



# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТЕНДАХ ДЛЯ ПОВЕРКИ И КАЛИБРОВКИ МАНОМЕТРОВ

Махмудов Г. 1[0000-0002-0915-9929], Холбоева Б. 2[0009-0001-0426-3305]

<sup>1</sup>PhD., доцент Навоийского государственного горно-технологического университета,  
E-mail: mahmudov.giyos@mail.ru

<sup>2</sup>Магистрант Навоийского государственного горно-технологического университета

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются вопросы высокоточного измерения давления — одного из основных параметров управления химико-технологическими процессами на промышленных предприятиях, а также автоматизации процессов поверки и калибровки приборов для измерения давления. В работе проанализированы структура и принцип действия автоматизированного стенда для поверки и калибровки, а также процесс обеспечения точности давления на основе пневматического контура регулирования. Приведены математические модели расхода воздуха через дроссель, динамические уравнения электромагнитного преобразователя и пневматических регуляторов. С помощью среды MATLAB Simulink выполнено моделирование динамических характеристик системы и проведено теоретическое обоснование.

**Ключевые слова:** манометр, поверка, калибровка, пневматическая система регулирования, автоматизированный поверочный стенд.

**Abstract.** This article examines high-precision pressure measurement—one of the key parameters for controlling chemical engineering processes at industrial enterprises—as well as the automation of pressure instrument verification and calibration. The paper analyzes the structure and operating principle of an automated verification and calibration rig, as well as the process of ensuring pressure accuracy using a pneumatic control loop. Mathematical models of air flow through a throttle, dynamic equations for an electromagnetic transducer, and pneumatic regulators are presented. Using the MATLAB Simulink environment, the system's dynamic characteristics are simulated, and a theoretical justification is provided.

**Key words:** pressure gauge, verification, calibration, pneumatic control system, automated verification stand.

**Annotatsiya.** Ushbu maqolada sanoat ishlab chiqarish korxonalarida kimyoviy texnologik jarayonlarning asosiy boshqaruv parametri bo'lgan bosimni yuqori aniqlikda o'chash hamda bosim o'chash asboblari qiyoslash va kalibrash jarayonlarini avtomatlashtirish masalalari yoritilgan. Maqolada avtomatik qiyoslash va kalibrash stendining tuzilishi, ishlash prinsipi hamda uning pnevmatik rostlash konturi asosida bosimni aniqlik bilan ta'minlash jarayoni tahlil qilingan. Shuningdek, drossel orqali o'tuvchi havo sarfi, elektromagnit o'zgartirishning dinamik tenglamalari va pnevmatik rostlagichlarning matematik modellari keltirilgan. MATLAB Simulink muhiti yordamida tizimning dinamik xususiyatlari modellashtirilib, nazariy jihatdan asoslangan.

**Kalit so'zlar:** manometr, qiyoslash, kalibrash, pnevmatik rostlash tizimi, avtomatlashtirilgan kalibrash stendi.

## Введение

Давление является одним из основных параметров управления химико-технологическими процессами на промышленных предприятиях. Поскольку производительность технологических процессов во многом зависит от значения данного параметра, обеспечение высокой точности измерения давления, а также поверка и калибровка средств измерения давления представляют собой актуальную задачу [1].



В настоящее время требуется автоматизация [2] испытательных стендов, предназначенных для поверки и калибровки приборов измерения давления. В таких автоматизированных стендах заданное оператором значение давления формируется с высокой точностью с использованием технических средств, а полученные результаты измерений сохраняются в памяти системы управления. По завершении процесса поверки или калибровки протокол испытаний автоматически формируется в электронном виде. Для реализации указанных функций необходимо разработать системы управления стендами поверки и калибровки на основе современных микроконтроллеров [3-4].

## Методология

Поверка или калибровка приборов для измерения давления осуществляется, как правило, в следующей последовательности:

- внешний технический осмотр проверяемых манометров;
- проведение поверки манометров;
- определение погрешностей измерений по полученным результатам;
- оформление и публикация протокола поверки.

Автоматизация первого этапа данных работ не предусматривается, поскольку при техническом осмотре манометров поверитель самостоятельно оценивает их техническое состояние после полного визуального и функционального контроля, а затем устанавливает прибор на поверочный стенд. Остальные этапы должны выполняться в автоматическом режиме [5].

Автоматизация процесса поверки и калибровки манометров с использованием программного обеспечения [6,9] обеспечивает следующие результаты:

- повышение достоверности и точности результатов поверки и калибровки манометров;
- снижение основной допустимой погрешности манометров;
- сокращение времени проведения поверки и калибровки;
- сохранение результатов поверки и калибровки в памяти системы;
- автоматический расчёт погрешностей по измеренным данным и формирование протокола поверки.

На рисунке 1 представлена структурная схема автоматической системы подачи давления в стенде для поверки и калибровки. В данной схеме значение давления

$P_{зад}$  управляются компьютером посредством сигнала. В этом случае заданный сигнал управления преобразуется из цифрового сигнала в аналоговый сигнал с помощью цифро-аналогового преобразователя [7] и усиливается усилителем для управления электромеханическим преобразователем. Под воздействием электромеханического преобразователя регулирующий орган управляет пневматическим регулятором, работающим на основе постоянной разности давлений, что обеспечивает создание требуемого давления. После достижения необходимого давления в ресивере клапан закрывается. Устройство измерения давления состоит из датчика давления и преобразователя сигнала. Давление в ресивере непрерывно измеряется данным устройством и передаётся в управляющее устройство. На основе полученного сигнала осуществляется регулирование давления в ресивере.

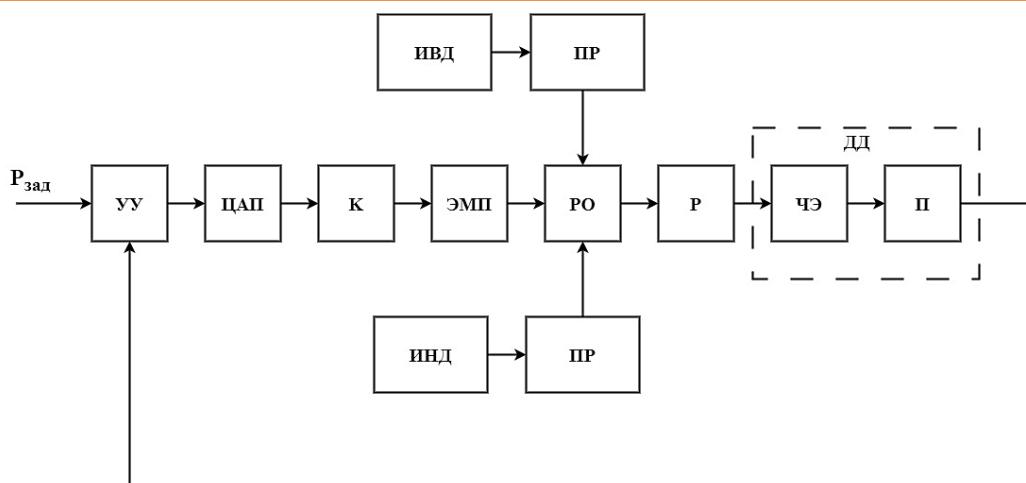


Рис. 1. Структурная схема системы автоматической подачи давления на стенде сравнения и поверки манометров.

При регулировании давления в замкнутой пневматической системе используются управляющие пневматические дроссели  $D_1$  и  $D_2$ . На рисунке 2 представлена функциональная схема контура пневматического регулирования давления.

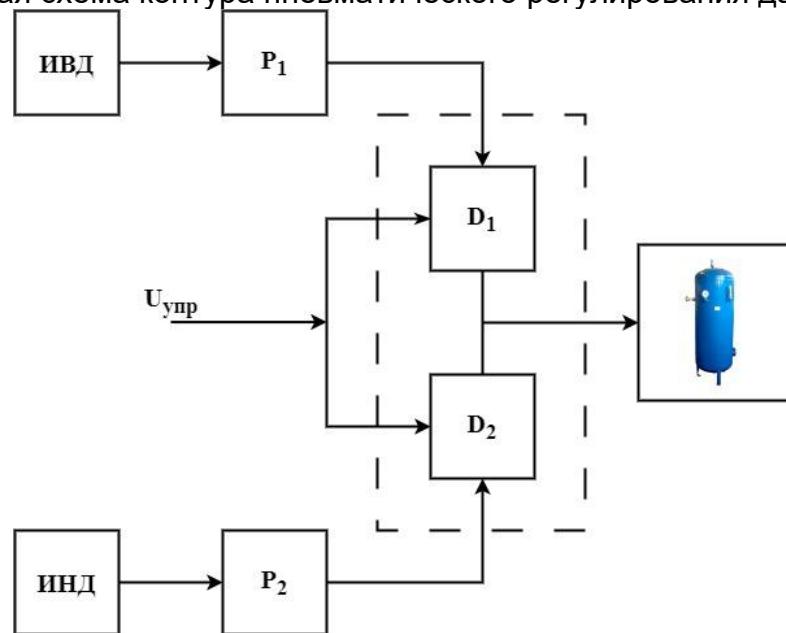


Рис. 2. Функциональная схема пневматического контура регулирования давления.

В представленной схеме обозначено:  $P_1$  — давление, подаваемое от источника,  $P_2$  — давление после редуцирования,  $U_{\text{упр}}$  — управляющий сигнал в виде электрического напряжения.

Регулирование давления осуществляется при помощи дифференциального регулятора, который формирует требуемое значение давления за счёт согласованной работы дросселей  $D_1$  и  $D_2$ . Таким образом, с помощью пневматического контура регулирования создаётся и поддерживается необходимое давление в герметичной трубопроводной системе, где размещены ресивер, эталонный и поверяемый измерительные приборы. Пневматический контур требует периодической настройки, а его герметичность подлежит



постоянному контролю. После анализа характеристик данной системы была разработана следующая математическая модель:

$$\begin{cases} G^d = k \sqrt{P''(P' - P'')}, & P'' > 0,5P' \\ G^n = 0,5kP', & P'' \leq 0,5P' \\ k = mF \sqrt{\frac{2g}{RT}} \end{cases} \quad (1)$$

где  $P'$  – давление перед дросселем,  $P''$  – давление после дросселя,  $T$  – температура воздуха,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $F$  – площадь поперечного сечения дросселя,  $m$  – коэффициент расхода воздуха.

При использовании пневматических регуляторов поддерживается неизменность перепадов давления  $d_1 = P_1 - P_x$  и  $d_2 = P_x - P_2$ . В замкнутой пневматической системе при её заполнении сжатым воздухом  $G_{11}''$  и при сбросе избыточного давления  $G_{22}''$  расходы сжатого воздуха определяются следующими зависимостями:

$$G_{11}'' = \begin{cases} k \sqrt{P_x d}, & P_x > d \\ 0,5 \cdot k(P_x - d), & P_x \leq d \end{cases} \quad (2)$$

$$G_{22}'' = \begin{cases} k \sqrt{(P_x - d)d}, & P_x > 2d \\ 0,5 \cdot kP_x, & P_x \leq 2d \end{cases} \quad (3)$$

Для исследования динамических характеристик контура пневматического регулирования давления, представленного на рисунке 2, была разработана его математическая модель [8], основанная на уравнении состояния Менделеева–Клапейрона.

$$\frac{V_x}{RT} \cdot \frac{dP}{dt} = G_{11}'' - G_{22}'' \quad (4)$$

где  $G_{11}''$  и  $G_{22}''$  – расход сжатого воздуха при заполнении и выпуске через регулирующий орган,  $P$  – давление воздуха в ресивере,  $V_x$  – объём замкнутой системы или ресивера.

Динамическая характеристика электромагнитного преобразователя, воздействующего на регулирующий орган в регуляторе давления, описывается уравнением, отражающим соотношение моментов на якорном валу и токов в управляемой обмотке.

$$\begin{cases} L_{EM} \frac{di_y(t)}{dt} + R_{EM} + R_a \cdot i_y(t) = U_y(t) - K_{EM} \frac{d\alpha(t)}{dt} \\ J_{EM} \frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} + F_{DEM} \frac{d\alpha(t)}{dt} + C_{EM} \cdot \alpha(t) = K_{EM} \cdot i_y(t) + M_{EM}(t) \end{cases} \quad (5)$$

где  $R_a$  – активное сопротивление электронного усилителя;  $R_{EM}$  – активное сопротивление управляемой обмотки электромагнита;  $L_{EM}$  – индуктивность управляемой обмотки электромагнита;  $F_{DEM}$  – коэффициент трения вала электромагнита;  $J_{EM}$  – момент инерции регулирующего органа и ротора электромагнита;  $C_{EM}$  – коэффициент пропорциональности между углом поворота и моментом ротора электромагнита;  $i_y(t)$  – ток в управляемой обмотке;  $\alpha(t)$  – угол поворота ротора электромагнита;  $U_y(t)$  – напряжение на выходе усилителя;  $M_{EM}(t)$  – статический момент на валу электромагнита.



Для повышения эффективности работы регулирующего органа в контуре пневматического регулирования давления применяются пневматические регуляторы, работающие на основе постоянной разности давлений. Такие регуляторы обеспечивают поддержание равенства перепадов давления на дросселе.

Математическая модель пневматического регулятора, основанного на постоянной разности давлений, выражается следующим дифференциальным уравнением:

$$m \left( \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \right) + f \left( \frac{dx(t)}{dt} \right) = PS - F \quad (6)$$

где  $f$  – сила трения,  $m$  – масса, действующая на пневматический регулятор,  $S$  – площадь мембранны,  $F$  – приложенная сила,  $x$  – перемещение пневматического регулятора, работающего на основе постоянной разности давлений.

## Результаты

Для исследования динамических характеристик контура пневматического регулирования давления в среде **Simulink** пакета прикладных программ **MATLAB** строится структурная модель математического описания системы. На основе данной модели выполняется имитационное моделирование, в результате которого получены динамические характеристики системы.

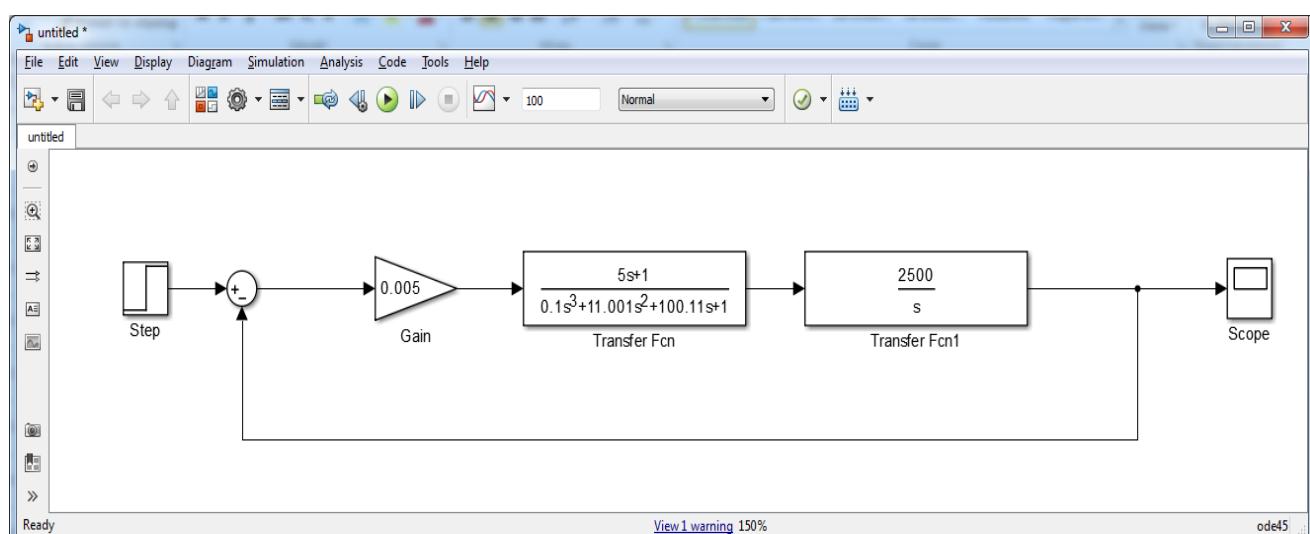
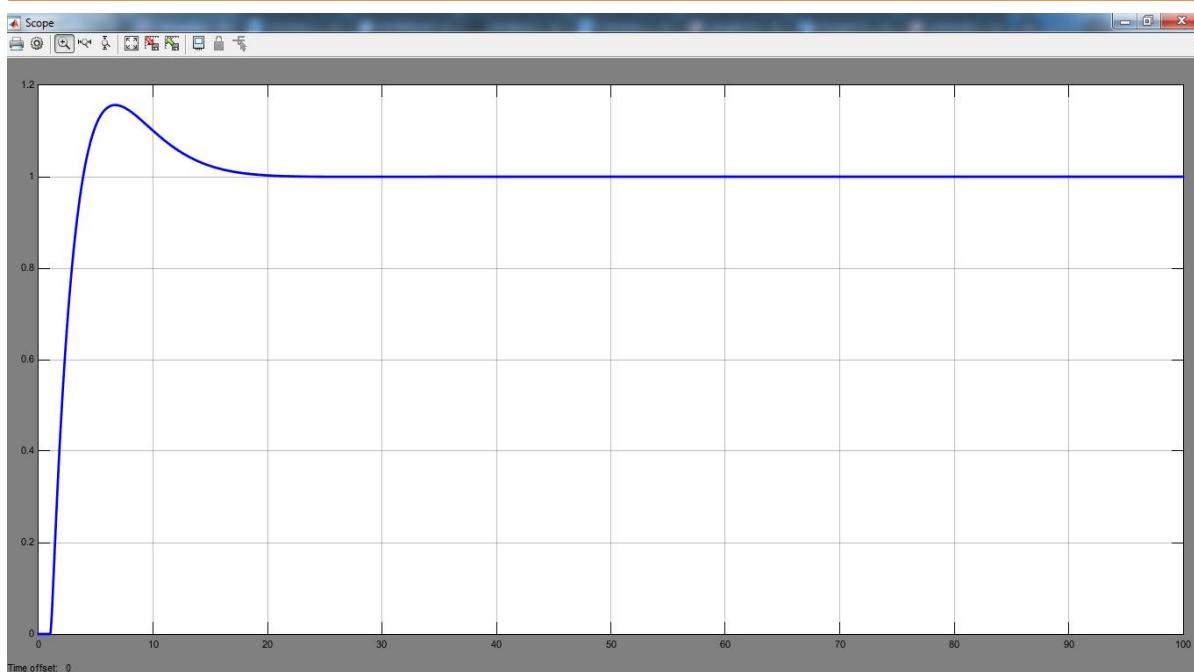


Рис.3. Моделирование в среде MATLAB контуры пневматического регулирования

Для обеспечения требуемой точности создания давления для сравниваемых и эталонных средств измерения давления был разработан пневматический контур регулирования. Его работа была теоретически обоснована на основе математической модели и имитационного моделирования в среде **MATLAB**. Полученные результаты измерений показали, что система обеспечивает высокую точность регулирования давления с точки зрения метрологических требований.



**Рис.4. Динамических характеристик контура пневматического регулирования давления**

### Выводы

По результатам проведённых исследований установлено, что использование пневматического контура регулирования в автоматизированном стенде для поверки и калибровки манометров обеспечивает стабильное и высокоточное поддержание давления. Разработанная математическая модель в среде **MATLAB** позволяет анализировать и оптимизировать динамические характеристики системы. Внедрение автоматизированного стенда поверки и калибровки манометров: повышает скорость проведения поверки и калибровки, минимизирует влияние человеческого фактора, повышает достоверность результатов измерений и обеспечивает автоматическую подготовку протокола в электронном виде.

Таким образом, предлагаемая автоматизированная система управления рекомендуется как современное решение, обеспечивающее высокую метрологическую точность при поверке и калибровке средств измерений давления.

### Список использованной литературы

- [1]. Леван С. Ф. Качество поверки средств измерений и апостериорная достоверность контроля. Измерительная техника, 2018, № С, с. 20–25.
- [2]. Юсупбеков Н. Р. и др. Ноаниқ мантиқ асосида интеллектуал бошқариш тизимларини ишлаб чиқиши //Journal of Advances in Engineering Technology. – 2020. – №. 2. – С. 20-25.
- [3]. Jumaev O. et al. Development of a digital signal processing model using a frequency synthesizer and synthesis of quadrature conversion circuits //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 419. – С. 01003.
- [4]. Mahmudov G. et al. Bioreaktor uchun noravshan rostlagichning qoidalar bazasini ishlab chiqish //Journal of Advances in Engineering Technology. – 2024. – №. 2. – С. 27-32.



- [5]. Марков А.В. Методологические основы автоматизированного контроля качества датчиков давления // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург 2011. С. 35.
- [6]. Ботиров Т. В. и др. Разработка программного обеспечения системы нечеткого управления для биореактора //World of science. – 2023. – С. 18-20.
- [7]. Жумаев О. А., Ковалева И. Л., Махмудов Г. Б. Управление температурным режимом процесса бактериального окисления на основе нечеткой логики //Системный анализ и прикладная информатика. – 2023. – №. 2. – С. 42-47.
- [8]. Xudoyberdiyeva N. et al. Suyuqlikli ion selektiv elektrodlarining selektivligini matematik modellashtirish //Techscience. uz-Texnika fanlarining dolzarb masalalari. – 2025. – Т. 3. – №. 8. – С. 52-58.
- [9]. Калибраторы давления автоматические «ЭЛЕМЕР-АКД-12К» Руководство по эксплуатации НКГЖ.408749.007РЭ. 2022 г. С. 55.