

Разработка программы автоматической настройки регулятора по данным с распределенной системы управления

И. И. Степанов¹, Р. Л. Барашкин², А. М. Лайщук³

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

¹iv.iv.stepanov@gmail.com, ²barashkin.r@gubkin.ru, ³andreylayschuk@gmail.com

Аннотация. Разработана программа автоматического расчета настроечных параметров ПИД-регулятора по данным, получаемым с распределенной системы управления. Для настройки регулятора использовался SIMC-метод. Разработан алгоритм идентификации параметров передаточной функции объекта управления. Проведено сравнение способов моделирования динамических систем, необходимых для проведения идентификации параметров объекта управления.

Ключевые слова: моделирование динамических систем, идентификация параметров передаточной функции, ПИД-регулятор, SIMC-метод

I. АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

Большинство методов настройки ПИД-регуляторов нацелены на достижение наибольшего быстродействия. Например, так устроен метод Циглера–Никольса, который оперирует тремя настроечными параметрами и обеспечивает довольно грубое регулирование [1]. Нередко в прикладных задачах появляется необходимость компенсировать возмущение, подаваемое на объект управления, в таких случаях подобные методы настройки не обеспечивают требуемое качество регулирования. Альтернативные методы настройки ПИД-регуляторов подразумевают наиболее плавное регулирование и максимальное подавление возмущающих воздействий. К таким методам относят λ -метод, IMC-метод и SIMC-метод [2]. В данной работе разработан алгоритм автоматической настройки ПИД-регулятора на основе SIMC-метода.

II. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ

Настроечные параметры SIMC-метода зависят от параметров передаточной функции объекта управления. Для применения предложенного метода настройки был разработан алгоритм идентификации параметров передаточных функций. Процедура идентификации осуществлялась посредством выполнения алгоритма оптимизации, обеспечивающего минимум интегрального критерия второго порядка I^2 , характеризующего разницу между реальной и моделируемой кривыми разгона. В качестве входных данных алгоритм получает зависимость регулируемого параметра (PV – Process Variable) от управляющего воздействия (MV – Manipulated Variable) во времени и векторы начальных и граничных условий.

На выходе алгоритм рассчитывает параметры передаточной функции заданного типового звена.

Целевыми параметрами алгоритма идентификации являются параметры передаточных функций: коэффициент усиления, постоянная времени и время запаздывания. Получая на входе начальное значение параметров и массив ограничений, алгоритм подбирает наиболее подходящие параметры с помощью последовательного квадратичного программирования (метод SLSQP). В разрабатываемой программе алгоритм реализован с помощью функции `minimize()` из библиотеки Scipy языка программирования Python.

Для разработки алгоритма идентификации был проведен анализ двух существующих способов моделирования динамических систем. Первый способ основан на моделировании системы в пространстве состояний. Второй способ основан на применении методов моделирования передаточных функций, представленных в библиотеке Control языка программирования Python в среде Jupyter Notebook.

Первый способ основан на последовательном интегрировании системы дифференциальных уравнений первого порядка с помощью функции `odeint()` из библиотеки Scipy. На входе функция `odeint()` получает модель системы в пространстве состояний, вектор начальных условий и момент времени, для которого требуется найти решение системы. Таким образом, последовательно передвигаясь вдоль временной шкалы, можно получить отклик динамической системы на произвольное входное воздействие [3].

Библиотека Control позволяет моделировать передаточные функции и строить зависимости выхода системы от времени для произвольного входного воздействия с помощью функций `tf()`, `Pade()` и `forced_response()`. Для расчета выхода системы функция `forced_response()` использует метод экспоненты матрицы (Matrix exponential).

К достоинству первого способа можно отнести его наглядность при анализе возможных ошибок и отладке алгоритма идентификации. Достоинство второго способа заключается в его относительной простоте решения задачи, однако он не предоставляет возможности детальной отладки алгоритма.

III. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДИЛРОВАНИЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

В рамках работы рассмотрено 3 метода моделирования запаздывания:

- Сдвиг временной оси на величину, равную времени запаздывания, при передаче входного воздействия в модель в пространстве состояний.
- Моделирование запаздывания через аппроксимацию Паде с помощью функции Pade() [4].
- Моделирование запаздывания через z-преобразование с помощью функции tf().

Ниже приведены графики переходных характеристик звена первого порядка с запаздыванием, полученные с применением различных методов моделирования запаздывания.

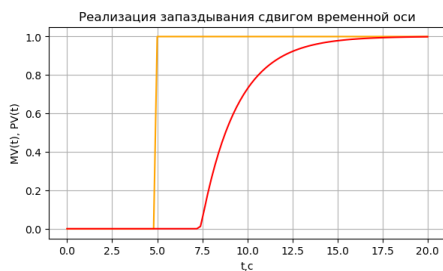


Рис. 1. Моделирование запаздывания с помощью сдвига временной оси

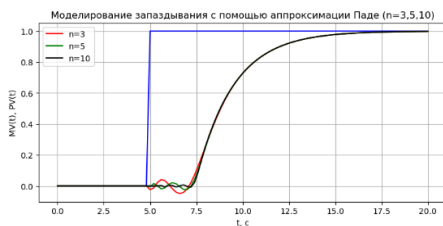


Рис. 2. Моделирование запаздывания с помощью аппроксимации Паде (n – степень аппроксимации)

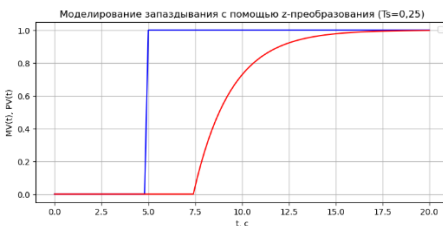


Рис. 3. Моделирование запаздывания с помощью z-преобразования

По результатам моделирования сделаны следующие выводы:

- Все три рассмотренных метода позволяют с требуемой точностью моделировать запаздывание.
- С увеличением степени аппроксимации Паде качество моделирования улучшается, однако точность моделирования при $n > 5$ может быть избыточной.
- Первый и третий методы дают идеализированный результат, исключая колебания PV во время

запаздывания, что снижает соответствие моделируемых данных реальными.

IV. АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ НАЧАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

Зачастую тяжело судить о порядке параметров передаточной функции и пределах их максимальных и минимальных значений при работе с исследуемым технологическим объектом.

Для использования разработанного алгоритма идентификации параметров передаточной функции необходимо выполнять предварительную оценку начальных значений коэффициента усиления k и времени запаздывания θ .

Для оценки k осуществляется поиск стационарных отрезков MV . Выделяя наиболее продолжительный стационарный интервала MV и исходя из предположения об устойчивости рассматриваемого объекта, значение k можно оценить как отношение значения PV на конце рассматриваемого отрезка к значению MV на конце рассматриваемого отрезка, поскольку при постоянном MV в отсутствие значительных внешних возмущений регулируемый параметр будет стремиться к некоторому стационарному значению.

Для оценки времени запаздывания θ алгоритм фиксирует начальное значение PV_0 на стационарных отрезках MV и, исходя из предположения, что к концу предыдущего отрезка значение PV было близко к установившемуся, отсчитывает время, за которое PV станет по модулю отличаться от PV_0 на некоторую граничную величину Δ . Усредняя полученные на каждом интервале значения θ , можно получить оценку θ для идентификации.

V. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

В качестве объектов идентификации для проверки предложенных методов моделирования передаточных функций использовались аperiodическое звено первого порядка с запаздыванием (объект 1) и колебательное звено второго порядка с запаздыванием (объект 2) со следующими параметрами:

$$W_1(s) = \frac{e^{-0.5s}}{3s+1} \quad (1)$$

$$W_2(s) = \frac{e^{-0.5s}}{3s^2+2s+1} \quad (2)$$

Переходные характеристики объектов были зашумлены для имитации измерительного шума регулируемого параметра. На рис. 4 представлены исходные данные для идентификации параметров.

Для удобства обозначим результаты, полученные для объектов первого и второго порядков с помощью библиотеки Control и моделирования запаздывания через аппроксимацию Паде и z-преобразование как Pade1, Pade2, z1 и z2 соответственно. В табл. I-IV приведены результаты сравнения способов моделирования передаточных функций и идентификации параметров с помощью интегральных критериев второго порядка.

Результаты, полученные для объектов первого и второго порядков с помощью моделирования динамической системы в пространстве состояний обозначены как FOPDT и SOPDT соответственно (FOPDT – First Order Plus Dead Time – звено первого порядка с запаздыванием, SOPDT – Second Order Plus Dead Time – звено второго порядка с запаздыванием).

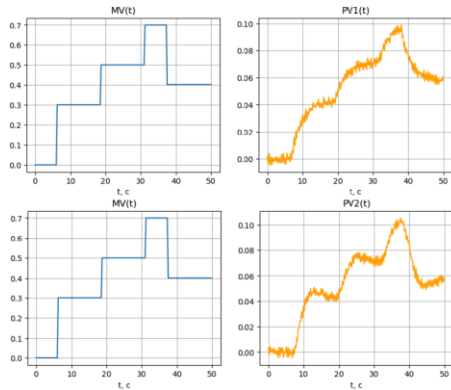


Рис. 4. Исходные данные для объектов (1) и (2)

ТАБЛИЦА I.

Объект	R ²		
	FOPDT	SOPDT	Pade1
1	0,001857	0,001693	0,001865
2	0,002755	0,001422	0,003018

ТАБЛИЦА II.

Объект	R ²		
	Pade2	z1	z2
1	0,001599	0,002159	0,002201
2	0,001420	0,003564	0,001840

ТАБЛИЦА III.

Параметр	Значение	FOPDT	Pade1	z1
<i>k</i>	1	0,9916	0,9951	0,9955
<i>T</i>	3	2,9492	2,8724	2,3037
<i>θ</i>	0,5	0,5566	0,3731	1,0000

ТАБЛИЦА IV.

Параметр	Значение	SOPDT	Pade2	z2
<i>k</i>	1	0,9922	0,9977	1,001
<i>T</i>	3	3,0451	3,06	1,7276
<i>2ζT</i>	2	2,0044	2,0170	1,6990
<i>θ</i>	0,5	0,5	0,4730	1,0000

На рис. 5–6 представлены графики переходных характеристик объекта и переходных характеристик, полученных в результате моделирования.

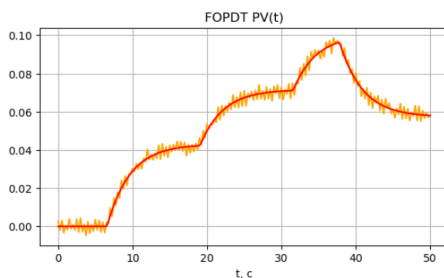


Рис. 5. Переходная характеристика, полученная с помощью моделирования объекта первого порядка в пространстве состояний

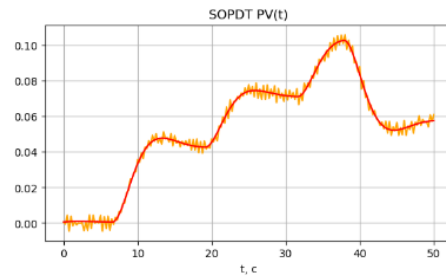


Рис. 6. Переходная характеристика, полученная с помощью моделирования объекта второго порядка в пространстве состояний

Метод моделирования системы в пространстве состояний и метод, основанный на применении функции $tf()$ и моделировании запаздывания с помощью аппроксимации Паде, сопоставимы по точности, однако в силу наглядности первый метод является предпочтительным для разработки алгоритма автоматической настройки.

VI. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ

Рассматриваемый алгоритм настройки оперирует одним настроечным параметром τ_c , который, в свою очередь, зависит от предъявляемых к системе управления требований по подавлению возмущающих воздействий следующим образом:

$$\tau_c = \tau_1 \cdot \frac{1}{k \cdot K_c} - \theta \quad (3)$$

где K_c – коэффициент усиления регулятора, τ_1 – постоянная времени объекта.

Величина K_c зависит от максимальной допустимой амплитуды гармонического возмущающего воздействия и максимального допустимого отклонения ΔPV от номинального значения, вызванного возмущением с данной амплитудой:

$$K_c = \frac{d_0}{\Delta PV_{\max}} \quad (4)$$

где d_0 – амплитуда гармонического возмущающего воздействия.

Для различных типовых динамических звеньев экспериментальным образом получены оптимальные виды регуляторов, а также зависимости настроечных параметров регулятора от величины τ_c . По формуле (5) вычисляется настроечный параметр ПИ-регулятора для управления объектом первого порядка с запаздыванием:

$$\tau_I = \min(\tau_1, 4(\tau_c + \theta)) \quad (5)$$

Передаточная функция ПИ-регулятора запишется в виде:

$$c_{PI}(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} \right)$$

Получая на входе результаты идентификации, алгоритм автоматической настройки вычисляет настроечные параметры для заданных значений d_0 , PV_{\max} по формулам (3), (4), (5).

Проверка адекватности получаемых настроечных параметров осуществлялась путем моделирования процесса регулирования в замкнутой системе по каналу возмущения в среде Simulink. В качестве объекта управления выбрана модель звена первого порядка. Факторы проведения эксперимента и рассчитанные значения настроечных параметров представлены в табл. V–VI.

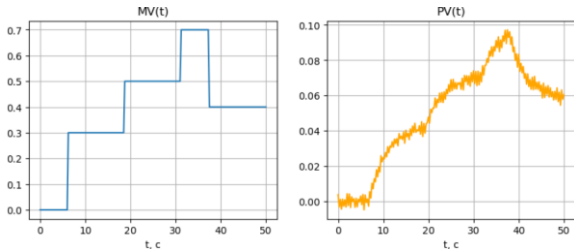


Рис. 7. Исходные данные алгоритма автоматической настройки (объект первого порядка)

ТАБЛИЦА V.

Параметр	Значение	FOPDT
k	1	1,001
T	4	3,895
θ	0,5	0,584

ТАБЛИЦА VI.

d_0	ΔPV_{max}	K	τ_c	τ_I	Уставка
0,08	0,2	0,4	3,307	3,895	0,5

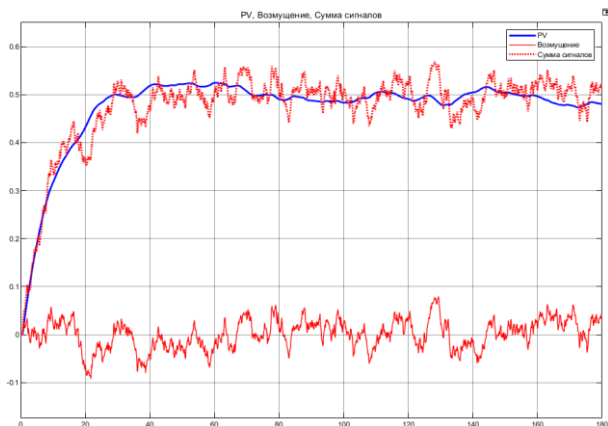


Рис. 8. Переходная характеристика, полученная при регулировании по каналу возмущения

VII. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ДАЛЬНЕЙШАЯ РАЗРАБОТКА

На рис. 8 видно, что регулятор в значительной степени обрабатывает подаваемый на объект управления сигнал возмущения. Рассматриваемый алгоритм настройки удобен для синтеза систем управления, предназначенных для стабилизации быстропеременных технологических параметров относительно номинального значения, например, для синтеза регуляторов расхода.

К достоинствам метода можно отнести его относительную простоту и эффективность. Разработанный алгоритм идентификации параметров передаточной функции объекта позволяет применять SIMC-метод на основе данных о зависимости PV от MV во времени, что может быть удобным в производственной практике.

Алгоритм показывает наиболее эффективный результат при работе с наборами значений MV кусочно-линейного характера. В дальнейшем предполагается доработка алгоритма с целью повышения точности при работе с исходными данными, для которых характерно непрерывное изменение управляющего воздействия во времени, а также разработка графического интерфейса пользователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ziegler J.G., Nichols N.B., 1942. Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME. 64, 759–765.
- [2] Skogestad S., Grimholt C. (2012). The SIMC Method for Smooth PID Controller Tuning. In: Vilanova R., Visioli A. (eds) PID Control in the Third Millennium. Advances in Industrial Control. Springer, London. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2425-2_5 (дата обращения: 11.12.2023).
- [3] Алферова Т.В., Трохова Т.А. Компьютерное моделирование элементов динамических систем в PYTHON // Агротехника и энергообеспечение. 2021. №3 (32). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternoe-modelirovanie-elementov-dinamicheskikh-sistem-v-python> (дата обращения: 11.12.2023).
- [4] Капелюховский А.А. Сравнительный анализ способов аппроксимации транспортного запаздывания в системе управления гидродинамическим вибратором // ОНВ. 2014. №3 (133). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-sposobov-approksimatsii-transportnogo-zapazdyvaniya-v-sisteme-upravleniya-gidrodinamicheskim-vibratorom> (дата обращения: 18.12.2023).