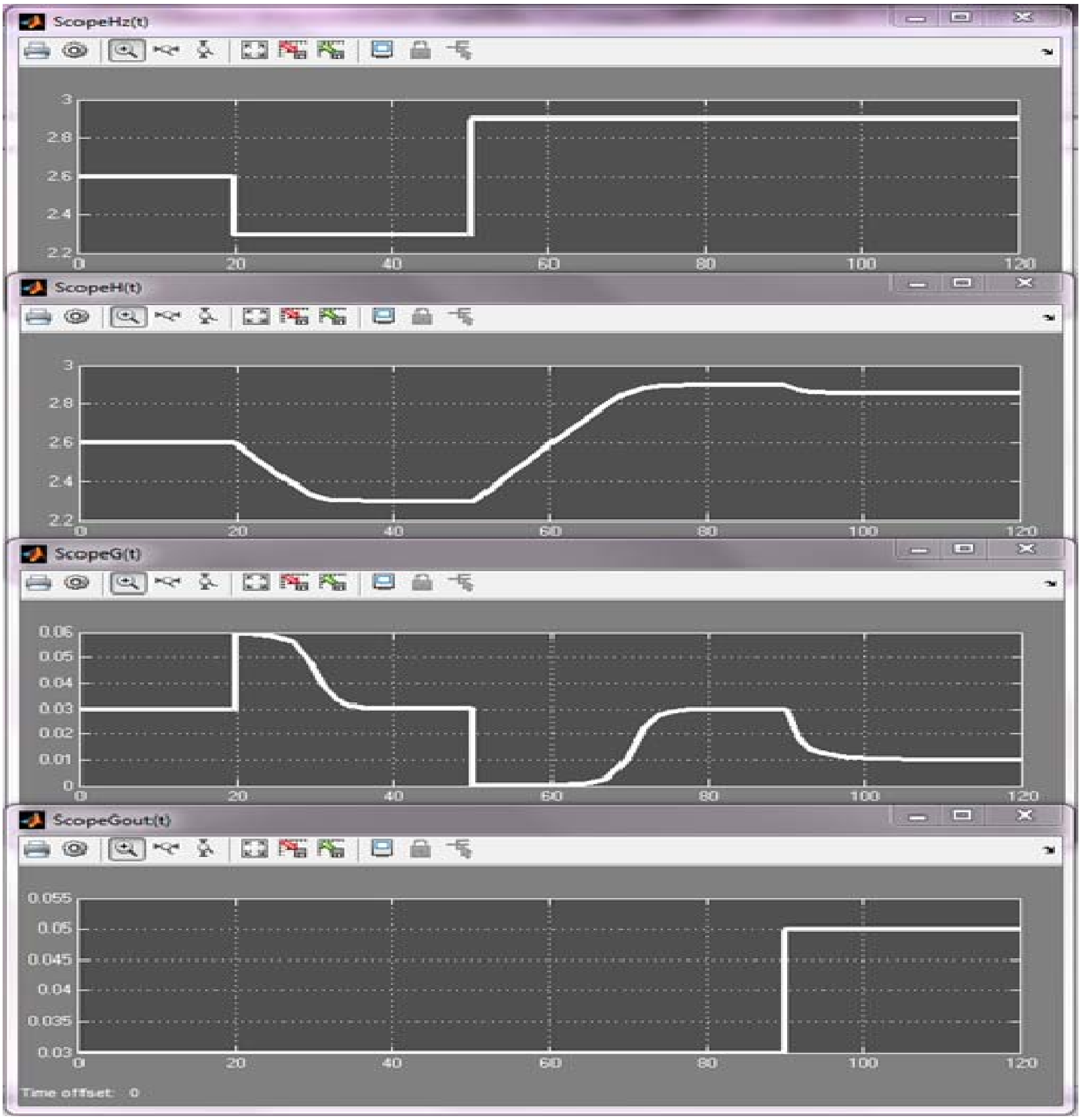

Рис. 4. – Отработка квазиоптимальной САУ уровня входных и возмущающих воздействий

При номинальном значении $G_{out}(t)$=0,03 м^3/с регулятор удерживает равновесие и $H(t) = Hz(t)$=2,6 м. При ступенчатом уменьшении задания КОБ регулятор выдает и удерживает некоторое время максимально допустимое воздействие $G(t) = G_m$=0,06 м^3/с. Таким образом, передний фронт управляющего импульса практически воспроизводит форму оптимального по Понтрягину прямоугольного импульса. При этом задний его фронт при выбранном значении $\varepsilon = 0{,}05$ существенно искажен. Однако график $H(t)$ показывает, что изменение уровня протекает с практически постоянной скоростью (т.е. близко к оптимальному процессу), и лишь вблизи заданного значения $Hz(t)$=2,3 м снижение уровня становится асимптотическим. Аналогично протекает процесс увеличения запаса до $H(t) = Hz(t)$=2,9 м.

При номинальном значении возмущения КОБ закон регулирования обеспечивает абсолютную точность, но при появлении возмущающего воздействия возникает статическая ошибка, поскольку КОБ закон не содержит астатической составляющей. Это иллюстрируют переходные процессы в конечной части графиков управления. Когда $G_{out}(t)$ резко возрастает до значения 0,05 м^3/с, КОБ регулятор не справляется с заданием, и допускает ошибку около 0,05 м. Однако для рассматриваемого объекта это не критично, а быстродействие важно.

Переходные процессы на рис.4 хорошо иллюстрируют повышение качества управления за счет введения в его закон нелинейной функции вида (6). У этой функции 2 настроечных параметра: S_m и ε. Величина ограничивающей скорость изменения управляемой выходной переменной настройки S_m выбирается, исходя из конструктивных и физико-механических свойств объекта (в данном примере – гидравлических). Величина настройки ε определяет, как указывалось выше «степень квазиоптимальности» закона управления, т.е. определяет баланс между быстродействием и асимптотической устойчивости автоматической системы. В связи с этим синтезированная КОБ система управления уровнем исследована на влияние на ее свойства величины ε.

На рис.5 показан переходные процессы управления и управляемой величины при $\varepsilon = 0{,}2$ (сплошная линия) и $\varepsilon = 0{,}01$ (пунктир). При $\varepsilon = 0{,}01$ система воспроизводит задание с минимальной погрешностью ("ScopeH(t)").

Ошибка по $H(t)$ возникает только на этапе перехода в новое установившееся значение из-за естественного ограничения скорости набора уровня, обусловленного ограниченной проводимостью трубопровода. Управляющие импульсы при этом вплотную приближаются к классической прямоугольной форме (скриншот "ScopeG(t))"). Ошибка, вызванная возмущением, практически незаметна.

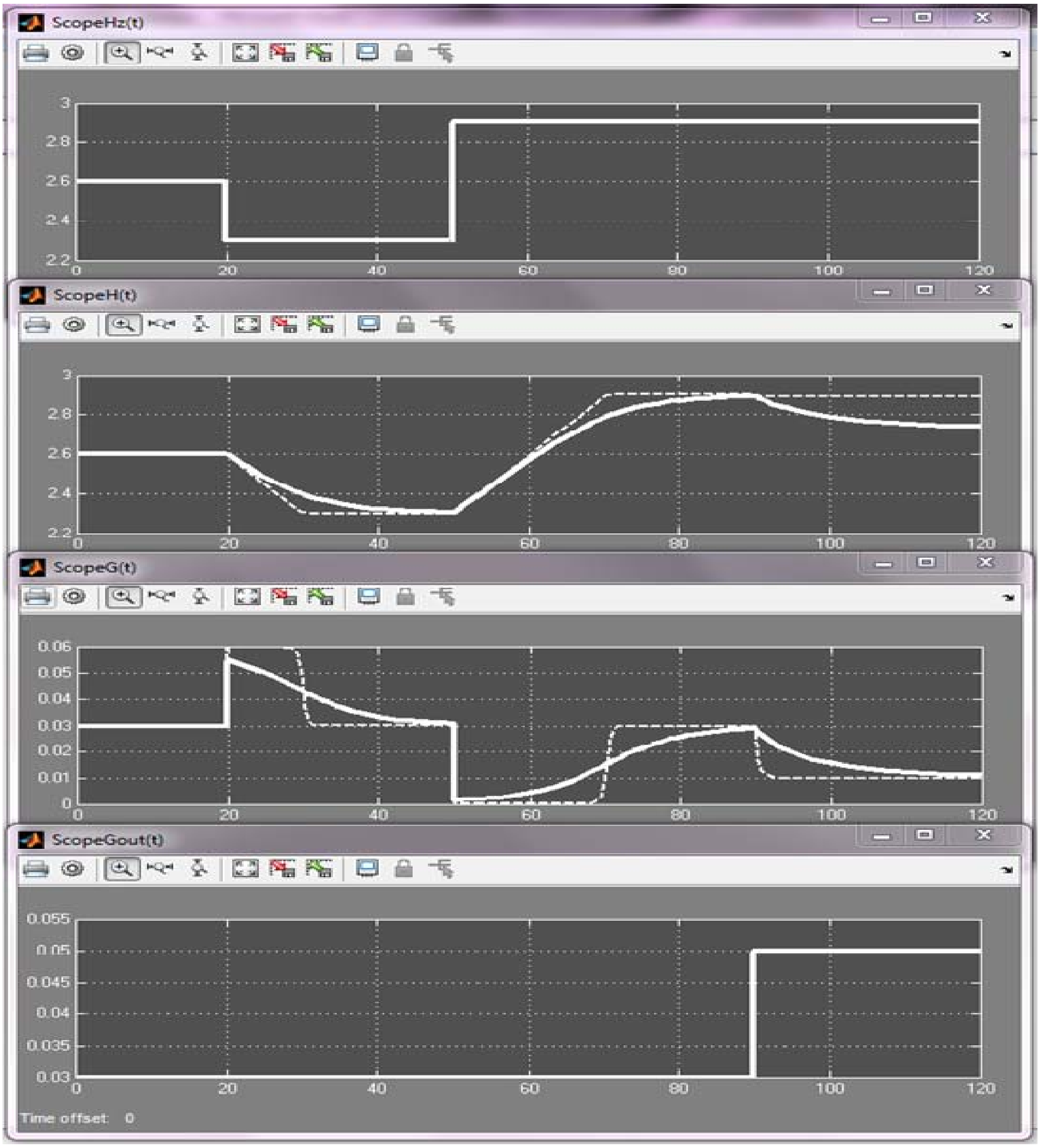

Рис. 5. –. Качество управления в квазиоптимальной САУ при разных ε

При $\varepsilon = 0{,}2$, напротив, переходные процессы по выходной переменной затянуты, управляющие импульсы сглажены, и не всегда достигают предельного значения. Ошибка подавления возмущения увеличивается в несколько раз.

Заключение

Рассмотренный в статье параметрически настраиваемый метод квазиоптимального по быстродействию управления является чрезвычайно эффективным и перспективным инструментом решения задач автоматизации технологических процессов. Исследование синтезированной в рамках парадигмы метода системы автоматического регулирования уровня в буферной емкости подтвердило эффект высокого и настраиваемого быстродействия, асимптотической устойчивости и эффективного подавления ошибки регулирования. Полученные результаты позволяют ставить и решать задачу разработки типовых КОБ ЗУ для типовых ТОУ, сформулированную в общем виде в настоящей статье.

Литература

1. Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 736 с.

2. Bryson A.E., Applied Linear Optimal Control, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2002. 384 p.

3. Bertsekas D.P., Nedi´c A., Ozdaglar A.E. Convex Analysis and Optimization, Athena Scientific, Nashua, NH, 2003. 560 p.

4. Kirk D.E., Optimal Control Theory: An Introduction. Mineola, New York: Dover Publications, 2004. 480 p.

5. Bertsekas D.P., Dynamic Programming and Optimal Control, Athena Scientific, Nashua, NH, 3rd ed., vol. 1, 2005, vol. 2, 2007. 558 p.

6. Naidu D.S. Optimal control systems, by CRC Press LLC 2003. 464 p.

7. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. — СПб.:Питер, 2006. 271 с.

8. Geering Hans P. Optimal Control with Engineering Applications, ISBN 978-3-540-69437-3 Springer Berlin Heidelberg New York, 2007. 144 p.

9. Neydorf R. Synthesis of Time Quasi-Optimal Asymptotically Stable Control Laws, SAE Technical Paper 2015-01- 2481, 2015, 8 p., doi:10.4271/2015-01-2481.

10. Красовский Н.Н. Теория управления движением. Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1968, 476с.

11. Красовский Н.Н. Игровые задачи о встрече движений // Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1970. 420 с.

12. Понтрягин Л.С. Принцип максимума в оптимальном управлении // Изд. 2-е, стереотипное. М.: Елиториал УРСС, 2004. 64 с.

13. Pshikhopo V., Medvedev M., Neydorf R., Krukhmalev V., Kostjukov V., Gaiduk A., Voloshin V. Impact of the Feeder Aerodynamics Characteristics on the Power of Control Actions in Steady and Transient Regimes, SAE Technical Paper 2012-01-2112, 10 p., doi:10.4271/2012-01-2112.

14. Neydorf R., Sigida Y., Voloshin V. and Chen Y. Stability Analysis of the MAAT Feeder Airship During Ascent and Descent with Wind Disturbances, SAE Technical Paper 2013-01-2111, 2013, 10 p., doi:10.4271/2013-01-2111.

15. Voloshin V., Chen Y., Neydorf R., Boldyreva A. Aerodynamic Characteristics Study and Possible Improvements of MAAT Feeder Airships, SAE Technical Paper 2013-01-2112, 2013, 7 p., doi: 10.4271/2013-01-2112.

16. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А. и др. Система позиционно-траекторного управления роботизированной

воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления// / Мехатроника, автоматизация и управление. 2013, № 7. С. 13 - 20.

17. Пшихопов В.Х., Гуренко Б.В. Разработка и исследование математической модели автономного надводного мини-корабля «Нептун» // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1918.

18. Пшихопов В.Х., Федотов А.А., Медведев М.Ю., Медведева Т.Н., Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами // Инженерный вестник Дона, 2014, № 3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2496.

19. Neydorf R., Novikov S., and Fedorenko R., Continuous-Positional Automatic Ballonet Control System for Airship, SAE Int. J. Aerosp. 6(2):2013, pp. 598- 606, doi: 10.4271/2013-01-2236.

20. Neydorf R., Novikov S., and Kudinov N., Airship Positioning Fuzzy Multi-Ballonet Control Study, SAE Technical Paper 2014—01-2146, 2014, 8 p., doi: 10.4271/2014-01-2146.

21. Pshikhopov V., Krukhmalev V., Medvedev M., and Neydorf R. Estimation of Energy Potential for Control of Feeder of Novel Cruiser/Feeder MAAT System, SAE Technical Paper 2012-01-2099, 2012, 5p, doi: 10.4271/2012-01-2099.

22. Нейдорф Р.А. Нелинейное ускорение динамических процессов управления объектами первого порядка с учетом ограниченности воздействий // Вестник ДГТУ: Управление и диагностика в динамических системах. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 1999. С. 13-21.

23. Нейдорф Р.А. Рекуррентно-диффеоморфный синтез квазиоптимальных по быстродействию ограниченных законов управления / Р.А. Нейдорф, Н.Н. Чан // «Информатика и системы управления», 2006. №2(12). 2006. С. 119-128.

24. Нейдорф Р.А., Чан Н.Н. Системные методы экономии ресурсов при управлении техническими объектами // Известия ТРТУ , 2006. № 15. С. 42-46.

25. Нейдорф Р.А. Эффективная аппроксимация кусочных функций в задачах квазиоптимального по быстродействию управления. Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-2000: Сб. трудов Междунар. науч. конф. В 7-и т. Т. 2. Секции 2, 8/ Санкт-Петербургский гос. Технол. ин-т (техн. ун-т). Санкт-Петербург, 2000. С. 18-22.

26. Нейдорф Р.А., Ситников А.В. Моделирование химико-технологических процессов на микроЭВМ: Учебное пособие. - Новочеркасск: НПИ, 1986. 88 с.

References

1. Egupov N.D. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. T. 2. Sintez regulyatorov i teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya Pod red. N.D. Egupova. [Methods of classical and modern theory of automatic control]. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2000. 736 p.
2. Bryson A.E., Applied Linear Optimal Control, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2002. 384 p.
3. Bertsekas D.P., Nedi´c A., Ozdaglar A.E. Convex Analysis and Optimization, Athena Scientific, Nashua, NH, 2003. 560 p.
4. Kirk D.E., Optimal Control Theory: An Introduction. Mineola, New York: Dover Publications, 2004. 480 p.
5. Bertsekas D.P., Dynamic Programming and Optimal Control, Athena Scientific, Nashua, NH, 3rd ed., vol. 1, 2005, vol. 2, 2007. 558 p.
6. Naidu D.S. Optimal control systems, by CRC Press LLC 2003. 464 p.

7. Miroshnik I.V. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Nelineynye i optimal'nye sistemy. [Theory of automatic control. Nonlinear and optimal control system] SPb.:Piter, 2006. 271 p.

8. Hans P. Geering. Optimal Control with Engineering Applications, ISBN 978-3-540-69437-3 Springer Berlin Heidelberg New York. 2007. 144 p.

9. Neydorf R. Synthesis of Time Quasi-Optimal Asymptotically Stable Control Laws, SAE Technical Paper 2015-01-2481, 2015, 8 p., doi: 10.4271.2015-01-2481.

10. Krasovskiy N.N. Teoriya upravleniya dvizheniem. [Theory of motion control]. Izdatel'stvo «Nauka», Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1968, 476 p.

11. Krasovskiy N.N. Igrovye zadachi o vstreche dvizheniy. [Game problems of meeting of motions]. Izdatel'stvo «Nauka», Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1970. 420 p.

12. Pontryagin L.S. Printsip maksimuma v optimal'nom upravlenii. [The maximum principle in optimal control]. Izd. 2-e, stereotipnoe. M.: Elitorial URSS, 2004. 64 p.

13. Pshikhopo V., Medvedev M., Neydorf R., Krukhmalev V., Kostjukov V., Gaiduk A., Voloshin V. Impact of the Feeder Aerodynamics Characteristics on the Power of Control Actions in Steady and Transient Regimes, SAE Technical Paper 2012-01-2112, 10 p., doi:10.4271.2012-01-2112.

14. Neydorf R., Sigida Y., Voloshin V. and Chen Y. Stability Analysis of the MAAT Feeder Airship During Ascent and Descent with Wind Disturbances, SAE Technical Paper 2013-01-2111, 2013, 10 p., doi:10.4271/2013-01-2111.

15. Voloshin V., Chen Y., Neydorf R., Boldyreva A. Aerodynamic Characteristics Study and Possible Improvements of MAAT Feeder Airships, SAE Technical Paper 2013-01-2112, 2013, 7 p., doi: 10.4271/2013-01-2112.

16. Pshihopov V.H., Medvedev M.Y., Neydorf R.A., Mechatronics, automation and control, 2013. № 7. pp. 13-20.

17. Pshihopov V.H., Gurenko B.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1918/.

18. Pshihopov V.H., Fedotov A.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2014/2496/.

19. Neydorf R., Novikov S., and Fedorenko R., Continuous-Positional Automatic Ballonet Control System for Airship, SAE Int. J. Aerosp. 6(2):2013, pp. 598- 606, doi: 10.4271/2013-01-2236.

20. Neydorf R., Novikov S., and Kudinov N., Airship Positioning Fuzzy Multi-Ballonet Control Study, SAE Technical Paper 2014—01-2146, 2014, 8 p., doi: 10.4271/2014-01-2146.

21. Pshikhopov V., Krukhmalev V., Medvedev M., and Neydorf R. Estimation of Energy Potential for Control of Feeder of Novel Cruiser/Feeder MAAT System, SAE Technical Paper 2012-01-2099, 2012, 5p, doi: 10.4271/2012-01-2099.

22. Neudorf R. A Vestnik of DSTU: Control and diagnosis in dynamic systems. Rostov-on-don: Publishing center DSTU, 1999. pp. 13-21.

23. Neudorf R. A., Chan N.N., "Informatics and control systems", 2006. №2(12). pp. 119-128.

24. Neydorf R.A., Chan N.N. Izvestiya TRTU, 2006. № 15. Pp. 42-46.

25. Neydorf R.A. Mathematical methods in technics and technologies. MMTT-2000: Wed. papers Intern. scientific. Conf. In 7 t. T. 2. Sections 2, 8. St. Saint Petersburg state. Indus. Institute (tech. University). Saint Petersburg, 2000. Pp. 18-22.

26. Neydorf R.A., Sitnikov A.V. Modelirovanie himiko-tehnologicheskih processov na mikroJeVM: Uchebnoe posobie. [Modeling of chemical processes on microcomputers: training manual]. Novocherkassk: NPI, 1986. 88 p.