

Разработка алгоритма идентификации стационарных режимов объекта управления на основе контрольных карт Шухарта

И. А. Мартынов¹, Р. Л. Барашкин², А. М. Лайщук³

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

¹martynov.igor2020ty@gmail.com, ²barashkin.r@gubkin.ru, ³andreylayschuk@gmail.com

Аннотация. Разработан алгоритм идентификации стационарного режима на основе контрольных карт Шухарта с экспоненциально взвешенным скользящим средним. Методика основывается на расчете оценок дисперсий с введением в выражение экспоненциально взвешенного скользящего среднего, что позволяет отойти от классической формулы, в которой необходимо заранее задаваться стационарными значениями исследуемого параметра, что ограничивает применимость алгоритма для решения прикладных задач. Предлагается применение метрики классификации F1-мера для подбора весовых коэффициентов, характеризующих влияние предыдущих значений на текущую величину, с целью повышения точности работы алгоритма идентификации стационарных состояний.

Ключевые слова: идентификация стационарных режимов, граничное отношение дисперсий, частота дискретизации, коэффициенты веса, F1-мера

I. ВВЕДЕНИЕ

Задача идентификации стационарного режима технологического процесса заключается в том, чтобы определить временные диапазоны равновесных значений параметров процесса, характеризующие нахождение объекта управления в установившемся состоянии. Стационарные режимы требуются для разработки и идентификации параметров математических моделей цифровых двойников [1, 2].

Классические контрольные карты Шухарта (ККШ) позволяют во временных рядах выделять стабильные состояния с целью дальнейшего их использования в задачах идентификации параметров объекта управления [3].

Классические ККШ позволяют определять отклонения от заданного стационарного состояния процесса в определенные моменты времени. Однако, они не обеспечивают возможность выявления стационарных режимов работы при изменении технологических режимов установки.

Применение классических ККШ требует наличия постоянных целевых значений параметров, которые требуется обновлять при смене технологического режима работы установки, что на практике затруднительно.

В работе вместо классических ККШ предлагается применять отношение двух оценок дисперсий изменения технологического параметра. Для непрерывного режима

сбора данных АСУ ТП предлагается вместо классической формулы оценки дисперсии (1) перейти к формуле (2) с экспоненциально взвешенным скользящим средним, подставив в (1) вместо среднего значения экспоненциально взвешенное скользящее среднее (3) [4].

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_N)^2 \quad (1)$$

$$v^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - X_{f_{i-1}})^2 \quad (2)$$

$$X_{f_i} = \lambda X_i + (1 - \lambda) X_{f_{i-1}} \quad (3)$$

где λ – коэффициент веса, характеризующий влияние предыдущих значений на текущую величину, принимает значение от 0 до 1, X_i – значение измеряемой величины, $X_{f_{i-1}}$ – предыдущее значение экспоненциально взвешенного скользящего среднего.

Начальное значение $X_{f_{i-1}}$ определяется как среднее значение технологического параметра на горизонте первого найденного стационарного режима.

Отношение двух оценок дисперсий предлагается определять по формуле (4):

$$R_i = \frac{(2-\lambda)v_{f_i}^2}{\delta_{f_i}^2}, \quad (4)$$

где первая оценка дисперсии характеризует разность между текущим значением и предыдущим экспоненциально скользящим средним и определяется по формуле (5).

$$v_{f_i}^2 = \lambda(X_i - X_{f_{i-1}})^2 + (1 - \lambda)v_{f_{i-1}}^2 \quad (5)$$

Вторая оценка дисперсии характеризует разность между текущим значением и предыдущим и определяется по формуле (6).

$$\delta_{f_i}^2 = \lambda(X_i - X_{i-1})^2 + (1 - \lambda)\delta_{f_{i-1}}^2 \quad (6)$$

II. ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА С ПОМОЩЬЮ ОТНОШЕНИЯ ДВУХ ОЦЕНОК ДИСПЕРСИЙ

Предложенный алгоритм позволяет идентифицировать стационарные и нестационарные участки на трендах технологических параметров (рис. 1а). В соответствии с формулами (5), (6) построены две оценки дисперсии измеряемого параметра (рис. 1б, в). Первая оценка дисперсии более чувствительна к

изменению параметра и увеличивается, когда процесс на протяжении нескольких точек подряд монотонно возрастает или убывает (рис. 1б). При колебаниях процесса вокруг установившегося режима первая оценка уменьшается. Вторая оценка определяется разностью между текущим и предыдущим значением параметра (рис. 1в), более инерционно реагирует на изменения параметра. На рис. 1г приведен график изменения отношения оценок, характеризующий области стационарного и нестационарного режимов.

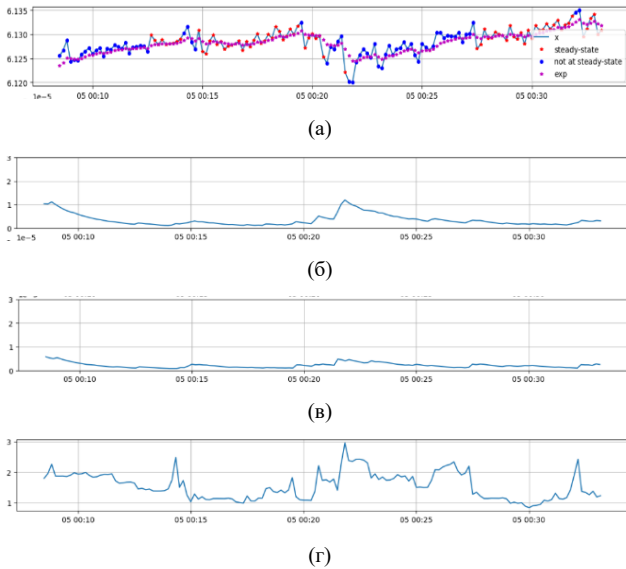


Рис. 1. Работа алгоритма по выделению стационарного режима. а) Результат работы алгоритма; б) Первая оценка дисперсии; в) Вторая оценка дисперсии; г) Отношение оценок дисперсии изменения технологического параметра

Характер изменения технологических параметров (температура, давление, расход и др.) отличается друг от друга, поэтому в качестве настроечного параметра алгоритма идентификации стационарных режимов используется граничное значение R , которое подбирается индивидуально для каждого параметра.

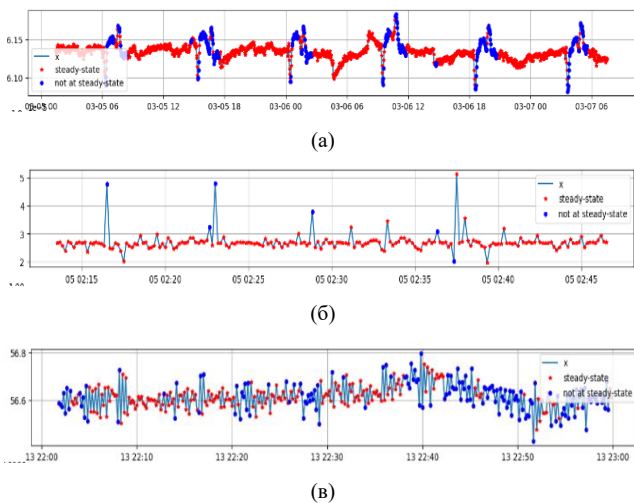


Рис. 2. Результат работы алгоритма идентификации стационарного режима для технологических параметров: а) расход; б) давление; в) температура

На рис. 2 показан результат работы алгоритма идентификации стационарного режима для различных технологических параметров. Выделенные красным цветом участки определяются алгоритмом как стационарный режим, синим – нестационарный.

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНОГО ЗНАЧЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ ДИСПЕРСИЙ

Вследствие того, что алгоритм чувствителен к характеру изменения измеряемой величины и требует настройки, проведено исследование по определению граничного значения R .

В результате проведённых исследований определено, что для наилучшего выбора граничного значения R необходимо предварительно выделить стационарный режим (рис. 3а), построить за выбранный период изменение отношения оценок дисперсий и выбрать максимальное его значение (рис. 3б).

В рассмотренном случае граничное значение отношения дисперсий R получилось равным: 2,9.

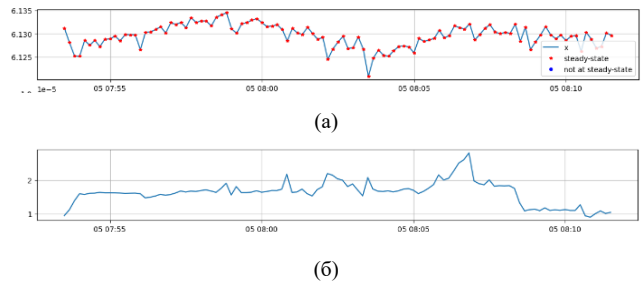


Рис. 3. Определение граничного значения величины R . а) Стационарный участок изменения параметра; б) Определение максимального граничного значения R на стационарном участке

IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ИЗМЕРЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

При увеличении частоты дискретизации уменьшается разница между текущим и предыдущим экспоненциально взвешенным скользящим средним, что приводит к уменьшению отношения между первой и второй оценками и снижению ошибки идентификации стационарного режима. Поэтому рекомендуется увеличивать частоту дискретизации измеряемых параметров.

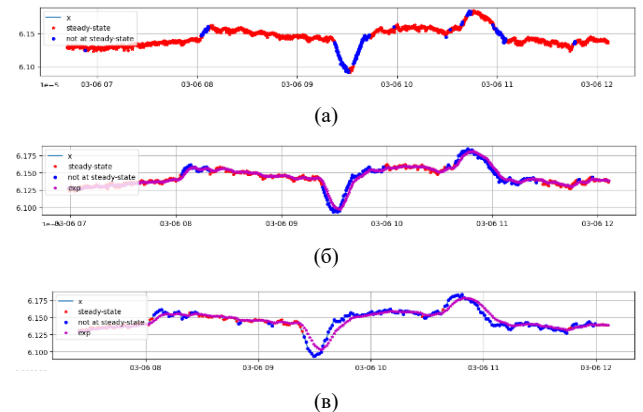


Рис. 4. Результат работы алгоритма при различных частотах дискретизации. а) частота дискретизации $1/10 \text{ c}^{-1}$; б) частота дискретизации $1/30 \text{ c}^{-1}$; в) частота дискретизации $1/60 \text{ c}^{-1}$

На рис. 4 приведен пример изменения качества идентификации стационарного режима при изменении частоты дискретизации. По результатам проведенных исследований частота дискретизации была выбрана равная: $1/10 \text{ с}^{-1}$.

V. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЕСА НА ИДЕНТИФИКАЦИЮ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА

С целью повышения точности работы алгоритма идентификации стационарного режима, было проведено исследование влияния коэффициентов веса λ на работу алгоритма.

Для определения коэффициентов веса исходные данные экспертным методом размечались на стационарные и нестационарные участки, далее с помощью оптимизационного алгоритма подбирались веса. Для оценки качества подбора коэффициентов веса использовалась *F1-мера*. Исследование показало, что подбор коэффициентов веса с помощью оптимизационного метода эффективно осуществлять на непродолжительном размеченном участке на стационарный режим и переходной процесс.

Экспертная разметка исходных данных на нестационарные участки осуществлялась по следующим правилам [5]:

- аномальные значения – значения, значительно отличающиеся от остальных значений в наборе данных (промахи, выбросы);
- серия – принимается состояние, когда заданное количество точек оказываются по одну сторону от экспоненциально взвешенного скользящего среднего;
- тренд (дрейф) - точки образуют непрерывно повышающуюся или понижающуюся кривую.

В противном случае, если данные не удовлетворяли приведенным выше правилам, участки размечались как стационарный режим.

На рис. 5 приведён результат работы алгоритма идентификации стационарного режима на основе найденных коэффициентов веса с помощью оптимизационного метода.

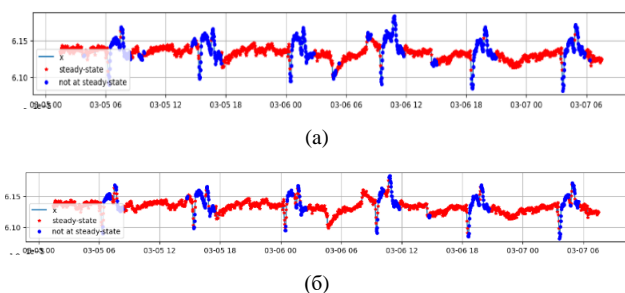


Рис. 5. Результаты идентификации стационарных режимов: а) с подобранными коэффициентами веса ($\lambda_1=0,271$, $\lambda_2=0,198$, $\lambda_3=0,132$); б) без подбора коэффициентов веса ($\lambda_1=0,1$, $\lambda_2=0,1$, $\lambda_3=0,1$)

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен алгоритм идентификации стационарного режима на основе расчета оценок дисперсий с введением в выражение экспоненциально взвешенного скользящего среднего, что позволило расширить применимость алгоритма для решения прикладных задач на различных рабочих режимах без необходимости задания количества значений исследуемого параметра.

Для повышения точности работы алгоритма идентификации стационарных состояний, предложен метод нахождения граничного значения R , выявлено наилучшее время дискретизации и подобраны весовые коэффициенты с использованием метрики классификации *F1-мера*. Полученные результаты позволили повысить точность алгоритма идентификации стационарных режимов.

VII. ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В дальнейших исследованиях планируется оценить запаздывание объекта управления с помощью алгоритма идентификации стационарного режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Лайщук А.М., Барашкин Р.Л., Попадьюк В.Е. Выбор типа контрольной карты Шухарта для данных из исторической базы данных распределенной системы управления / Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России // Тезисы докладов VII Региональной научно-технической конференции, посвященной 100-летию В.Л. Березина, Москва, 19–21 сентября 2023 года. Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2023. С. 341. EDN TLOOVY.
- [4] Лайщук А.М., Барашкин Р.Л. Разработка программы сбора и обработки данных для выявления стабильного режима работы установки с использованием контрольных карт Шухарта // V Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2023): Сборник докладов. Санкт-Петербург. 26–28 сентября 2023 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 298 с. ISBN 978-5-7629-3236-3
- [5] Адлер Ю.П., Шпер В.Л. Практическое руководство по статистическому управлению процессами. М.: Альпина Паблишер. 2019, 234 с.