

Разработка системы идентификации параметров модели цифрового двойника по данным РСУ

Н. С. Подгорный¹, Р. Л. Барашкин², А. М. Лайщук³

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

¹nikita-podgornyi@yandex.ru, ²barashkin.r@gubkin.ru, ³andreylayschuk@gmail.com

Аннотация. Разработана система идентификации параметров модели цифрового двойника в пакете технологического моделирования СИМБА по данным из распределённой системы управления производства сжиженного природного газа. В системе предусмотрен выбор технологического оборудования, целевых параметров оборудования, идентифицируемых параметров модели цифрового двойника. Работа системы идентификации параметров модели оценивается по результатам сравнения прогнозных значений целевых параметров со значениями этих параметров из распределённой системы управления.

Ключевые слова: РСУ; идентификация параметров модели; цифровой двойник; СПГ; СИМБА; технологическое моделирование

I. ВВЕДЕНИЕ

Цифровой двойник (ЦД) – это математическая модель реального объекта управления или системы, которая используется для анализа, оптимизации и управления этим объектом или системой. Математическая модель ЦД создается и уточняется на основе данных, полученных от реального объекта, и может включать в себя информацию о его структуре, функциях, поведении и взаимодействии с окружающей средой. На современном этапе развития промышленности ЦД активно используются в нефтегазовой отрасли. ЦД применяются для решения следующих задач:

- Оптимизация добычи и переработки. Создание моделей процессов для расчёта оптимальных параметров работы оборудования и повышения эффективности использования ресурсов [1].
- Управление активами и рисками. Диагностика состояния оборудования, предсказание возможных неисправностей и планирование ремонта и обслуживания.
- Прогнозирование изменений в окружающей среде. Моделирование изменений в окружающей среде, связанных с добычей и переработкой нефти и газа [2].
- Разработка новых технологий. Тестирование новых технологий и решений, прежде чем они будут внедрены в производство [3].
- Обучение персонала. Обучение персонала работе с новым оборудованием и технологиями [4].

При внедрении ЦД в эксплуатацию важно, чтобы математическая модель ЦД соответствовала реальному объекту, в противном случае, применения ЦД с деградированными параметрами может привести к экономическим потерям, выходу из строя оборудования, нештатным и аварийным ситуациям.

II. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПО ДАННЫМ РСУ

В работе рассматривается применение ЦД на примере производства сжижения природного газа (СПГ) с целью поддержания заданного режима работы, обеспечивающего максимальную производительность по целевой продукции. Идентификация параметров математической модели ЦД будет производиться по данным, поступающим с распределённой системы управления (РСУ) реального объекта. Для решения задачи непрерывной идентификации предлагается система идентификации, разработанная на языке Python.

A. Архитектура системы идентификации

Схема математической модели ЦД разработана в пакете технологического моделирования СИМБА [5].

Система идентификации позволяет выбирать технологическое оборудование, целевые параметры оборудования, а также идентифицируемые параметры (или группу параметров), значения которых будут подбираться в процессе вычислений. Список технологического оборудования считывается в результате парсинга объектов из файла в формате JSON.

Запуск и останов расчёта математической модели для решения задачи идентификации параметров осуществляется через брокер сообщений RabbitMQ.

Брокер сообщений работает по принципу «издатель-подписчик», где издатель отправляет сообщение в точку обмена, которая распределяет сообщения в одну или несколько очередей, а подписчик подписывается на эту очередь для получения сообщений. Когда сообщение поступает в очередь, брокер автоматически доставляет его всем подписчикам, которые подписаны на эту очередь. Если подписчик не может обработать сообщение, помещает его в очередь повторных попыток, чтобы попытаться доставить его позже [6]. На рисунке 1 представлена структурная схема общения через брокера сообщений.

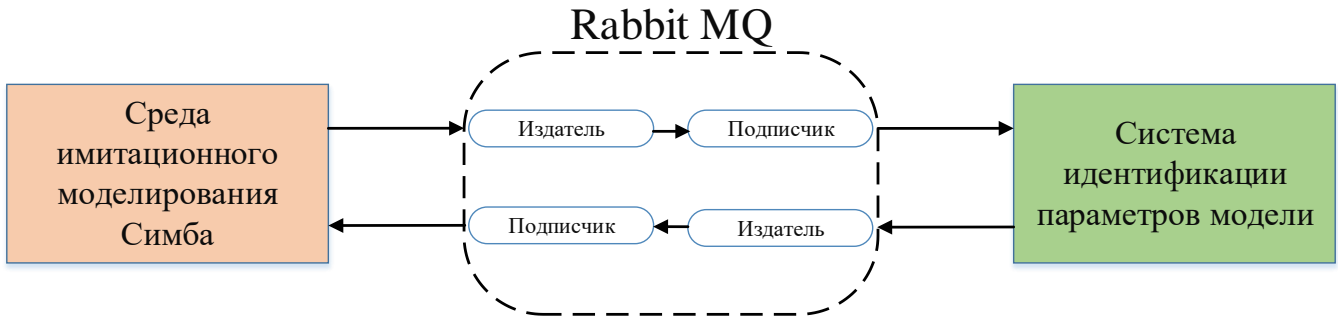


Рис. 1. Структурная схема общения через брокера сообщений

В. Интерфейс пользователя

Для конфигурирования списка технологического оборудования, параметров идентификации и целевых параметров разработан интерфейс пользователя (рис. 2).

Рабочая область интерфейса пользователя состоит из двух частей: выбор списка идентифицируемых параметров и списка целевых параметров. Выбор списка технологических объектов и его параметров выполнены в виде выпадающих списков с возможностью поиска. Доступен ввод начального значения поиска для

исходных параметров и необходимого значения для целевых параметров. Для увеличения точности расчёта реализован ввод весового коэффициента, на который будет умножаться значение функции невязок при сравнении с условием завершения алгоритма идентификации. По завершении расчёта полученные значения параметров будут выведены на интерфейс пользователя с возможностью записи идентифицированных параметров модели в файл со схемой пакета технологического моделирования СИМБА.

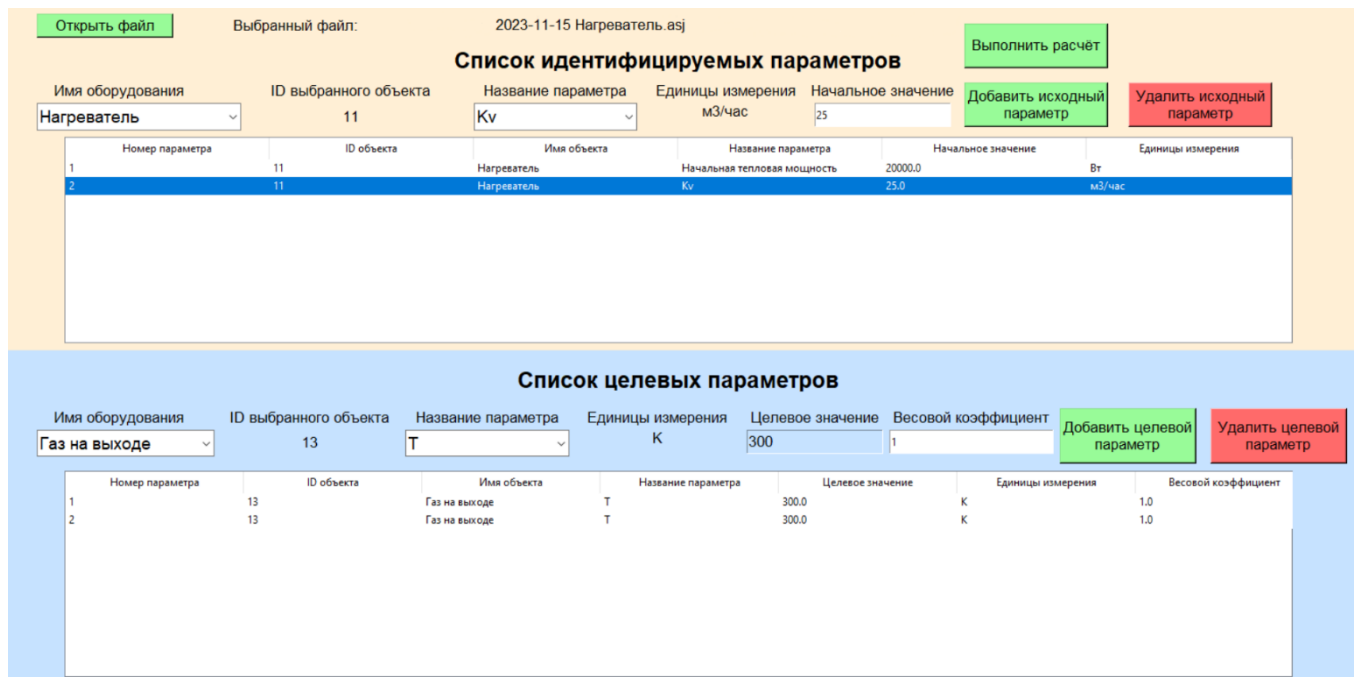


Рис. 2. Прототип графического интерфейса пользователя

С. Алгоритм идентификации

Для решения задачи идентификации используется нелинейный метод наименьших квадратов (НМНК). Целевая функция записывается следующим образом:

$$f(X) = \sum r^2(X) \rightarrow \min \quad (1)$$

где X – целевые параметры, $r(X)$ – функция невязки между данными с РСУ и модельными значениями.

Для решения НМНК использовался метод Левенберга–Марквардта (LMA). Данный алгоритм

является итерационным методом, который используется для решения задач нелинейной оптимизации. Он сочетает в себе подходы метода Гаусса–Ньютона и метода градиентного спуска. Значение параметра на каждом следующем шаге вычисляется по формуле:

$$X_{i+1} = X_i - (H(X_i) + \lambda_i \cdot I)^{-1} \cdot \nabla f(X_i) \quad (2)$$

где X_i – значение параметра на предыдущей итерации, $H(X_i)$ – матрица вторых производных Гессе, $\nabla f(X_i)$ – градиент функции невязок, λ_i – неотрицательная константа, своя для каждого шага.

При $\lambda_i = 0$ получаем формулу из метода Ньютона–Гаусса, при достаточно большом значении λ_i направление поиска будет близким к направлению в методе градиентного спуска. В методе Левенберга–Марквардта учитывается кривизна поверхности невязки, и величина градиента. Это позволяет обеспечивать требуемую скорость сходимости [7].

Метод Левенберга–Марквардта имеет высокую чувствительность к начальным значениям и не всегда гарантирует глобальную сходимость, поэтому в системе идентификации применялся так же метод доверительных областей (trust region method). Данный метод используется для поиска экстремума целевой функции с ограничениями. Метод на каждой итерации алгоритма строит доверительную область вокруг текущей точки, в пределах которой целевая функция может быть аппроксимирована. Функция невязок аппроксимируется квадратичной функцией в доверительной области, которая имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} f(x) &\approx \tilde{f}(x) = \\ &= f(c) + \nabla f(c)^T (x-c) + \frac{1}{2!} (x-c)^T H(c) (x-c) \end{aligned} \quad (3)$$

где c – текущее значение параметра, x – следующее значение в доверительной области, $H(c)$ – матрица вторых производных Гессе в текущей, $\nabla f(c)$ – градиент функции невязок в текущей точке.

Доверительная область определяется гиперсферой $\|x-c\|_2 < \delta$, где δ – радиус доверительной области на текущей итерации.

В отличие от линейного поиска, где находится направление улучшения функции невязок и затем выбирается длина шага, в методе доверительных областей изначально выбирается область (аналог максимальной длины шага), в которой аппроксимация хорошо описывает функцию невязок, после чего в данной области находится точка, обеспечивающая наилучший шаг [8].

На каждом шаге производится оценка доверительной области. Размер доверительной области зависит от того насколько хорошо показывает себя квадратичная аппроксимация (рис. 3). Если значение функции невязок на текущей итерации достаточно близко со значением аппроксимированной функции $\tilde{f}(x_n^*) \approx f(x_n^*)$, тогда доверительный интервал δ следует увеличить. В ином случае, следует уменьшить доверительный интервал, для обеспечения необходимой точности аппроксимации.

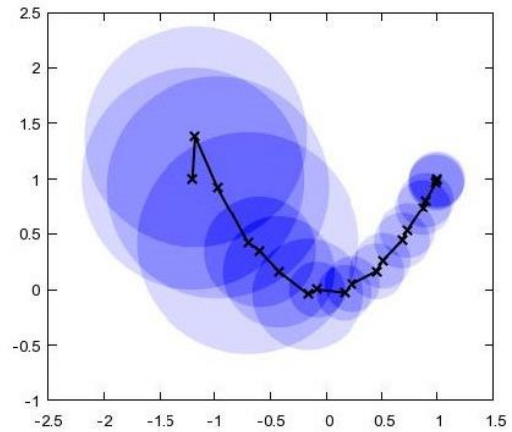


Рис. 3. Поиск решения методом доверительных областей [9]

В случае, когда расчёт матрицы вторых производных невозможен или он требует длительного времени и больших вычислительных мощностей, может быть использован алгоритм точки Коши. В таком случае при аппроксимации оставляют только первый порядок. Его концепция схожа с методом наискорейшего спуска. Точка Коши лежит на градиенте в пределах допустимой области. Последовательное нахождение точек Коши найдёт локальный минимум. Но данный метод имеет более плохую сходимость подобно методу наискорейшего спуска.

Метод доверительных областей эффективен при оптимизации функций с ограничениями, так как позволяет учитывать их при выборе направления движения. Методы доверительных областей целесообразно применять для задач, где требуется численное решение задачи оптимизации с ограничениями.

III. ПРИМЕР ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ЦД ТИПОВОГО ОБЪЕКТА

Рассмотрим работу программы идентификации на примере нахождения мощности нагревателя, установленного на линии отпарных газов малотоннажного производства СПГ при подаче не сконденсировавшегося газа обратно в городскую сеть.

Через нагреватель движется флюид с температурой входа $T_{вх}$. На нагреватель подаётся мощность Q . В результате работы нагревателя с мощностью Q температура флюида изменяется до $T_{вых}$.

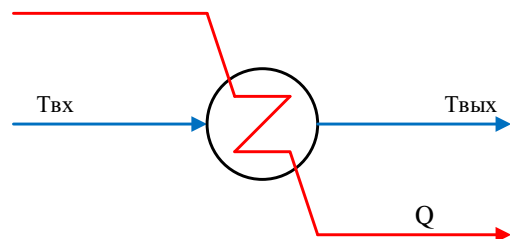


Рис. 4. Принципиальная схема нагревателя, где $T_{вх}$ – температура входа потока в нагреватель, $T_{вых}$ – температура выхода потока из нагревателя, Q – мощность нагревателя

В результате решения задачи идентификации нужно найти такую мощность нагревателя $Q_{идент}$, которая при заданных режимах и разных входных температурах $T_{вх}$ будет давать минимальную ошибку $T_{вых}$.

Положим, что температура входного потока $T_{вх} = 193,15$ К, а на выходе нагревателя необходимо получить температуру $T_{вых}^{цел} = 283,15$ К. Проведём идентификацию с помощью разработанной программы при весовом коэффициенте равном 1. Получим $Q_{идент} = 191428,43$ Вт, $T_{вых} = 283,05$ К. Таким образом, относительная ошибка вычислений будет равна:

$$\delta = \frac{|T_{вых}^{цел} - T_{вых}|}{T_{вых}^{цел}} \cdot 100\% = 0,035\% \quad (4)$$

Проведём идентификацию при тех же условиях, но при весовом коэффициенте равном 1000. Получим $Q_{идент} = 191642,69$ Вт, $T_{вых} = 283,15$ К. Таким образом, при увеличении весового коэффициента увеличивается точность получаемых результатов.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка системы идентификации параметров модели ЦД по данным из РСУ реального объекта является актуальной задачей в области автоматизации и управления техническими системами. Построение адекватной математической модели является важной задачей при разработке, внедрении и эксплуатации ЦД.

В работе рассмотрена архитектура взаимодействия системы идентификации с пакетом технологического моделирования с помощью брокера сообщения. Представлен функционал графического интерфейса пользователя. Описаны численные алгоритмы оптимизации, которые используются для идентификации параметров модели цифрового двойника по данным из распределённой системы управления. Приведён пример работы программы идентификации.

V. ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В дальнейшей работе предполагается интеграция системы идентификации в графический интерфейс пользователя пакета технологического моделирования СИМБА. Решение задачи идентификации в среде ЦД повысит удобство использования разрабатываемого программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Быкова В.Н., Ким Е., Гаджиалиев М.Р., Мусиенко В.О., Оруджев А.О., Туровская Е.А. Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. № 1 (28). С. 8. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-28.art8>.
- [2] Коровин Г.Б. Возможности применения цифровых двойников в промышленности // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27. № 8. С. 124–133.
- [3] Крам М.Н., Безбородова О.Е., Бородин О.Н., Светлов А.В. Цифровой двойник сердца // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1 (35). С. 73–84.
- [4] Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 4. С. 35–43.
- [5] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020613488 «СИМБА». / Южанин В.В., Барашкин Р.Л., Калашников П.К., Савельев А.М., Федорченко Ю.П., Папилина Т.М., Фролов О.Е., Абраменкова К.Н., Ларионов А.С., Жедяевский Д.Н., Попадько В.Е., Самсонова В.В., Абрамкин С.Е., Нургуатова А.С. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 марта 2020.
- [6] Emrah Ayanoglu, “Mastering RabbitMQ. Master the art of developing message-based applications with RabbitMQ” Birmingham B3 2PB, UK, 2015. 286 p. ISBN 978-1-78398-152-6
- [7] J.J. More, “The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory,” Numerical Analysis / ed. G.A. Watson, Lecture Notes in Mathematics 630, Springer Verlag, 1977. P. 105-116.
- [8] Andrew R. Conn, Nicholas I.M. Gould, Philippe L. Toint, “Trust-region method”, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1987. 978 p.
- [9] Метод оптимизации Trust-Region DOGLEG. Пример реализации на Python (2017). Available at: <https://habr.com/ru/articles/335224/> (accessed 21 March 2024)