

Интеграция модулей идентификации стационарных участков объекта управления и автоматической настройки регуляторов в системную архитектуру лабораторного стенда

Н. А. Копылова¹, Р. Л. Барашкин²

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

¹nataly-anko@mail.ru, ²r.barashkin@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты интеграции модуля идентификации стационарных режимов объекта управления, идентификации параметров передаточной функции и автоматической настройки регуляторов в систему управления лабораторного стенда. Модуль позволяет автоматически настраивать параметры регуляторов на основе данных о математической модели объекта управления с целью повышения качества управления технологическим процессом на различных рабочих точках. Модуль включает функции сбора и анализа данных входных и выходных параметров объекта управления, применения методов идентификации для определения параметров передаточной функции и автоматической настройки регуляторов. Система управления стенда с интегрированными модулями является составляющей цифрового двойника и позволяет адаптироваться к изменениям параметров объекта управления и внешним воздействиям в автоматическом режиме.

Ключевые слова: система управления, идентификация стационарных участков, идентификация параметров модели объекта управления, автоматическая настройка параметров регуляторов, лабораторный стенд, цифровой двойник

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Эксплуатация технологических объектов нефтегазовой отрасли сопровождается постоянными изменениями состава перерабатываемого сырья, параметров технологических потоков и режимов отбора продукции. Подобные изменения оказывают непосредственное влияние на положение рабочей точки объекта управления и, как следствие, могут приводить к снижению эффективности функционирования регуляторов базовой системы автоматического управления.

В условиях изменяющихся внешних воздействий требуется не только оперативный контроль текущего состояния объекта, но и адаптация настроечных параметров регуляторов в соответствии с текущими условиями эксплуатации объекта. Одним из перспективных направлений решения данной задачи является применение прогнозирующих моделей, позволяющих обеспечить повышение качества регулирования за счёт улучшения динамических характеристик системы при варьирующихся внешних воздействиях [1, 2].

Формирование таких моделей требует предварительной идентификации параметров объекта

управления. Особую значимость в данной задаче приобретает анализ поведения системы в стационарных режимах и переходных процессах, что позволяет определять необходимые характеристики объекта управления по результатам сбора и анализа данных [3, 4].

В рамках данной работы рассматривается разработка комплекса программных инструментов, предназначенного для интеграции в систему управления стендом и применения в инфраструктуре цифрового двойника.

II. ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ

Для верификации разрабатываемых алгоритмов и оценки эффективности модулей цифрового двойника был создан лабораторный стенд, позволяющий моделировать многосвязные объекты управления (с возможностью имитации возмущающих воздействий).

Конструктивно стенд представляет собой систему из двух нагревательных элементов, транзисторов и датчиков температуры. В качестве управляющего воздействия (MV – Manipulated Variable) на объект подавался сигнал на нагреватели, а в качестве переменных процесса (PV – Process Variable) измерялась температура соответствующих транзисторов.

Особенностью данного стенда является наличие тепловой взаимосвязи между элементами: при нагреве одного транзистора происходит нагревание второго вследствие теплового излучения, что приводит к возникновению перекрёстных связей между каналами управления. Таким образом, формируется многосвязная динамическая система, отражающая свойства реальных технологических объектов, в частности, наличие внутренней корреляции между регулируемыми параметрами и управляющими, возмущающими воздействиями.

III. АРХИТЕКТУРА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Цифровой двойник, разрабатываемый в рамках данной работы, представляет собой программно-аппаратный комплекс, объединяющий модули сбора и обработки данных, а также модули управления и расчета параметров настройки регуляторов. Архитектура цифрового двойника ориентирована на модульный принцип построения, что обеспечивает масштабируемость и возможность дальнейшего расширения функциональности системы управления.

На текущем этапе разработки в состав цифрового двойника входят следующие функциональные модули:

- Программа сбора технологических данных — реализует непрерывное считывание значений измеряемых параметров с заданной частотой и формирует файл логов, содержащий временные метки и значения переменных процесса.
- Модуль управления лабораторным стендом — осуществляет подачу управляющих сигналов на объект и регистрацию ответных реакций в режиме реального времени.
- Модуль идентификации стационарных участков с одним или несколькими параметрами.
- Модуль идентификации параметров передаточной функции и автоматического расчёта коэффициентов ПИД-регулятор.

На рис. 1 представлены программные модули, реализованные в рамках цифрового двойника.

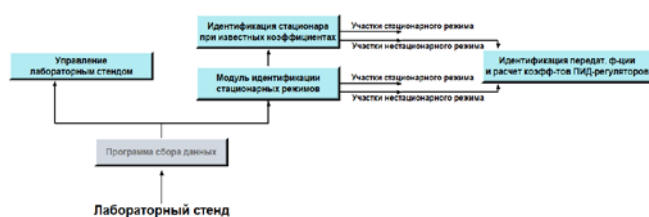


Рис. 1. Программные модули, реализованные в рамках цифрового двойника

Взаимодействие между модулями организовано по следующему алгоритму:

Программа сбора данных формирует исходный файл, содержащий массив измерений и соответствующих временных меток. Полученные данные одновременно поступают в модуль управления лабораторным стендом, а также в модуль идентификации стационарных участков. На этом этапе производится подбор индивидуальных весовых коэффициентов, характеризующих степень отклонения переменных от стационарного режима.

Определённые коэффициенты далее используются для повторного анализа с помощью упрощённой версии модуля, в которой коэффициенты заданы явно.

Результирующие нестационарные участки временных рядов служат входными данными для модуля идентификации параметров передаточной функции и расчета настроек ПИД-регуляторов.

IV. ПРОГРАММА НЕПРЕРЫВНОГО СБОРА ДАННЫХ

Одним из компонентов цифрового двойника является программа непрерывного сбора технологических данных, реализованная в виде автономного модуля, выполняющего функции буфера технологических данных. Программа выполняет проверку получаемых команд и предотвращает подачу некорректных воздействий, способных вызвать выход оборудования за допустимые температурные пределы.

Для тестирования алгоритмов идентификации независимо от работы оборудования модули изолированы друг от друга.

Для обеспечения непрерывности сбора данных с оборудованием лабораторного стенда была реализована система циклической обработки данных по принципу FIFO-очереди.

Последовательность работы модуля сбора данных следующая:

При первом запуске и отсутствии предварительно сформированного файла, данные записываются последовательно в массив фиксированного размера, начиная с первого поступившего значения.

После достижения предельной длины массива реализуется механизм сдвига: все записи массива сдвигаются на одну строку вверх, самая ранняя запись удаляется, а новое значение параметра записывается в конец массива.

Таким образом, поддерживается скользящее окно измерений, хранящее последние значения технологических параметров за заданный интервал времени.

Размер массива определяется программно и соответствует выбранному временному окну наблюдения. Данные сохраняются в формате CSV, что обеспечивает удобство их последующей интеграции с другими модулями цифрового двойника.

V. МОДУЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫМ СТЕНДОМ

Модуль управления лабораторным стендом представляет собой компонент цифрового двойника, обеспечивающий подачу управляющих воздействий на объект и переключение между ручным и автоматическим режимами работы. Разработка данного модуля была направлена на реализацию пользовательского интерфейса, поддерживающего как прямое управление элементами стенда, так и управление в составе контуров регулирования с применением ПИД-регуляторов.

В интерфейсе модуля предусмотрен выбор режима управления через выпадающее меню, в котором доступны два режима: ручной и автоматический.

При выборе ручного режима:

- Пользователь получает доступ к полям для задания управляющего воздействия (MV) на нагреватели 1 и 2;
- Поля задания температурных уставок для транзисторов, коэффициенты ПИД-регуляторов становятся недоступными для редактирования.

При выборе автоматического режима:

- Управление MV нагревателями в ручном режиме блокируется.
- Активируются поля задания температурных уставок для транзисторов 1 и 2, а также поля для ввода коэффициентов ПИД-регуляторов.
- Активируется алгоритм регулирования, обеспечивающий достижение заданных температур с учётом динамики объекта.

Для повышения стабильности работы реализован механизм защиты от насыщения интегральной составляющей регулятора.

Дополнительно реализована визуализация данных для наглядного представления переменных процесса.

Вспомогательная логика модуля включает:

- Проверку активности программы сбора данных: при запуске модуля управления автоматически проверяется наличие активного процесса непрерывного сбора технологических параметров. В случае его отсутствия модуль инициализирует запуск соответствующей программы, что позволяет исключить ошибки, связанные с отсутствием входных данных.
- Функцию выгрузки данных: при необходимости пользователь может сохранить текущие результаты измерений и управляющих воздействий. Формируемый файл содержит датированный заголовок и включает в себя значения температур транзисторов, временные метки и текущие значения MV, обеспечивая целостность истории управления и наблюдений.

Разработанный модуль обеспечивает взаимодействие оператора с лабораторным стендом, предоставляя возможности ручного и автоматического управления.

VI. Модуль ИДЕНТИФИКАЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ УЧАСТКОВ РАБОТЫ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Одним из ключевых этапов предварительной обработки экспериментальных данных в составе цифрового двойника является выделение участков стационарного режима работы объекта. Для решения данной задачи интегрирован модуль идентификации стационара, основанный на использовании контрольных карт Шухарта с экспоненциально взвешенным скользящим средним [5].

На этапе предварительной настройки осуществляется экспертная разметка исходных данных: временной ряд делится на участки, заведомо относящиеся к стационарным и нестационарным режимам. Далее, с помощью численного метода оптимизации осуществляется подбор весовых коэффициентов.

Модуль идентификации поддерживает два режима работы:

- Реальное время — модуль подключается к открытому «на чтение» файлу, формируемому в данный момент программой непрерывного сбора данных. Таким образом, осуществляется фоновый анализ актуальных технологических параметров по мере их поступления.
- Исторический анализ — возможна загрузка и анализ предварительно сохранённого файла данных, экспортированного из программы управления лабораторным стендом.

Вычисление весовых коэффициентов требует значительных вычислительных затрат. По результатам тестирования среднее время выполнения алгоритма на выборке объёмом 2000 точек составляет порядка 7 минут. В связи с этим было реализовано упрощённое решение, позволяющее значительно сократить вычислительное время.

Упрощённый модуль использует уже ранее найденные весовые коэффициенты. В этом случае в программу загружаются:

- данные процесса;
- рассчитанные весовые коэффициенты.

Применение данного подхода позволяет сократить время идентификации стационарных участков с 7 минут до 30 секунд при сохранении аналогичного объёма данных. Согласно проведённым тестам, точность работы упрощённого алгоритма остаётся сопоставимой с полной версией, при условии неизменности свойств объекта. В случае изменений параметров объекта (например, в результате деградации компонентов или воздействия возмущений), рекомендуется повторная оптимизация весов.

На рис. 2 представлены результаты идентификации стационарных участков в режиме реального времени.

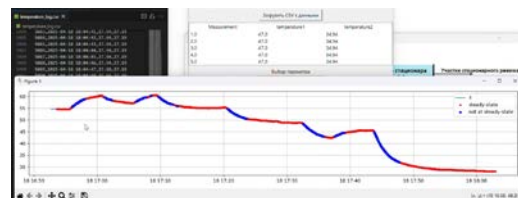


Рис. 2. Результаты идентификации стационарных участков в режиме реального времени

VII. Модуль ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ И НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

Алгоритм автоматической настройки ПИД-регулятора, реализованный в составе цифрового двойника, опирается на метод SIMC, который предполагает использование передаточной функции объекта управления, ввиду чего была интегрирована процедура автоматизированной идентификации параметров передаточной функции на основе анализа переходных процессов объекта [6].

Входными данными алгоритма являются:

- Значения регулируемого параметра (PV) в нестационарных участках работы объекта управления.
- Векторы начальных и граничных условий для параметров идентифицируемой модели.

Процесс идентификации реализуется на основе численного метода оптимизации, минимизирующего интегральный критерий второго порядка.

Далее рассчитываются значения настроечных коэффициентов ПИД-регулятора в соответствии с SIMC-методом, которые отображаются пользователю как рекомендованные к применению.

В условиях многосвязности исследуемого объекта (взаимное тепловое влияние транзисторов) предусмотрена возможность явного моделирования и фиксации возмущающих воздействий. Это достигается за счёт отдельной подачи управляющих сигналов на нагревательные элементы с временным сдвигом. Таким образом, один из транзисторов может выступать в качестве источника возмущения (DV – Disturbance Variable) по отношению к другому. Проведено тестирование идентификации параметров передаточной функции в условиях воздействия управляющих и возмущающих воздействий. Результаты идентификации представлены на рис. 3.

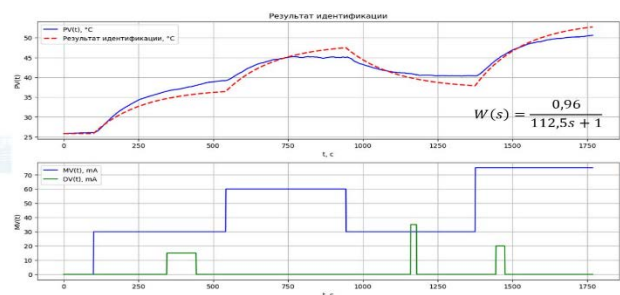


Рис. 3. Идентификация параметров передаточной функции в условиях имитации возмущающих воздействий

В состав цифрового двойника входят модули, реализованные в виде отдельных модулей, разработанных на языке Python, и запускаемых независимо друг от друга. Для обеспечения программного взаимодействия между модулем управления лабораторным стендом и модулем идентификации параметров передаточной функции был применён механизм разделяемой памяти (shared memory), предоставляемый библиотекой multiprocessing языка Python. Данный механизм позволяет двум и более процессам обращаться к одной и той же области оперативной памяти, что обеспечивает минимальные задержки при передаче данных и исключает необходимость промежуточного хранения данных во внешних файлах.

VIII. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ДАЛЬНЕЙШАЯ РАЗРАБОТКА

Реализация цифрового двойника с модульной архитектурой позволила создать гибкую и масштабируемую среду для отработки алгоритмов адаптивного управления в условиях многосвязной динамической системы.

Представленный подход позволяет обеспечить замкнутую автоматизированную процедуру настройки ПИД-регуляторов на основе текущих характеристик объекта в режиме реального времени.

В рамках дальнейшей разработки планируется интеграция модуля автоматического подбора целевых параметров математической модели цифрового двойника на основе данных о стационарных участках работы объекта управления, а также построение модели лабораторного стенда в среде имитационного моделирования «СИМБА».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Yuzhanin V., Popadko V., Koturbash T., Chernova V., Barashkin R., Predictive control and suppression of pressure surges in main oil pipelines with counter-running pressure waves // International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 172, May 2019, p. 42–47, <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.03.015>.
- [2] Melnik D.A., Barashkin R.L., Popadko V.E., Comparative Analysis of the Use of Control Systems with a Predictive Model of Various Configurations on the Example of a Hydraulic Stand // 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 45-48, doi: 10.1109/SCM58628.2023.10159100.
- [3] Барашкин Р.Л., Жедяевский Д.Н., Калашников П.К. [и др.] Опыт разработки модулей цифрового двойника малотоннажного производства сжиженного природного газа в импортонезависимом программно-вычислительном комплексе "СИМБА" // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2024. № 2(607). С. 56-64. EDN DLTXBS.
- [4] Калашников П.К., Барашкин Р.Л., Жедяевский Д.Н., Леонов Д.Г., Папилина Т.М., Нургуатова А.С., Федорова Е.Б., Южанин В.В. Аудит энергоэффективности технологического процесса сжижения природного газа с применением имитационного моделирования // II Всероссийская научно-практическая конференция «Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы» (08-09 ноября 2022 г.). М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022. С. 41-46.
- [5] Мартынов И.А., Барашкин Р.Л., Лайщук А.М. Разработка алгоритма идентификации стационарных режимов объекта управления на основе контрольных карт Шухарта // XXVII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2024), 22 – 24 мая, 2024 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 4 с.
- [6] Степанов И.И., Барашкин Р.Л., Лайщук А.М. Разработка программы автоматической настройки регулятора по данным с распределенной системы управления // XXVII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2024), 22–24 мая, 2024 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 4 с.