

**Н.О. Лужевский, В.Ф. Лубенцов, Е.В. Лубенцова**

**СИНТЕЗ РОБАСТНОЙ САУ С ДИНАМИЧЕСКИМ КОМПЕНСАТОРОМ  
И НАБЛЮДАТЕЛЕМ СОСТОЯНИЯ С КОРРЕКТИРУЮЩИМИ ОБРАТНЫМИ  
СВЯЗЯМИ НА ОСНОВЕ СИГМОИДНЫХ ФУНКЦИЙ**

*Изложена методика анализа робастной САУ для линейных динамических объектов управления с запаздыванием при неопределенности информации о параметрах математической модели и помехах в измеряемых сигналах. В системе реализованы широко распространенный ПИД-регулятор, динамический компенсатор (ДК) инерционной части объекта управления, реализуемый с использованием оценок переменных состояния, получаемых на основе наблюдателя состояния (НС). Отмечено, что для асимптотической устойчивости регулятора и наблюдателя можно воспользоваться любым критерием устойчивости, но для обеспечения максимальной степени устойчивости и требуемых показателей качества переходного процесса удобно воспользоваться критерием максимальной степени устойчивости. В данной работе предлагается вместо производных, получаемых дифференцированием, использовать в ДК инерционности объекта оценки переменных состояния объекта, получаемых с помощью НС. Другим отличием от известных является использование в корректирующих обратных связях НС сигмоидных функций и реализация дополнительного к основному воздействию на основе ошибки оценивания, компенсирующего внешнее возмущение на входе объекта. При параметрическом синтезе НС исследовано влияние возмущений и помех на качество функционирования САУ промышленным интервально-заданным объектом при различных его параметрах. Рассчитан робастный типовой ПИД-регулятор с параметрами, оптимальными по критерию максимальной степени устойчивости, с учетом компенсации инерционной части объекта. Для этого был реализован ДК с помощью параметров номинальной (расчетной) модели объекта с наилучшим сочетанием параметров, полученной на основе интервальной модели объекта управления с запаздыванием. Проведенными исследованиями установлено, что структура САУ с типовым ПИД-регулятором с последовательным ДК инерционности объекта и НС с корректирующими обратными связями на основе сигма-функций обеспечивает простоту методики синтеза САУ, робастной к изменениям параметров объекта и действию неизмеряемых возмущений и неконтролируемых помех.*

*Робастное управление биореактором; типовой ПИД-регулятор; динамический компенсатор; наблюдатель состояния; сигма-функция.*

**N.O. Luzhevsky, V.F. Lubentsov, E.V. Lubentsova**

**SYNTHESIS OF A ROBUST ACS WITH A DYNAMIC COMPENSATOR  
AND A STATE OBSERVER WITH CORRECTIVE FEEDBACK BASED ON SIGMOID  
FUNCTIONS**

*A methodology for analyzing a robust automatic control system for linear dynamic control objects with a delay in the uncertainty of information about the parameters of the mathematical model and interference in the measured signals is described. The system implements a widely used PID controller and a dynamic compensator (DC) for the inertial part of the control object, implemented using estimates of state variables obtained on the basis of a state observer (SO). It is noted that any stability criterion can be used for the asymptotic stability of the controller and observer, but to ensure the maximum degree of stability and the required quality indicators of the transient process, it is convenient to use the maximum degree of stability criterion. In this paper, instead of derivatives obtained by differentiation, it is proposed to use in the dynamic compensator of the inertia of the object estimates of the state variables of the object obtained with the help of a state observer. Another difference from the known ones is the use of sigmoid functions in the corrective feedback of the state observer and the implementation of an additional effect to the main one based on the estimation error, compensating for external disturbance at the input of the object. The parametric synthesis of a state observer was used to study the impact of disturbances and noise on the performance of an automated control system (ACS) for an industrial interval-defined plant with various parameters. A robust typical PID controller with optimal parameters for maximum stability was calculated, taking into account the compensation of the inertial part of the object. For this purpose, a dynamic compensator (DC) was implemented using the parameters of a nominal (calculated) model of the object with the worst combination of parameters obtained on the basis of the interval model of the control object with a delay. The conducted research has established that the structure of the ACS with a typical PID*

*controller with a sequential dynamic compensator for the inertia of the object and a state observer with corrective feedback based on sigma functions ensures the simplicity of the ACS synthesis methodology that is robust to changes in the parameters of the object and the action of unmeasured disturbances and uncontrolled interference.*

*Robust bioreactor control; typical PID controller; dynamic compensator; state observer; sigma function.*

**Введение.** При синтезе САУ системными объектами, к которым можно отнести сложные технические и биотехнологические системы, используются различные методы современной теории управления. К ним следует отнести методы робастного управления, динамической компенсации, гарантирующего управления, интервальных оценок и их комбинации [1]. Ряд этих методов для структурно-параметрического синтеза робастных систем управления, в частности для реализации систем с динамическими компенсаторами (ДК) инерционностей объекта управления (ОУ), требует точного знания всех переменных состояний. Однако на практике измерить все переменные состояния не представляется возможным. Одна из первых работ синтеза систем управления с ДК для обеспечения робастности к инерционности объекта связана с использованием метода обратных операторов [2], либо дифференциальных уравнений, описывающих объект. Применение производных в ДК может приводить к усилению помех в измеряемых сигналах. В этом случае получить информацию о производных в модели компенсатора, не используя многократное дифференцирование измеряемой выходной переменной, в современных системах возможно на основе оценок переменных состояний с помощью наблюдателей состояния (НС). В случае приближенных моделей, получаемых зачастую по экспериментальным данным и в условиях ряда допущений о квазистационарности, линейности или линеаризации и др., требуется обеспечение робастности не только к параметрической неопределенности модели объекта и действующим на систему внешним возмущениям, но и к шумам в канале измерения. С учетом этого выбор значений коэффициентов обратной связи НС должен быть осуществлен с учетом реального влияния помех на качество САУ в условиях, когда отсутствуют возможности точного измерения производных и получения информации о возмущениях и шумах в измеряемом сигнале на выходе объекта, а используются только оценки переменных состояния управляемого объекта.

Как известно [3], при больших изменениях параметров объекта методы теории чувствительности для синтеза робастной системы управления непригодны. В этом случае одним из подходов является синтез робастной системы с постоянными параметрами регуляторов и компенсирующих устройств, полученных с помощью номинальных (расчетных) моделей объекта с различными параметрами, например, с наихудшим их сочетанием на основе интервальной модели объекта [4]. Этот подход является более общим по сравнению с методами, основанными на оценке чувствительности. В связи с тем, что при этом подразумеваются большие изменения параметров и возмущений, включая помехи в измеряемых сигналах, то регулятор (система) должен быть робастным (нечувствительным) не только к большим изменениям параметров объекта, но и к действию неконтролируемых помех (шумов) в измеряемых сигналах. Поэтому рассматриваемая в данной работе задача обеспечения робастности САУ с ДК и НС к изменениям параметров объекта и к действию неконтролируемых помех в сигналах измерения, синтезированной с помощью интервальной модели объекта, является актуальной.

**Постановка задачи.** В работе [5] отмечено, что «для обеспечения высокого качества оценивания требуется организовать скользящий режим, близкий к идеальному, при котором изображающая точка системы, записанной относительно ошибок наблюдения, движется по многообразию скольжения, совершая колебания с бесконечно большой частотой и бесконечно малой амплитудой. При большой, но конечной частоте переключения возникает реальный скользящий режим ...», в котором систему можно считать эквивалентной адаптивной, т.е. приобретающей адаптивные свойства, близкие к свойствам систем с сигнальной адаптацией. Однако учитывая тот факт, что регулируемые техноло-

гические объекты являются инерционными, а каналы регулирования содержат большое запаздывание и исполнительные устройства с ограниченной скоростью перемещения регулирующего органа, скользящий режим при ограниченной частоте переключений может быть трудноосуществим либо нереализуем. Несмотря на это, следует отметить, что поскольку оценка переменных состояний в наблюдателе осуществляется путем интегрирования уравнений наблюдателя, то искомые переменные отфильтровываются от высокочастотных помех, входящих в измеряемый выходной сигнал  $y = x + \zeta$  ( $x$  – переменная состояния,  $\zeta$  – помеха) [6]. Следует также ожидать, что использование сигмоидных функций в корректирующих обратных связях наблюдателя способствует повышению темпа оценивания и уменьшению ошибок, связанных с неточностью математической модели объекта. Обычно быстродействие НС делают на 20-50 % больше, чем быстродействие контура управления с регулятором объекта [6].

В связи с этим становится актуальной альтернатива решения задачи синтеза САУ, робастной к изменениям параметров объекта и действию неконтролируемых помех, в структуре которой используется сочетание типового ПИД-регулятора, последовательного ДК инерционности объекта, реализуемого на основе переменных состояний НС с корректирующими обратными связями на основе сигмоидных функций с насыщением вне скользящего режима.

**Материалы и методы исследования.** Одним из эффективных средств повышения точности работы САУ в установившемся режиме является компенсация инерционности ОУ и действующих на него внешних возмущений. Условия реализации таких видов компенсаций во многом аналогичны. Для полной компенсации инерционности ОУ и возмущения в САУ необходимо вводить сигналы, пропорциональные первой и высшим производным от выходной координаты. Полная компенсация возмущающего воздействия считается достигнута, когда после завершения переходного процесса регулируемая (или управляемая) величина и ошибка системы не зависят от этого возмущения. Полная компенсация инерционности ОУ считается достигнута, когда все полученные реализуемые производные не приводят к дополнительным движениям составляющих переходного процесса в САУ и не снижают требуемую точность. В реальных системах можно точно получить лишь первую производную, все последующие производные могут быть получены лишь приближенно. Это приводит к достижению не полной (абсолютной), а частичной компенсации.

Однако и частичная инвариантность может быть весьма полезной в смысле повышения точности САУ, если имеется возможность измерения возмущений. Но во многих случаях непосредственное измерение возмущений или затруднительно, или практически невозможно из-за отсутствия датчиков.

Недостаточность измерительной информации обуславливает состояние неопределенности, что является характерной особенностью многих процессов и производств микробиологической, химико-фармацевтической, пищевой и других отраслей промышленности. Ключевым аспектом разрешения этой ситуации является использование переменных состояний. Это направление интенсивно развивается, о чем свидетельствует нарастающий поток публикаций. Создаются и совершенствуются различные теории, методы и подходы. В существующих разработках следует отметить применение метода интервальных оценок, метода синтеза робастных регуляторов, а также методов, основанных на использовании НС и др. Обзор некоторых из них приведен в работе [1]. Каждый из методов характеризуется своими возможностями, достоинствами и недостатками, областями применения. Причем каждый метод длительное время использовался как самостоятельный, вне комбинации с другими. В этом аспекте следует отметить, несмотря на появление новых алгоритмов управления, широкое использование при управлении технологическими и техническими объектами типовых законов регулирования (П, ПИ, ПИД, ПД). В [7] отмечено, что около 95 % используемых на практике регуляторов составляют регуляторы с ПИД-законом управления. Существует большое количество методов настройки типовых регуляторов [2–4], использующих эти законы регулирования, которые позволяют полу-

читать заданные качественные показатели системы. В статье [8] отмечено, что непрерывающийся поток публикаций по настройке типовых регуляторов свидетельствует об актуальности этой проблемы. Объясняется это тем, что при использовании систем с применением типовых законов регулирования достигается хорошее качество регулирования и имеется возможность совершенствования систем с применением ПИД-регуляторов различных модификаций при возрастании требований со стороны промышленных объектов [9–12]. Однако использование отдельных методов и традиционных законов регулирования оказывается недостаточно эффективным, особенно при синтезе САУ сложными объектами и возрастающих требованиях к качеству их функционирования в условиях параметрической неопределенности и внешних возмущениях. Перспективным является использование ПИД-закона в комбинации с указанными методами, что является предметом рассмотрения в данной работе. Как известно из теории автоматического управления, ключевым моментом при использовании типовых законов регулирования является наличие номинальной (расчетной) модели объекта [13]. Возможным подходом к решению задачи выбора номинальной (расчетной) модели в САУ с типовыми регуляторами может быть использование в расчетной (номинальной) модели объекта граничных значений параметров, соответствующих их наиболее неблагоприятному сочетанию [14], с последующим синтезом настроек регулятора по критерию максимальной степени устойчивости, обеспечивающим распределение полюсов, наиболее близко расположенных к мнимой оси [9, 15]. Выбор подходящего распределения полюсов замкнутой САУ является важным этапом при обеспечении заданных показателей качества переходного процесса: длительности переходного процесса, перерегулирования и др.

Во многих случаях необходимое повышение робастных свойств САУ может быть достигнуто определенным изменением распределения полюсов на основе использования в расчетной модели неблагоприятного сочетания параметров интервальной модели. Оценку возможности и целесообразности такой методики наиболее удобно проводить на основе анализа переходных процессов САУ, полученных при параметрах регулятора для максимальной степени устойчивости, которые дают наиболее полную картину влияния неблагоприятного сочетания параметров интервальной модели на устойчивость системы.

Идея построения управления с использованием граничных значений параметров номинальной (расчетной) модели объекта состоит в следующем. При синтезе параметров регулятора актуальной является проблема неопределенности в модели (неизвестные параметры и/или внешние возмущения). В этом случае использование точных значений параметров модели затруднительно по следующим причинам:

- ◆ синтез традиционными методами является слишком громоздким, поскольку выполнить полный перебор вариантов модели при точных значениях параметров из интервала их изменения затруднено из-за отсутствия универсальности этих методов для случая неопределенности;
- ◆ система может оказаться недостаточно робастной, поскольку точечные модели (точечные модели предоставляют информацию только о параметрах объекта в отдельные моменты времени, описывая его набором моделей), особенно для нестационарных объектов, оказываются приближенными;
- ◆ синтезировать один регулятор, робастный во всем интервале параметров объекта, используя перебор  $n$  точечных моделей и не прибегая к адаптивным методам, невозможно из-за отсутствия рекомендаций по выбору оптимального варианта.

В данной работе основное внимание уделяется разработке методики, позволяющей при соблюдении прочих условий учитывать требования робастности, т. е. нечувствительности системы к изменению параметров, при которых выполняются заданные показатели качества переходных процессов во всех интервалах исследования. В качестве номинальной (расчетной) модели объекта используется передаточная функция в виде линейного инерционного звена второго порядка с запаздыванием. При этом предполагается, что параметры передаточной функции и запаздывание могут варьироваться в априори

известных интервалах, а их граничные значения известны. В основе методики лежит использование расчетной модели объекта с граничными значениями параметров, соответствующими наиболее неблагоприятному их сочетанию. Этот метод ориентирован на нахождение корней, наиболее близко расположенных к границе устойчивости, обеспечивая простоту процедуры синтеза и применимость для широкого класса объектов.

Другим ключевым моментом в задаче повышения качества управления является применение ПИД-регулятора с последовательным динамическим компенсатором инерционности объекта. В работе [16] отмечается, что синтез компенсирующего устройства с передаточной функцией, обратной передаточной функции объекту управления, представляет неразрешимую с абсолютной точностью задачу, поскольку в такой структуре должны быть выполнены операции точного дифференцирования [16]. Поэтому в современной теории управления существует ряд методов приближенного решения подобного рода некорректных задач. Большинство из них строится по методу малого параметра, позволяющего получить с некоторой ошибкой физически реализуемую структуру компенсирующего устройства  $W_k(p)$ , обратную по отношению к передаточной функции объекта  $W_{об}(p)$ . Основным недостатком такого подхода состоит в низкой точности реализации обратной передаточной функции при заданном запасе устойчивости.

В [17] предлагается замена идеальных дифференцирующих звеньев реальными. Например, применение не идеального, а физически реализуемого дифференцирующего звена с малой постоянной времени (например, равной 0,1) незначительно изменяет процессы регулирования. Следовательно, при реализации ДК на основе обратной модели только инерционной части передаточной функции объекта (т.е. без учета запаздывания) имеется возможность компенсации, реализуемой практически. Вместе с тем в [19, 20] отмечается, что многие методы синтеза регуляторов в неявной форме реализуют принцип динамической компенсации. В качестве одного из методов приведем решение задачи управления детерминированным объектом с запаздыванием на основе метода динамической компенсации при наличии неконтролируемого возмущения [21]. Многие промышленные объекты управления могут быть описаны моделью вида

$$W_o(p) = k \cdot \exp(-\tau p) / (Tp + 1), \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент передачи;  $T$  – постоянная времени;  $\tau$  – запаздывание.

Для достижения максимального быстродействия необходимо подать на объект максимально возможное управляющее воздействие с целью получения максимальной скорости переходного процесса, выдержать время  $T_u$ , а затем уменьшить его до величины возмущения  $F$ , но с обратным знаком. Для решения задачи требуется определить длительность  $T_u$  управляющего воздействия и величину возмущения  $F$ .

Переходный процесс на выходе объекта (1) при действии возмущения  $F$  ступенчатого вида описывается уравнением

$$x_{\text{вых}}(t) = k \cdot F \cdot [1 - \exp(-t/T)]. \quad (2)$$

Переходный процесс при подаче управляющего воздействия максимальной величины  $U_{\text{max}}$  на интервале времени  $T_u = t - \tau$  описывается уравнением

$$x_{\text{вых}}^*(t) = k \cdot U_{\text{max}} \cdot [1 - \exp(-T_u/T)]. \quad (3)$$

Переключение управляющего воздействия с величины  $U_{\text{max}}$  на величину  $U = -F$  необходимо производить в момент равенства модулей ординат кривых  $x_{\text{вых}}(t)$  и  $x_{\text{вых}}^*(t)$ . Выбрав  $U_{\text{max}} = kF$ , получим

$$U_{\text{max}} \cdot [1 - \exp(-(T_u + \tau)/T)] = k \cdot U_{\text{max}} \cdot [1 - \exp(-T_u/T)]. \quad (4)$$

Отсюда находим

$$T_u = T \cdot \ln[(k - \exp(-\tau/T))/(k - 1)]. \quad (5)$$

Для определения величины возмущения  $F$  на входе объекта по изменению выходной величины объекта  $x_{\text{вых}}(t)$  используется обратная модель передаточной функции объекта (1) без запаздывания, т.е. используется оценка  $F$  на основе оператора  $\hat{F}(p) = W_M^{-1}(p) \cdot X_{\text{вых}}(p)$  с последующей компенсацией возмущения  $F$ .

Таким образом, если на объект управления действует неконтролируемое возмущение  $F$ , аддитивно влияющее на выходную величину, то информацию о приведённом ко входу возмущении при известной динамике канала возмущения можно получить, используя метод динамической компенсации на основе обратной модели передаточной функции объекта управления. На основе этой информации управляющее воздействие после определения величины возмущающего воздействия  $\hat{F}$  реализуется с помощью компенсации  $F$  в виде

$$U(t) = U_X(t)|_{t \leq T_0} + U_F(t)|_{t > T_0} = U_{\text{max}} - \hat{F}, \quad (6)$$

где  $U_{\text{max}}$  – управляющее воздействие, определяющее переходный процесс системы при  $\hat{F} = 0$ ;  $U_F$  – управляющее воздействие, компенсирующее влияние  $\hat{F}$  на систему.

В системах, включающих ДК инерционности объекта и дополнительные составляющие, компенсирующие действие возмущений, робастность переменных состояния по отношению к неопределенностям может быть обеспечена с помощью нелинейных корректирующих обратных связей в НС и организации дополнительного канала компенсации возмущения на основе их оценок. Практически значимый метод оценивания переменных состояния и возмущения, не требующий получения их производных и динамической модели, состоит в применении НС с корректирующими обратными связями на основе сигмоидных функций [5, 22].

В данной работе предлагается вместо производных, получаемых дифференцированием, использовать в ДК инерционности объекта оценки переменных состояния объекта, получаемых с помощью НС. Другим отличием от известных является использование в корректирующих обратных связях НС сигмоидных функций и реализация дополнительного к основному воздействию на основе ошибки оценивания, компенсирующего внешнее возмущение на входе объекта.

В общем случае сигмоидная функция определяется выражением:

$$\sigma(\varepsilon, \lambda) = \frac{1}{1 + \exp(-\lambda(\varepsilon - a))} - \frac{1}{1 + \exp(\lambda(\varepsilon + a))}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  – сигнал обратной связи в НС;  $\lambda > 0$  – коэффициент, характеризующий крутизну логистической функции, усиливающей слабые сигналы  $\varepsilon$  (параметр наклона сигмоидальной функции);  $l = \text{const}$  – максимальное значение пороговой функции;  $a$  – значение смещения (в отдельных случаях может отсутствовать).

Если значение коэффициента  $\lambda$  велико, то график сигмоидной функции в общем виде приближается к пороговой функции (рис. 1).

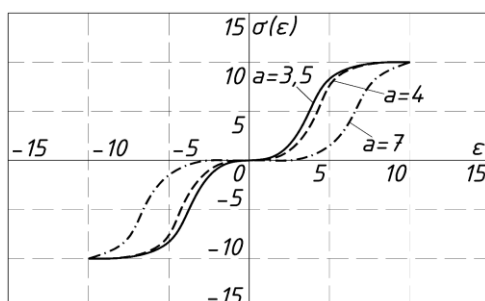


Рис. 1. График сигмоидной функции при  $l = 10$  со смещением  $a = 3,5; 4; 7$

Проведем численное моделирование САУ с НС, коэффициенты обратной связи в котором являются непрерывными функциями сигмоидного типа без смещения и изменяются в соответствии с выражениями:

$$\sigma_1(e) = \frac{l_1}{1 + \exp(-\lambda e)} - \frac{l_1}{1 + \exp(\lambda e)}; \tag{8}$$

$$\sigma_2(e) = \frac{l_2}{1 + \exp(-\lambda e)} - \frac{l_2}{1 + \exp(\lambda e)}; \tag{9}$$

$$\sigma_3(e) = \frac{l_3}{1 + \exp(-\lambda e)} - \frac{l_3}{1 + \exp(\lambda e)}, \tag{10}$$

где  $e$  – ошибка оценивания;  $\lambda$  – коэффициент, характеризующий крутизну логистической функции;  $\sigma_1(e)$ ,  $\sigma_2(e)$ ,  $\sigma_3(e)$  – коэффициенты обратной связи НС сигмоидного типа;  $l_1, l_2, l_3$  – постоянные коэффициенты.

Структурная схема системы управления с ПИД-регулятором, ДК на основе обратной модели инерционности объекта управления  $W_m^{-1}(p)$  и НС на основе номинальной модели объекта управления  $W_m(p) \cdot e^{-p\tau}$  представлена на рис. 2.

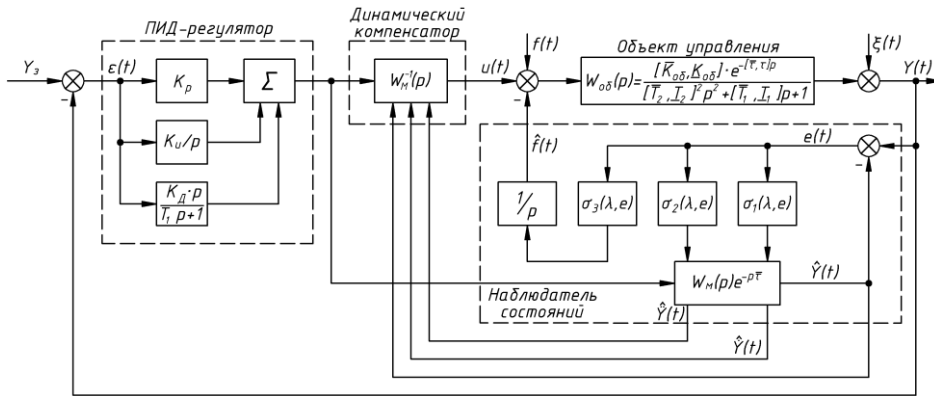


Рис. 2. Структурная схема системы управления с ПИД-регулятором, ДК на основе обратной модели инерционности объекта управления и НС:  $W_m(p) \cdot e^{-p\tau}$  – номинальная модель объекта управления;  $W_m^{-1}(p)$  – передаточная функция ДК;  $p$  – оператор дифференцирования;  $Y_3(t)$  – заданное значение регулируемой переменной  $Y(t)$ ;  $\hat{Y}(t)$  – оценка регулируемой переменной  $Y(t)$ ;  $\hat{\dot{Y}}(t)$  – оценка первой производной  $Y(t)$ ;  $\hat{\ddot{Y}}(t)$  – оценка второй производной  $Y(t)$ ;  $e(t)$  – ошибка оценивания;  $u(t)$  – управляющее воздействие;  $f(t)$ ,  $\hat{f}(t)$  – возмущение и его оценка;  $\xi(t)$  – помеха

НС с обратными связями на основе выражений (8), (9), (10) реализует алгоритм непрерывного во времени оценивания производных. Для решения задачи оценивания с помощью НС с учетом рекомендаций [5, 22] приняты следующие параметры корректирующих сигмоидальных воздействий в обратных связях НС:  $l_1 = 0,1778$ ;  $l_2 = 0,00034$ ;  $l_3 = 0,0638$ ;  $\lambda = 1,0$ . Согласно методу синтеза наблюдателей состояний [5] в наблюдателе не используется динамическая модель возмущения. Данный наблюдатель является робастным, так как величины корректирующих воздействий в обратных связях наблюдателя реализуются на основе интервальной модели объекта управления и не требуют точной математической модели объекта. Это позволяет не увеличивать порядок наблюдателя для получения оценки возмущающего воздействия, не требует реализации большой частоты переключений и дает возможность исключить большие динамические отклонения зашумленной регулируемой переменной при одновременном действии задающего и возмущающего сигналов в замкнутой системе с наблюдателем. Этому способствует реализация кор-

ректирующих воздействий в обратной связи наблюдателя, которые являются переменными в ходе работы наблюдателя и реализуются на основе S-образных непрерывных функций с насыщением. Значения коэффициента  $\lambda$  сигмоидных функций определены из обеспечения условий приближения характеристики сигмоидной функции к квазирелейной для усиления слабых сигналов либо к линейной в зависимости от ошибки оценивания  $e(t)$ .

В качестве иллюстрации разработанной методики рассмотрим задачу управления биообъектом по каналу регулирования растворенного в биореакторе кислорода ( $pO_2$ ), описываемого интервальной моделью 2-го порядка с запаздыванием в следующем виде

$$W(p) = \frac{[\overline{K}_{об}, \underline{K}_{об}] e^{-[\overline{\tau}, \underline{\tau}]p}}{[\overline{T}_2, \underline{T}_2]^2 p^2 + [\overline{T}_1, \underline{T}_1] p + 1},$$

где  $\underline{K}_{об}, \overline{K}_{об}, \underline{T}_1, \overline{T}_1, \underline{T}_2, \overline{T}_2, \underline{\tau}, \overline{\tau}$  – нижняя и верхняя граница коэффициента передачи объекта  $K_{об}$ , постоянных времени  $T_1, T_2$  и запаздывания объекта  $\tau$  соответственно.

Отметим, что впервые интервальные наблюдатели для неопределенных биотехнологических систем, предназначенные для мониторинга биореактора, были предложены в работе [23]. Непрерывные наблюдатели для неопределенных биотехнологических моделей впервые были рассмотрены в работе [24]. Разработка методов оценки состояния для неопределенных линейных систем изложена в работе [25]. В работе [26] рассмотрен метод построения интервального наблюдателя, позволяющего получить область оценок переменных состояния процесса биосинтеза – концентрации клеток и концентрации субстрата – и их интервальные оценки, ограниченные верхней и нижней границами. Такой характер изменения важных параметров состояния процесса подтверждает наличие различного рода неопределенностей в динамике биосистемы и говорит о необходимости решения задачи управления процессом насыщения среды кислородом с помощью робастного автоматического регулирования  $pO_2$ .

В данной работе решена задача синтеза САУ процессом насыщения среды культивирования кислородом. Исследование проведено для четырех вариантов модели объекта  $W_{M1}(p), W_{M2}(p), W_{M3}(p), W_{M4}(p)$ , представленных в табл. 1, при следующих граничных значениях параметров интервальной модели объекта управления:  $K_{обmax} = 0,375, \tau_{max} = 7,5$  мин,  $T_{1max} = 24,96$  мин,  $T_{1min} = 17,62$  мин,  $T_{2max} = 14,8$  мин,  $T_{2min} = 13,02$  мин.

Таблица 1

**Значения настроек ПИД-регулятора максимальной степени устойчивости  $J$ , соответствующих неблагоприятным значениям параметров модели объекта  $W_{M1}(p), W_{M2}(p), W_{M3}(p), W_{M4}(p)$  по каналу регулирования  $pO_2$**

Номер модели	Номер САУ	$K_{обmax}$	$\tau_{max}$	$T_1$	$T_2$	$J$	$K_{п1}$	$K_{п2}$	$K_{д}$
$W_{M1}(p)$	1	0,375	7,5	24,96	14,8	0,094	3,339	0,125	29,665
$W_{M2}(p)$	2	0,375	7,5	17,62	14,8	0,086	1,934	0,089	28,463
$W_{M3}(p)$	3	0,375	7,5	24,96	13,02	0,102	3,413	0,136	23,011
$W_{M4}(p)$	4	0,375	7,5	17,62	13,02	0,094	1,884	0,094	21,151

Характеристическое уравнение НС должно быть асимптотически устойчивым [6]. Поэтому для асимптотической устойчивости можно воспользоваться любым критерием устойчивости. Для того, чтобы обеспечить заданный переходный процесс, целесообразно воспользоваться критерием максимальной степени устойчивости [9], с помощью которого рассчитываются коэффициенты закона управления. При этом под степенью устойчивости понимается расстояние от мнимой оси до ближайшего корня или до ближайшей пары комплексно-сопряженных корней.

При вариантах модели объекта с постоянными времени из табл. 1 рассчитаны по критерию максимальной степени устойчивости  $J = -\min \max Re p_k(r_i)$  ( $p_k$  – корни характеристического уравнения) параметры настройки ПИД-регулятора  $r_i$  ( $i = 1,2,3$ ) [9]. Для максимальной степени устойчивости  $J = 0,086$  определены  $K_{п1} = 1,934; K_{п2} = 0,089;$

$K_d = 28,463$  (вторая строка в табл. 1). Переходные процессы в САУ (рис. 3, 4) получены при действии помехи в измеряемом сигнале на выходе объекта в диапазоне дисперсии помехи  $D_{вх}(\xi) = [0,01, 10]$  и при ступенчатом изменении возмущения  $f(t)$  на входе объекта в установившемся состоянии

$$f(t) = \begin{cases} 0,5 & \text{при } 0 \leq t \leq 200, \\ 1,5 & \text{при } 200 < t \leq 400, \\ 3,0 & \text{при } 400 < t \leq 700, \\ 1,0 & \text{при } 700 < t \leq 1100. \end{cases}$$

Результаты оценки флуктуации регулируемой переменной  $Y(t)$  и ее оценки  $\hat{Y}(t)$  при минимальной и максимальной значениях дисперсии помехи  $D_{вх}(\xi)$  приведены в табл. 2 и 3, а переходные процессы представлены на рис. 3 и 4.

Таблица 2

**Значения дисперсии и среднеквадратического отклонения (СКО) регулируемой переменной  $Y(t)$  и ее оценки  $\hat{Y}(t)$  от дисперсии помехи  $D_{вх}(\xi) = 0,01$**

Номер модели	Дисперсия помехи $D_{вх}(\xi)$	Дисперсия регулируемой переменной $Y(t)$	СКО регулируемой переменной $Y(t)$	Дисперсия оценки $\hat{Y}(t)$ регулируемой переменной	СКО оценки $\hat{Y}(t)$ регулируемой переменной
$W_{M1}(p)$	0,01	2,297	1,516	2,191	1,480
$W_{M2}(p)$	0,01	2,085	1,444	2,119	1,456
$W_{M3}(p)$	0,01	2,227	1,492	2,188	1,479
$W_{M4}(p)$	0,01	2,001	1,415	2,119	1,456

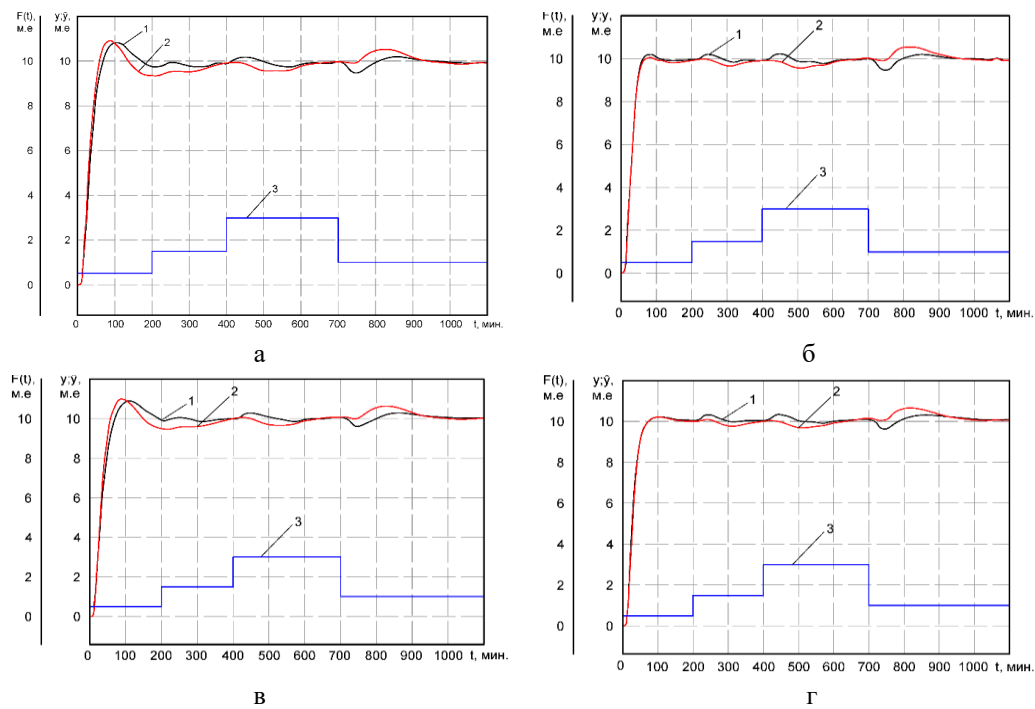


Рис. 3. Переходные процессы в САУ с ПИД-регулятором и моделью объекта  $W_{M1}(p)$ ,  $W_{M2}(p)$ ,  $W_{M3}(p)$ ,  $W_{M4}(p)$  (а, б, в, г соответственно) по каналу регулирования  $\rho O_2 D_{вх}(\xi) = 0,01$

Таблица 3

**Значения дисперсии и средноквадратического отклонения (СКО) регулируемой переменной  $Y(t)$  и ее оценки  $\hat{Y}(t)$  от дисперсии помехи  $D_{вх}(\xi) = 10$**

Номер модели	Дисперсия помехи $D_{вх}(\xi)$	Дисперсия регулируемой переменной $Y(t)$	СКО регулируемой переменной $Y(t)$	Дисперсия оценки $\hat{Y}(t)$ регулируемой переменной	СКО оценки $\hat{Y}(t)$ регулируемой переменной
$W_{M1}(p)$	10	2,288	1,513	2,217	1,489
$W_{M2}(p)$	10	2,087	1,445	2,148	1,466
$W_{M3}(p)$	10	2,219	1,49	2,226	1,492
$W_{M4}(p)$	10	2,004	1,416	2,164	1,471

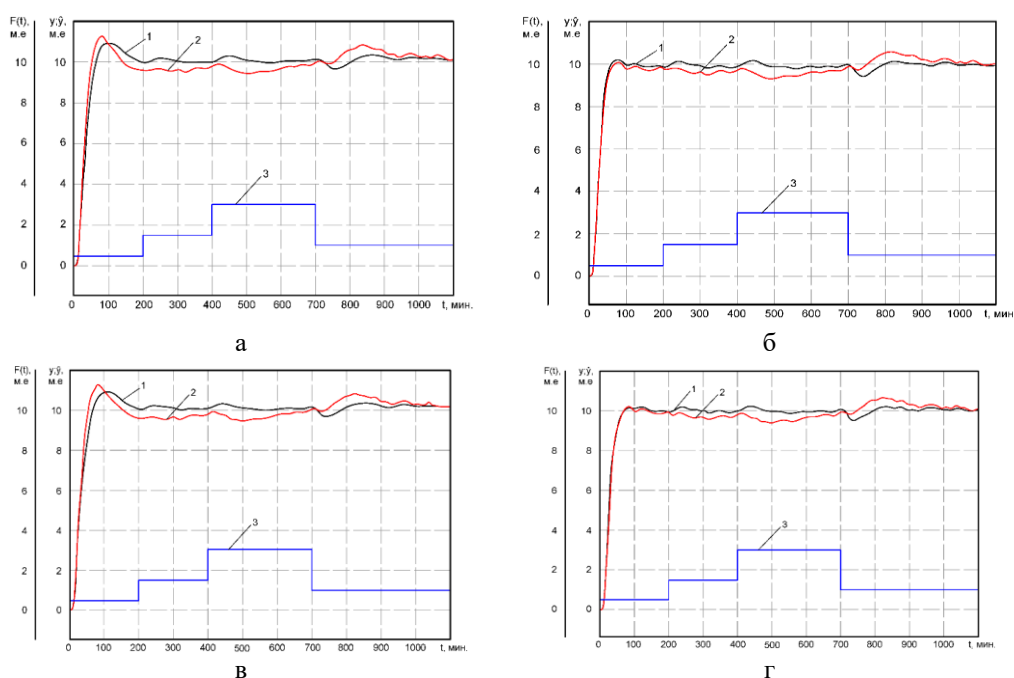


Рис. 4. Переходные процессы в САУ с ПИД-регулятором и моделью объекта  $W_{M1}(p)$ ,  $W_{M2}(p)$ ,  $W_{M3}(p)$ ,  $W_{M4}(p)$  (а, б, в, г соответственно) по каналу регулирования  $pO_2$   $D_{вх}(\xi) = 10$

В качестве показателя помехоустойчивости использована величина средноквадратического отклонения (СКО) координат состояния на выходе объекта управления и на выходе НС, наиболее подверженных влиянию помех в установившемся режиме. В каждом интервале был вычислен коэффициент ослабления  $K_{осл} = D_{вх}(\xi)/D_{вых}(\xi)$  [27]. С помощью  $K_{осл}$  можно дать оценку поведению объекта относительно входа/выхода при различных моделях объекта и различном уровне помех в измеряемом сигнале. С увеличением дисперсии помехи на входе  $D_{вх}(\xi)$  коэффициент ослабления  $K_{осл}$  для всех моделей объекта  $M_1, M_2, M_3, M_4$  с передаточными функциями  $W_{M1}(p)$ ,  $W_{M2}(p)$ ,  $W_{M3}(p)$ ,  $W_{M4}(p)$ , изменяется равномерно, обеспечивая примерно одинаковое значение относительного коэффициента ослабления  $K_{осл}^*_{отн} = K_{осл\ max} / K_{осл\ min}$ , равного 5,17; 5,35; 5,29; 5,73 для каждой модели соответственно (табл. 4). Такое изменение объясняется тем, что высокочастотные компоненты зашумленного сигнала проявляются в установившемся состоянии в большей степени, результатом чего является снижение подавления помехи, что приводит к увеличению  $D_{вых}(\xi)$  и снижению  $K_{осл}$  до единицы при  $D_{вх}(\xi) = 0,1$  для каждой модели (рис. 5).

Таблица 4

Значения относительного коэффициента  $K_{\text{осл отн}}^* = K_{\text{осл max}} / K_{\text{осл min}}$  для моделей  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  объекта управления при различных значениях дисперсии  $D_{\text{вх}}(\xi)$

$D_{\text{вх}}(\xi)$	Модель объекта управления $M_i (i = 1 \dots 4)$ с передаточной функцией $W_{M_i}(p) (i = 1 \dots 4)$			
	$M_1(W_{M1}(p))$	$M_2(W_{M2}(p))$	$M_3(W_{M3}(p))$	$M_4(W_{M4}(p))$
	$K_{\text{осл}}$			
0,10	<b>1,044</b>	<b>1,049</b>	<b>1,045</b>	<b>1,051</b>
0,75	1,330	1,362	1,114	1,378
1,50	1,659	1,724	1,341	1,755
2,50	2,098	2,211	1,679	2,237
5,00	3,197	3,440	3,267	3,511
10,0	<b>5,398</b>	<b>5,614</b>	<b>5,534</b>	<b>6,018</b>

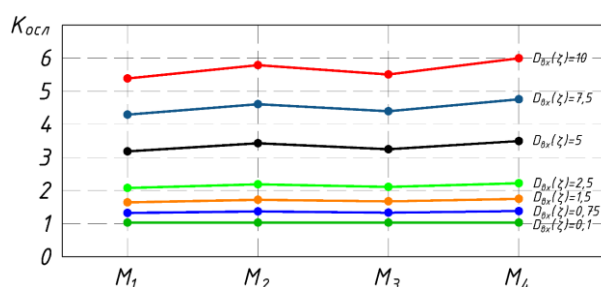


Рис. 5. Зависимость относительного коэффициента ослабления  $K_{\text{осл}}$  для моделей  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  объекта управления при различных значениях дисперсии  $D_{\text{вх}}(\xi)$

Из рис. 5 следует, что при изменении дисперсии на входе зависимость  $K_{\text{осл}}$  идентична для исследуемых моделей интервального объекта, причем значение  $K_{\text{осл}}$  находится в диапазоне от 1,044 до 5,398; от 1,049 до 5,614; от 1,045 до 5,534; от 1,051 до 6,018 для моделей  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  соответственно, а изменение относительного коэффициента ослабления  $K_{\text{осл отн}}^*$  незначительно и уменьшается в  $5,73/5,17 = 1,1$  раза. Величина  $K_{\text{осл отн}}^*$  остается одинаковой как по оси ординат для каждой модели  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  объекта управления, так и по оси абсцисс для каждого значения  $D_{\text{вх}}(\xi)$ , поскольку  $K_{\text{осл отн}}^*$  зависит от отношения абсолютных величин дисперсий, а не от их отклонений.

Анализ изменения  $K_{\text{осл}}$  с увеличением дисперсии на входе  $D_{\text{вх}}(\xi)$  позволяет отметить, что качество управления при ПИД-регуляторе с ДК, синтезированном при ступенчатом детерминированном воздействии, может снижаться. Причиной этого может быть то, что случайные помехи (шумы измерений) на входе, характеризующиеся увеличением  $D_{\text{вх}}(\xi)$ , усиливаются производными ДК, а, следовательно, ослабление  $D_{\text{вых}}(\xi)$  снижается. Эта особенность может проявляться при постоянной структуре САУ с регулятором и ДК для всех моделей объекта. Для уменьшения этого влияния на качество управления в ходе исследований установлено, что эффективным является подстройка параметров НС с помощью сигмоидных функций в обратных связях наблюдателя.

В ходе исследований установлено более значимое влияние коэффициента сигмоидной функции  $\lambda$  и коэффициента обратной связи  $l_1$  на регулируемую переменную  $Y(t)$  и оценку регулируемой переменной  $\hat{Y}(t)$ , что в условиях невозможности реализации скользящего режима является практически полезным. Для наглядности на рис. 6, 7 представлены графики регулируемой переменной  $Y(t)$  и оценки регулируемой переменной  $\hat{Y}(t)$  при дисперсии помехи  $D(\xi) = 0,1$ .

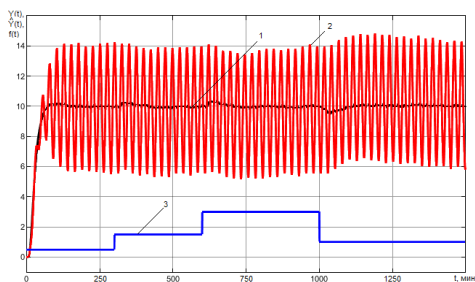


Рис. 6. График регулируемой переменной  $Y(t)$  (кривая 1), оценки регулируемой переменной  $\hat{Y}(t)$  (кривая 2), ступенчатого возмущения (кривая 3) при  $l_1 = 1,0$ ,  $l_2 = 0,0034$ ,  $l_3 = 0,0638$ ,  $\lambda = 1$

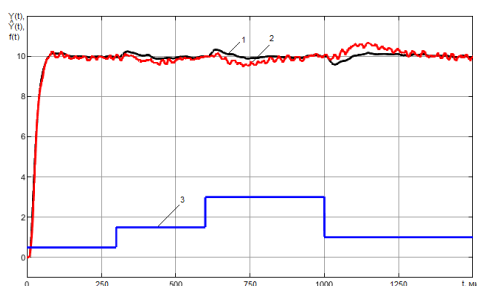


Рис. 7. График регулируемой переменной  $Y(t)$  (кривая 1), оценки регулируемой переменной  $\hat{Y}(t)$  (кривая 2), ступенчатого возмущения (кривая 3) при  $l_1 = 0,5$ ,  $l_2 = 0,0034$ ,  $l_3 = 0,0638$ ,  $\lambda = 0,5$

Из графиков на рис. 6, 7 видно, что при значении  $l_1 = 1$  можно получить большую частоту переключений и амплитуду переменной на выходе НС, что дает возможность исключить большие динамические отклонения зашумленной регулируемой переменной  $Y(t)$  на втором, третьем и четвертом участках (рис. 6). При уменьшении коэффициента  $l_1$  в 2 раза ( $l_1 = 0,5$ ) большие частота и колебания оценки  $\hat{Y}(t)$  регулируемой переменной  $Y(t)$  исключаются, но сохраняются приемлемые отклонения регулируемой переменной  $Y(t)$  от заданного значения на втором, третьем и четвертом участках (рис. 7), что позволяет говорить о робастности системы к помехам в условиях ограниченного по амплитуде и частоте сигнала управления.

Для наглядности на рис. 8–11 показаны графики отклонений регулируемой переменной  $Y(t)$  (парциального давления растворенного в биореакторе кислорода) и оценки регулируемой переменной  $\hat{Y}(t)$  от заданного значения при изменении дисперсии помехи, а также графики изменения СКО регулируемой переменной  $Y(t)$  и ее оценки  $\hat{Y}(t)$  при изменении дисперсии.

Коэффициент ослабления в системе с моделью  $W(p) = 0,375 / (219,04p^2 + 17,62p + 1) \cdot e^{-7,5p}$  при коэффициентах  $l_1 = 0,1778$ ,  $l_2 = 0,0034$ ,  $l_3 = 0,0638$  составил  $K_{осл} = 0,2436 / 0,1435 = 1,697$  (при  $D_{вх}(\xi) = 0,25$ );  $K_{осл} = 0,43 / 0,18 = 2,388$  (при  $D_{вх}(\xi) = 0,5$ );  $K_{осл} = 12,51 / 2,518 = 4,968$  (при  $D_{вх}(\xi) = 10$ ).

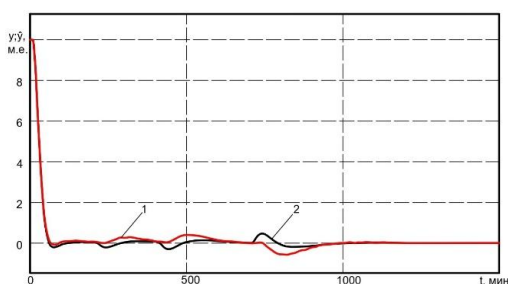


Рис. 8. Графики отклонений регулируемой переменной  $Y(t)$  (кривая 1) и оценки регулируемой переменной  $\hat{Y}(t)$  (кривая 2) от заданного значения при дисперсии  $D_{вх}(\xi) = 0,1$

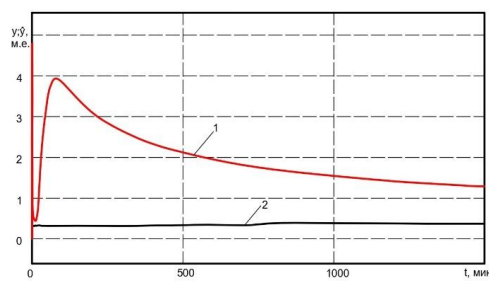


Рис. 9. Графики изменения СКО регулируемой переменной  $Y(t)$  (кривая 1) и оценки регулируемой переменной  $\hat{Y}(t)$  (кривая 2) при дисперсии  $D_{вх}(\xi) = 0,1$

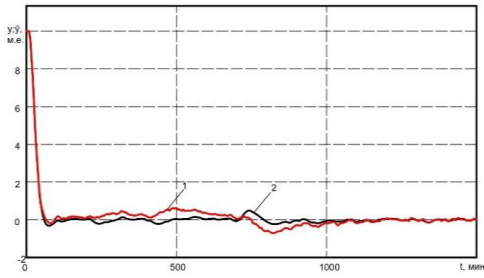


Рис. 10. Графики отклонений регулируемой переменной  $Y(t)$  (кривая 1) и оценки регулируемой переменной  $\hat{Y}(t)$  (кривая 2) от заданного значения при дисперсии  $D_{ex}(\xi) = 10$

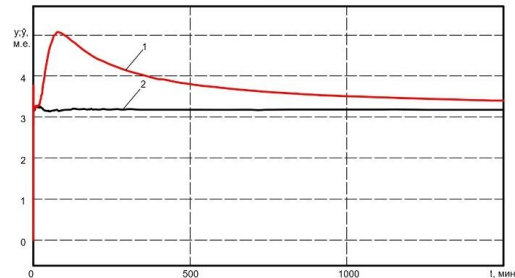


Рис. 11. Графики изменения СКО регулируемой переменной  $Y(t)$  (кривая 1) и оценки регулируемой переменной  $\hat{Y}(t)$  (кривая 2) при дисперсии  $D_{ex}(\xi) = 10$

**Результаты исследования систем.** Оценку достижения параметрической робастности в рамках исследуемой структуры системы дает анализ переходных процессов, приведенных на рис. 3 и 4. Эти переходные процессы показывают зону робастности, в которой располагаются переходные процессы при промежуточных значениях  $D_{вх}(\xi) = 0,1; 1,5$  и др. Анализ переходных процессов показывает, что для всех вариантов модели объекта с различным сочетанием параметров в установившемся режиме при постоянном задающем воздействии и при различных значениях возмущения  $f(t)$  и дисперсии помехи  $D_{вх}(\xi)$  обеспечивается робастность САУ по отношению к параметрической неопределенности параметров модели объекта и к действию возмущений и помех в канале измерения. САУ имеет хорошие демпфирующие свойства, которые незначительно зависят от внешнего возмущения, величины запаздывания и коэффициента передачи объекта. Ступенчатое изменение сигнала возмущения  $f(t)$  в установившемся режиме приводит к приблизительно одинаковым результатам для моделей объектов  $W_{M1}(p)$ ,  $W_{M2}(p)$ ,  $W_{M3}(p)$ ,  $W_{M4}(p)$ . Следует отметить, что в этом случае отличия сравнительных показателей оказываются меньшими, чем при обработке одновременного действия возмущений в переходном и в установившемся режиме. Это объясняется тем, что при ступенчатом изменении сигнала возмущающего воздействия  $f(t)$  на входе объекта в меньшей степени проявляются высокочастотные составляющие регулируемой переменной (их возможное усиление производными компенсирующего устройства), чем при изменении задающего воздействия, для которого обычно проводится синтез регулятора.

Результаты моделирования подтверждают робастность и эффективность разработанной методики синтеза.

**Заключение.** Показана возможность практической реализации структуры системы с ДК инерционности объекта управления, реализуемом на основе оценок переменных состояний, получаемых с помощью НС с обратными связями сигмоидного типа. Устойчивое поведение системы с ДК и НС получено для всех моделей объекта при различных значениях дисперсии помехи. Следовательно, синтез робастной системы управления объектом с типовым регулятором и ДК, реализуемым на основе оценок производных с помощью НС, как показали исследования, оказывается возможным при больших изменениях параметров объекта и помехи в измеряемом сигнале. Следует также отметить, что использование сигмоидных функций в корректирующих обратных связях наблюдателя способствует повышению темпа оценивания и уменьшению ошибок, связанных с неточностью математической модели объекта.

Проведенными исследованиями САУ на примере промышленного биообъекта было доказано, что возможна практически реализуемая структура системы с постоянными параметрами типового ПИД-регулятора, ДК и НС, обеспечивающая робастное управление нестационарным объектом, описываемым интервальной моделью с постоянными параметрами. Установлено, что усиление помехи производными, реализуемыми в ДК с по-

мощью оценок производных, получаемых в НС, не существенно. Можно считать, что измерения осуществляются с допустимой ошибкой и полученные измерения и оценки можно считать приемлемыми.

Следует отметить, что в случае действия только возмущения в установившемся состоянии отличия сравнительных показателей оказываются меньшими, чем при обработке одновременного воздействия обоих возмущений по каналу задания и возмущения в процессе вывода на установившийся режим. Это объясняется тем, что при ступенчатом изменении только сигнала возмущающего воздействия  $f(t)$  на входе объекта при постоянном задании в меньшей степени проявляются высокочастотные составляющие регулируемой переменной, а, следовательно, меньшее возможное их усиление производными ДК, чем при изменении задающего воздействия.

Проведенными исследованиями установлено, что структура САУ с типовым ПИД-регулятором в сочетании с последовательным ДК инерционности объекта и НС с корректирующими обратными связями на основе сигма-функций обеспечивает простоту методики синтеза САУ, робастной к изменениям параметров объекта и действию неизмеряемых возмущений и неконтролируемых помех.

*Работа выполнена в Кубанском государственном технологическом университете, Краснодар.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лубенцов В.Ф., Лужевский Н.О., Лубенцова Е.В. Анализ подходов к синтезу систем управления объектами с запаздыванием с использованием наблюдателей состояния // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2024. – № 4. – С. 122-132.
2. Пухов Г.Е., Жук К.Д. Синтез многосвязных систем управления по методу обратных операторов. – Киев: Наукова думка, 1966. – 218 с.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
4. Лужевский Н.О., Шахрай Е.А., Лубенцов В.Ф., Лубенцова Е.В. Анализ и синтез робастных регуляторов с типовыми законами регулирования для квазистационарных объектов с запаздыванием // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2024. – № 5. – С. 24-31.
5. Краснова С.А., Уткин А.В. Сигма-функция в задачах синтеза наблюдателей состояний и возмущений // Проблемы управления. – 2015. – № 5. – С. 27-36.
6. Потапенко Е.М., Казурова А.Е. Основы теории автоматического управления. – Запорожье: ЗНТУ, 2007. – 162 с.
7. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66-74.
8. Тутов И.А. Система автоматического регулирования давления внутривидеометрической газораспределительной сети // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. Ч. 1. – 2013. – № 11 (58). – С. 118-121.
9. Шубладзе А.М., Попадько В.Е., Якушева А.А., Кузнецов С.И. Исследование оптимальных по степени устойчивости решений при ПИД управлении. Ч. 1 // Управление большими системами: сборник трудов. – 2008. – Вып. 22. – С. 86-100.
10. Александров А.Г., Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 2. – С. 16-30.
11. Колпиков Ю.Г., Лубенцов В.Ф., Опришко А.А., Белова Д.А., Шубладзе А.М. Об особенностях использования адаптивного ПИ-регулятора с активной идентификацией // Приборы и системы управления. – 1989. – № 4. – С. 26-27.
12. Патент № 2234116 С1 Российская Федерация, МПК G05B 11/36. Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор: № 2002135205/09; заявл. 24.12.2002; опубл. 10.08.2004 / Е.В. Лубенцова; заявитель Северо-Кавказский государственный технический университет.
13. Гайдук А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: Физматлит. 2012. – 360 с.
14. Дудников Е.Г. Автоматическое управление в химической промышленности: учебник для вузов / под ред. Е.Г. Дудникова. – М.: Химия, 1987. – 368 с.
15. Гайворонский С.А., Езангина Т.А., Соболев А.В. Синтез систем управления максимальной робастной степени устойчивости на основе вершинных критических корневых диаграмм // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – № 24 (10). – С. 519-525.

16. Тычинин А.В. Структурно-параметрический синтез системы граничного управления объектом с распределенными параметрами методами обратной динамики: специальность 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)": автореф. дисс. ... канд. тех. наук / А.В.Тычинин. – Самара, 2008. – 22 с.
17. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. К вопросу синтеза систем многорежимного регулирования // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2020. – № 18. – С. 41-49.
18. Ремизова О.А., Сыроквашиин В.В., Фокин А.Л. Синтез робастных систем управления с типовыми регуляторами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 12. – С. 966-972.
19. Тенденции развития методов синтеза систем автоматического управления (САУ). – URL: <https://gigabaza.ru/doc/112825-pall.html> (дата обращения: 25.10.2025).
20. Фокин А.Л. Синтез робастных систем управления технологическими процессами с типовыми регуляторами // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2014. – № 27 (53). – С. 101-106.
21. Лубенцова Е.В., Лубенцов В.Ф. Построение оптимальных по быстродействию систем стабилизации // Математические методы в технике и технологиях: ММТТ-2000: Сб. трудов 13 Междунар. науч. конф.: В 7 т. Т. 6. / Редкол.: Балакирев В.С. и др. – СПб.: С.-Петербург. гос. технол. ин-т (техн. ун-т), 2000. – С. 272-273.
22. Антипов А.С., Краснова С.А., Уткин В.А. Синтез инвариантных нелинейных одноканальных систем слежения с сигмоидальными обратными связями с обеспечением заданной точности слежения // Автоматика и телемеханика. – 2022. – № 1. – С. 40-66.
23. Gouze J.-L., Rapaport A., Hady-Sadok Z. Interval observers for uncertain biological systems // Ecological modelling. – Issue 133 (1). – P. 45-56.
24. Bernard O., Gouze J. L. Closed loop observers bundle for uncertain biotechnological models // Journal of Process Control. – October 2004. – Volume 14. – Issue 7. – P. 765-774.
25. Alessandri A., Baglietto M., Battistelli G. Design of state estimators for uncertain linear systems using quadratic boundedness // Automatica. – 2006. – Volume 42. – P. 497-502.
26. Харьковская Т.А., Кремлев А.С., Сабирова Д.М., Ефимов Д.В., Раисси Т. Интервальный наблюдатель для модели биологического реактора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 3 (91). – С. 39-45.
27. Пьявченко Т.А., Финаев В.И. Автоматизированные информационно-управляющие системы. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2007. – 271 с.

## REFERENCES

1. Lubentsov V.F., Luzhevskiy N.O., Lubentsova E.V. Analiz podkhodov k sintezu sistem upravleniya ob'yektami s zapazdyvaniyem s ispol'zovaniyem nablyudateley sostoyaniya [Analysis of approaches to the synthesis of control systems for objects with delay using state observers]. *Elektronnyy setevoy politematicheskyy zhurnal «Nauchnyye trudy KubGTU»* [Electronic network polythematic journal «Scientific works of KubSTU»], 2024, No 4, pp. 122-132.
2. Pukhov G.E., Zhuk K.D. Sintez mnogovyaznykh sistem upravleniya po metodu obratnykh operatorov [Synthesis of Multivariate Control Systems Using the Inverse Operator Method]. Kiev: Naukova dumka, 1966, 218 p.
3. Izerman R. Tsifrovyye sistemy upravleniya: transl. from Engl. [Digital Control Systems: Translated from English]. Moscow: Mir, 1984, 541 p.
4. Luzhevskiy N.O., Shakhrai E.A., Lubentsov V.F., Lubentsova E.V. Analiz i sintez robastnykh regulyatorov s tipovymi zakonami regulirovaniya dlya kvazistatsionnykh ob'yektov s zapazdyvaniyem [Analysis and synthesis of robust regulators with standard control laws for quasi-stationary objects with delay], *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics], 2024, No. 5, pp. 24-31.
5. Krasnova S.A., Utkin A.V. Sigma-funktsiya v zadachakh sinteza nablyudateley sostoyaniy i vozmushcheniy [Sigma Function in Problems of Synthesis of State and Disturbance Observers], *Problemy upravleniya* [Problems of Control], 2015, No. 5, pp. 27-36.
6. Potapenko E.M., Kazurova A.E. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Fundamentals of Automatic Control Theory]. Zaporozh'e: ZNTU, 2007, 162 p.
7. Denisenko V. PID-regulyatory: printsipy postroyeniya i modifikatsii. Chast' 1 [PID Controllers: Principles of Design and Modification. Part 1], *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern Automation Technologies], 2006, No. 4, pp. 66-74.
8. Tutov I.A. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya davleniya vnutripromyslovoy gazoraspredeletel'noy seti [Automatic pressure control system for an in-field gas distribution network]. *Aktual'nyye problemy gumanitarnyy i yestestvennykh nauk. Chast' 1* [Actual problems of humanitarian and natural sciences, Part 1], 2013, No. 11 (58), pp. 118-121.

9. Shubladze A.M., Popad'ko V.E., Yakusheva A.A., Kuznetsov S.I. Issledovaniye optimal'nykh po stepeni ustoychivosti resheniy pri PID upravlenii. Chast' 1 [Study of optimal solutions in terms of stability under PID control. Part 1], *Upravleniye bol'shimi sistemami: sbornik trudov* [Control of large systems: collected papers], 2008, Issue. 22, pp. 86-100.
10. Aleksandrov A.G., Palenov M.V. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya adaptivnykh PID-regulyatorov [Status and development prospects of adaptive PID controllers], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2014, No 2, pp. 16-30.
11. Kolpikov Yu.G., Lubentsov V.F., Oprishko A.A., Belova D.A., Shubladze A.M. Ob osobennostyakh ispol'zovaniya adaptivnogo PI-regulyatora s aktivnoy identifikatsiyey [On the Features of Using an Adaptive PI Controller with Active Identification], *Pribory i sistemy upravleniya* [Control Instruments and Systems], 1989, No. 4, pp. 26-27.
12. Lubentsova E.V. Proportsional'no-integral'no-differentsial'nyy regulyator [Proportional-integral-differential controller]: Patent RF, no 2234116 C1, 2004.
13. Gayduk A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (polinomial'nyy podkhod)* [Theory and Methods of Analytical Synthesis of Automatic Control Systems (Polynomial Approach)]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 360 p.
14. Dudnikov E.G. *Avtomaticheskoye upravleniye v khimicheskoy promyshlennosti* [Automatic Control in the Chemical Industry]. Moscow: Khimiya, 1987, 368 p.
15. Gayvoronskiy S.A., Yezangina T.A., Sobol' A.V. Sintez sistem upravleniya maksimal'noy robastnoy stepeni ustoychivosti na osnove vershinnykh kriticheskikh kornevykh diagramm [Synthesis of Maximum Robust Stability Control Systems Based on Vertex Critical Root Diagrams], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, Automation, Control], 2023, No. 24 (10), pp. 519-525.
16. Tychinin A.V. Strukturno-parametricheskii sintez sistemy granichnogo upravleniya ob'ektom s raspredelennymi parametrami metodami obratnoy dinamiki: spetsial'nost' 05.13.01 "Sistemnyy analiz, upravlenie i obrabotka informatsii (po otraslyam)": avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Structural-parametric synthesis of a boundary control system for an object with distributed parameters using inverse dynamics methods: abstract cand. of eng. sc. diss.]. Samara, 2008, 22 p.
17. Filimonov A.B., Filimonov N.B. K voprosu sinteza sistem mnogorezhimnogo regulirovaniya [On the issue of synthesis of multimode control systems], *Journal of Advanced Research in Technical Science* [Journal of Advanced Research in Technical Science], 2020, No. 18, pp. 41-49.
18. Remizova O.A., Syrovkashin V.V., Fokin A.L. Sintez robastnykh sistem upravleniya s tipovymi regulyatorami [Synthesis of robust control systems with standard controllers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye* [News of higher educational institutions. Instrument engineering], 2015, Vol. 58, No. 12, pp. 966-972.
19. *Tendentsii razvitiya metodov sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (SAU)* [Trends in the Development of Methods for Synthesizing Automatic Control Systems (ACS)]. Available at: <https://gigabaza.ru/doc/112825-pall.html> (accessed 25 October 2025).
20. Fokin A.L. Sintez robastnykh sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami s tipovymi regulyatorami [Synthesis of Robust Process Control Systems with Standard Controllers], *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)], 2014, No. 27 (53), pp. 101-106.
21. Lubentsova E.V., Lubentsov V.F. Postroyeniye optimal'nykh po bystrodeystviyu sistem stabilizatsii [Construction of stabilization systems with optimal response time], *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh: MMTT-2000: Sb. tr. 13 Mezhdunar. nauch. konf.* [Mathematical methods in engineering and technology: MMTT-2000: Collection of works of the 13th International scientific conference]: In 7 vol. Vol. 6. St. Petersburg: St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 2000, pp. 272-273.
22. Antipov A.S., Krasnova S.A., Utkin V.A. Sintez invariantnykh nelineynykh odnokanal'nykh sistem slezheniya s sigmoidal'nymi obratnymi svyazyami s obespecheniyem zadannoy tochnosti slezheniya [Synthesis of invariant nonlinear single-channel tracking systems with sigmoid feedbacks ensuring a specified tracking accuracy], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2022, No 1, pp. 40-66.
23. Gouze J.-L., Rapaport A., Hadj-Sadok Z. Interval observers for uncertain biological systems, *Ecological modeling*, Issue 133 (1), pp. 45-56.
24. Bernard O., Gouze J. L. Closed loop observers bundle for uncertain biotechnological models, *Journal of Process Control*, October 2004, Vol. 14, Issue 7, pp. 765-774.
25. Alessandri A., Baglietto M., Battistelli G. Design of state estimators for uncertain linear systems using quadratic boundedness, *Automatica*, 2006, Vol. 42, pp. 497-502.

26. Khar'kovskaya T.A., Kremlev A.S., Sabirova D.M., Efimov D.V., Raissi T. Interval'nyy nablyudatel' dlya modeli biologicheskogo reaktora [Interval observer for a biological reactor model], *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*. [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2014, No 3 (91), pp. 39-45.
27. Pyavchenko T.A., Finayev V.I. *Avtomatizirovannyye informatsionno-upravlyayushchiye sistemy* [Automated information and control systems]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2007, 271 p.

**Лужевский Никита Олегович** – Кубанский государственный технологический университет; e-mail: nikitacruzhev97@gmail.com; г. Краснодар, Россия; тел.: 89288833458; ассистент кафедры автоматизации производственных процессов.

**Лубенцов Валерий Федорович** – Кубанский государственный технологический университет; e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: 89614440061; д.т.н.; доцент; профессор кафедры автоматизации производственных процессов.

**Лубенцова Елена Валерьевна** – Кубанский государственный технологический университет; e-mail: lubentsovaev@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: 89034182575; д.т.н.; доцент; профессор кафедры автоматизации производственных процессов.

**Luzhevsky Nikita Olegovich** – Kuban State Technological University; e-mail: nikitacruzhev97@gmail.com; Krasnodar, Russia; phone: +79288833458; assistant professor, Department of Automation of Industrial Processes.

**Lubentsov Valery Fedorovich** – Kuban State Technological University; e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79614440061; dr. of eng. sc.; associate professor; professor, Department of Automation of Industrial Processes.

**Lubentsova Elena Valeryevna** – Kuban State Technological University; e-mail: lubentsovaev@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79034182575; dr. of eng. sc.; associate professor; professor, Department of Automation of Industrial Processes.

УДК 004.81 + 681.5.015

DOI 10.18522/2311-3103-2026-1-164-179

**Д.Н. Богачева, О.В. Лукинова, А.А. Саломатин****СЕМАНТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ БЕЗОПАСНОСТИ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ КИБЕРУСТОЙЧИВОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

*В современных условиях обеспечение киберустойчивости информационно-телекоммуникационных систем предприятий становится приоритетной задачей, требующей учета сложного взаимодействия множества факторов. Данная работа посвящена исследованию устойчивости информационно-телекоммуникационных систем с точки зрения процессно-ориентированного подхода, который фокусируется на сохранении непрерывного и безопасного функционирования предприятия при возникновении киберинцидентов. При этом одна из существующих сегодня проблем заключается в отсутствии средств системного анализа факторов безопасности, их влияния на общую защищенность бизнес-процессов. Цель исследования заключается в разработке формализованного инструмента, позволяющего прогнозировать уровень устойчивости с учетом функциональных зависимостей между факторами. В качестве основного метода исследования выступает концептуальное семантическое моделирование, позволяющее формализовать причинно-следственные связи между элементами системы. Научная новизна заключается в разработке модели, фиксирующей взаимное влияние угроз и мер противодействия, что позволяет прогнозировать уровень устойчивости информационно-телекоммуникационных систем уже на этапе проектирования. На примере метода оценки корректности параметров оконечных устройств автоматизированной системы управления технологическим процессом продемонстрировано влияние различных факторов на эффективность механизмов защиты нижнего уровня системы. Результаты, представленные в работе, позволяют сократить противоречие между научным и практическим применением процессно-ориентированного подхода, а также могут быть использованы как теоретическая основа для разработки программных инструментов в контексте принятия решений по выбору мер защиты бизнеса на основе баланса между возможным ущербом, ожидаемыми уровнями киберустойчивости, рисков и безопасности в течение всего жизненного цикла информационной системы.*

*Процессно-ориентированный подход; информационная система; киберустойчивость; семантическая модель факторов безопасности; датчик.*