

Разработка программы сбора и обработки данных для выявления стабильного режима работы установки с использованием контрольных карт Шухарта

А. М. Лайщук¹, Р. Л. Барашкин²

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

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

Аннотация. В работе рассматривается программа сбора и анализа данных распределённой системы управления для выявления стабильного режима технологического процесса. Представлен разработанный алгоритм анализа протекания процесса для обнаружения стабильного режима с помощью контрольных карт Шухарта. Выявленные стабильные режимы используются для идентификации параметров оборудования статической модели технологического процесса нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова: контрольные карты Шухарта; РСУ; сбор данных; анализ данных; идентификация стабильного режима

I. ВВЕДЕНИЕ

В 1924 году Уолтер Шухарт изобрел инструмент для анализа изменчивости процессов и назвал его контрольными картами, которые в настоящее время применяются в промышленности при анализе технологических процессов [1–3], в медицине [4], образовании [8], а также при анализе бизнес-процессов [5].

Идея создания контрольных карт появилась у Шухарта при анализе причин раннего отказа ламп, используемых в усилительных подстанциях в линиях связи. В начале двадцатого века контроль качества выпускаемой продукции заключался в изъятии бракованных изделий из партии. В то время как Шухарт считал, что увеличивать долю кондиционной продукции можно с помощью модернизации производства. В качестве способа обнаружения причин, влияющих на качество выпускаемой продукции, было предложено использование контрольные карты.

При анализе технологического процесса Шухарт предположил, что любая система обладает двумя источниками изменчивости. Первым источником изменчивости выступает сама система. Любая система, например, технологический процесс, обладает внутренней изменчивостью ввиду различных факторов, которые присутствуют постоянно и трудно идентифицируются. Каждый из таких факторов сам по себе вносит небольшой вклад в изменчивость процесса и не оказывает существенного влияния на общую изменчивость процесса. Сумму этих изменчивостей называют внутренней изменчивостью системы. Причины, вызывающие внутреннюю изменчивость системы, называют общими причинами изменчивости. Вторым источником изменчивости служат вмешательства в протекание процесса. Такие причины

называют особыми причинами изменчивости. В качестве примера особых причин изменчивости можно привести: ненадлежащее качество исходного сырья, ошибки персонала, выход из строя оборудования, несоблюдение регламента ведения процесса.

Приведенная выше классификация изменчивости понятна, однако она не дает ответа на вопрос каким образом различать причины изменчивости на реальных, практических примерах. Для решения этой проблемы и избавления от неоднозначности трактовки Шухартом и Демингом было предложено использовать операциональные определения, в которых указывается практический способ их однозначной реализации.

Были введены следующие операциональные определения для общих и особых причин вариации:

- Общими причинами вариаций называют все отклонения параметров/характеристик процесса на подходящей контрольной карте, которые находятся внутри заданных границ и не обнаруживают ни серий, ни других неслучайных структур. В этом случае процесс называют статистически управляемым или стабильным.
- Особыми причинами вариаций называют причины, которые на подходящей контрольной карте соответствуют либо выходящим за контрольные границы точкам, либо точкам, показывающим серии и/или другие неслучайные структуры. Если особые причины вариаций присутствуют на контрольной карте, то процесс называют статистически неуправляемым или нестабильным.

Исходя из операциональных определений общих и особых причин вариаций, можно сказать, что контрольная карта позволяет выявлять моменты возникновения особых причин вариации, а следовательно, выявлять моменты, когда процесс переходит в нестабильное состояние.

В отличие от классических статистических процедур контрольные карты позволяют ответить на вопрос стабилен ли процесс в конкретный момент времени, а следовательно, можно ли использовать эти данные для предсказания поведения процесса в будущем. В случае нестабильности процесса данные не рекомендуется использовать для прогнозирования поведения процесса. Это связано с тем, что особые причины вариации не только ощутимо воздействуют на изменчивость

процесса, но и значительно снижают его предсказуемость. Понимание того, что процесс находится в стабильном, а следовательно, и предсказуемом состоянии позволяют использовать эти данные для построения и верификации математических моделей процесса.

Впоследствии ученые начали предлагать новые типы контрольных карт. В 1954 году английский статистик Пейдж предложил контрольную карту кумулятивных сумм [6]. В 1959 году Робертс предложил карту с экспоненциально взвешенным скользящим средним [7].

II. ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТАБИЛЬНОГО РЕЖИМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ

Перед использованием контрольных карт необходимо определить тип контрольной карты, подходящий для исходных данных. В работе рассматриваются непрерывные данные из базы распределенной системы управления.

Для непрерывных величин, регулярно или периодически собираемых, применяется соответствующий тип контрольных карт. Для регулярно собираемых данных выбор объема подгрупп и частоты сбора данных независимы. Для периодически собираемых данных объем подгруппы и частота сбора зависят друг от друга.

Рассматриваемые исходные данные из РСУ являются периодическими измерениями технологических параметров непрерывного процесса. Для таких данных применяются контрольные карты типа X-mR (индивидуальных значений и среднего размаха) т.к. периодически собираемые данные естественным образом представляются в виде подгрупп с объемом выборки равным одному. Если построить карту другого типа, то исходные данные необходимо каким-либо образом сгруппировать, что может повлиять на распределение вариабельности. Так же данный тип карты является более чувствительным для периодически собираемых данных.

Тестирование работоспособности выбранного типа карты для исходных данных осуществлялось на измерениях датчика расхода на ограниченном промежутке времени. Результаты построения контрольной карты индивидуальных значений и скользящих размахов представлен на рисунке 1. Проведение эксперимента с использованием контрольных карт классического типа был выявлен их недостаток, который не позволяет использовать их для выявления стабильного режима работы установки. Контрольные карты не позволяют контролировать идентификацию стабильного режима после перехода процесса на другой режим. В этом случае требуется выполнять ручную настройку контрольных карт для нового режима, что существенно затрудняет применение алгоритма для реального процесса. Смена режима является относительно частым событием, и ручная подстройка алгоритма под новый режим не представляется возможным.

Таким образом, контрольные карты классического типа эффективны при поиске моментов времени, когда процесс выходит из стабильного состояния, однако они не способны выделять стабильные режимы работы при смене технологических режимов работы установки.

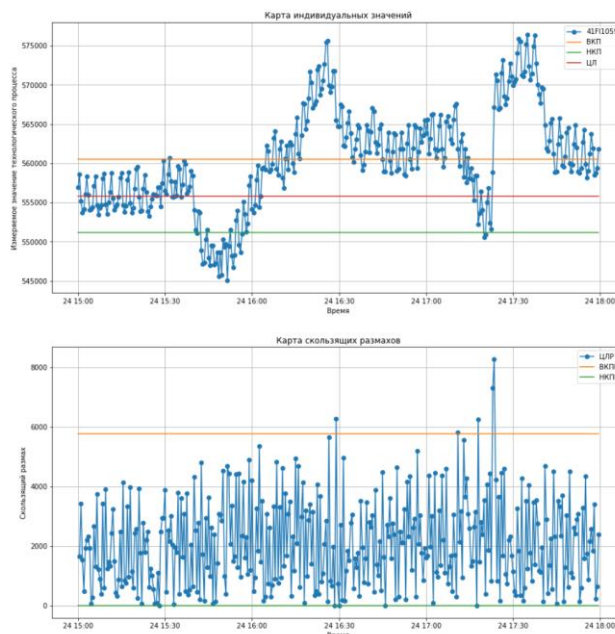


Рис. 1. Контрольные карты типа X-mR

После выявления проблемы с использованием контрольной карты классического типа было принято решение перейти к контрольным картам, разработанным позднее. Поскольку использование контрольных карт кумулятивных сумм подразумевает наличие целевого значения, то мы вынуждены были отказаться от данного типа контрольных карт ввиду отсутствия целевых значений в исходных данных.

Для исследования была выбрана карта с экспоненциально взвешенным скользящим средним, определяемым по формуле:

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

где $0 < \lambda \leq 1$.

Однако вместо построения контрольной карты с экспоненциально взвешенным скользящим средним было решено оценивать наличие стабильного режима путем соотношения двух оценок изменчивостей возмущений.

Классическая формула для оценки дисперсии:

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

Заменим среднее значение на предыдущее экспоненциально взвешенное скользящее среднее, получим следующую формулу для оценки дисперсии:

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

Введем переменную d_i как разницу между текущим значением измеряемой величины и предыдущим значением экспоненциально взвешенного скользящего среднего:

$$d_i = X_i - X_{f_{i-1}}$$

Если процесс стабилен и отсутствует автокорреляция между соседними измерениями, то X_i и $X_{f_{i-1}}$ независимы, следовательно, дисперсию σ_d^2 можно разложить на дисперсию σ_x^2 и σ_{xf}^2 :

$$\sigma_d^2 = \sigma_x^2 + \sigma_{x_f}^2 \quad (2)$$

Дисперсия экспоненциально взвешенного скользящего среднего определяется по формуле:

$$\sigma_{x_f}^2 = \frac{\lambda}{2 - \lambda} \sigma_x^2 \quad (3)$$

Используя формулы (2) и (3) получим:

$$\sigma_x^2 = \frac{2 - \lambda}{2} \sigma_d^2 = \frac{2 - \lambda}{2} v^2 \quad (4)$$

При нахождении оценки дисперсии (1) воспользуемся экспоненциально взвешенным скользящим средним вместо нахождения обычного среднего:

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

Таким образом, первая оценка дисперсии возмущений исходя из формул (4) и (5) может быть получена следующим образом:

$$s_{1,i}^2 = \frac{2 - \lambda}{2} v_{f,i}^2 \quad (6)$$

Вторая оценка дисперсии возмущений может быть получена из разницы последовательных значений:

$$s_{2,i}^2 = \frac{\delta_{f,i}^2}{2} \quad (7)$$

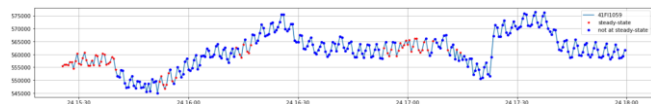
где

$$\delta_{f,i}^2 = \lambda (X_i - X_{i-1})^2 + (1 - \lambda) \delta_{f,i-1}^2$$

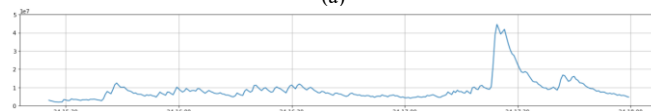
Отношение двух оценок дисперсий (6) к (7):

$$R_i = \frac{s_{1,i}^2}{s_{2,i}^2} = \frac{(2 - \lambda) \cdot v_{f,i}^2}{\delta_{f,i}^2}$$

Таким образом, используется две оценки дисперсии возмущений измеряемого параметра (рис. 2а). Первая характеризует дисперсию возмущений за последние несколько итераций и является более инерционной (рис. 2б). В то время, как вторая оценка характеризует дисперсию возмущений между двумя последними итерациями (рис. 2в).



(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 2. Оценка дисперсии возмущений. а) Измерения технологического параметра; б) первая оценка дисперсии возмущений; в) вторая оценка дисперсии возмущений; г) отношение оценок дисперсии возмущений

Первая оценка увеличивается, когда процесс на протяжении нескольких точек подряд монотонно возрастает или убывает. При колебаниях процесса вокруг некоего установившегося режима первая оценка уменьшается, приближаясь к значению второй оценки. В этом случае отношение двух оценок дисперсии возмущений приближается к единице (рис. 2г).

На рис. 3 приведены примеры идентификации стабильного режима с помощью рассматриваемого алгоритма. Красным цветом отмечены точки, которые алгоритм идентифицировал как стабильный режим, синим – нестабильный.

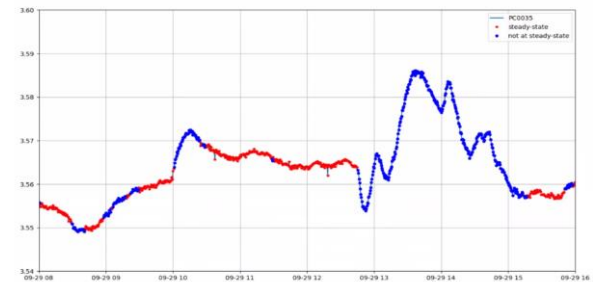
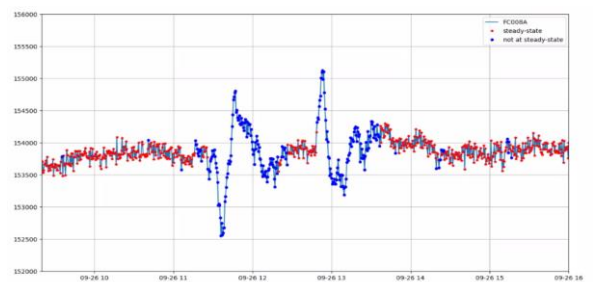


Рис. 3. Результаты работы алгоритма для различных технологических параметров

Алгоритм чувствителен к характеру изменения измеряемой величины и соответственно требует настройки. В зависимости от типа изменения исследуемого параметра изменяется граничное значение для R. В качестве алгоритма выбора значения для параметра R предлагается предварительно выделить 3 стабильных режима, выполнить расчет алгоритма и рассмотреть, как меняется R на этих отрезках. В качестве граничного значения предлагается использовать максимальное значение, которое достигается на стабильных участках.

С целью повышения точности работы алгоритма идентификации стабильного режима, было проведено исследование идентификации стабильных режимов при каскадном регулировании. Заранее известно, что в каскадном регуляторе внутренний контур зависит от внешнего. Была выдвинута гипотеза о том, что если применить алгоритм для параметров с высокой степенью взаимовлияния, то пересечение множеств идентифицированных стабильных режимов позволит фильтровать ложные срабатывания алгоритма. На рис. 4 приведены результаты работы алгоритма для внутренних и внешних контуров двух каскадных регуляторов.

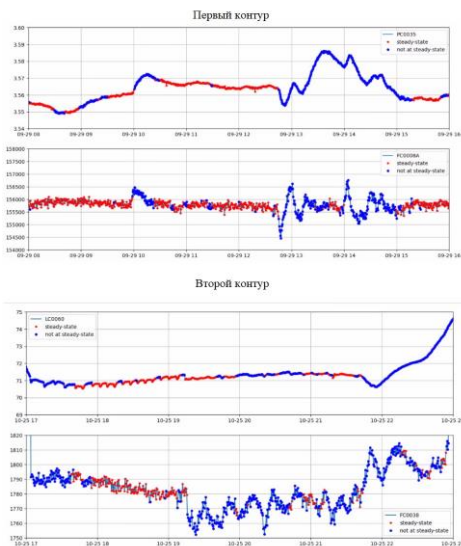


Рис. 4. Сравнение идентификации стабильных режимов контуров двух каскадных регуляторов

На рис. 5 приведен результат применения алгоритма с фильтрацией ложных срабатываний по двум параметрам с высокой степенью взаимовлияния. По результатам анализа графиков видно, что одновременное использование алгоритма для контуров с высоким взаимовлиянием позволяет частично фильтровать ложные срабатывания алгоритма.

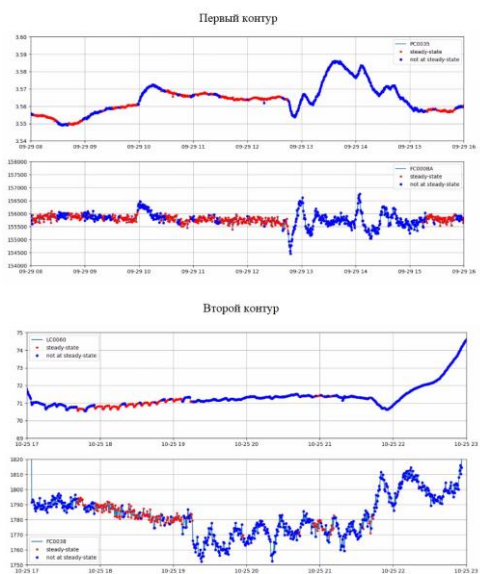


Рис. 5. Стабильный режим для одновременно двух контуров, входящих в каскадный регулятор

На рис. 6 приведены результаты сравнения работы стабильных режимов для двух регуляторов связанных гидравлически, но имеющих транспортное запаздывание. По результатам анализа идентификация стабильных режимов работы носит случайный характер и требует дополнительных исследований.

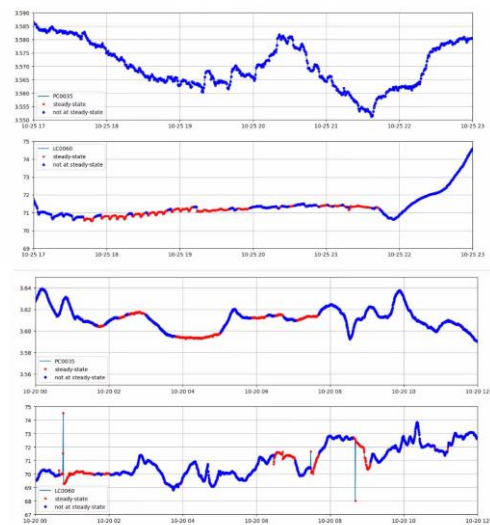


Рис. 6. Идентификация стабильных режимов у контуров связанных гидравлически, но имеющих транспортное запаздывание

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе применен метод контрольных карт для идентификации стабильного режима работы по данным из исторической БД РСУ. Предложен модифицированный алгоритм контрольных карт с экспоненциально взвешенным скользящим средним, позволяющий использовать метод в автоматическом режиме для идентификации стабильного режима. Проведена проверка работоспособности предложенного алгоритма и приведены примеры его применения.

IV. ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В дальнейших исследованиях перспективным является оценка транспортного запаздывания объекта управления с помощью алгоритма идентификации стабильного режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Адлер Ю.П., Жулинский С.Ф., Шпер В.Л. Проблемы применения методов статистического управления процессами на отечественных предприятиях // МЕТОДЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА. 2009. №8. С. 36-40.
- [2] Уилер Д. Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта: Справочное пособие / Уилер Д., Чамберс Д. М.: Альпина Паблшер, 2016. 409 с.
- [3] Хитоси К. Статистические методы повышения качества / К. Хитоси, И. Йосинори, Т. Такенори; под ред. К. Хитоси; пер. с англ. и доп. Ю.П. Адлера и Л.А. Конаревой. М.: Финансы и статистика, 1990. 304 с.
- [4] Balestracci D. Data Sanity: A Quantum Leap to Unprecedented Results. Medical Group Management Association, 2009. 304 с
- [5] Hahn G., Doganaksoy N. The role of statistics in business and industry. John Wiley & Sons, Inc., 2008. 344 с.
- [6] Page E.S. Continuous Inspection Schemes // Biometrics. 1954. №41(1). С. 100-115.
- [7] Roberts S.W. Control Chart Tests Based on Geometric Moving Averages // Technometrics. 1959. №42(1). Pp. 97-102.
- [8] Turner R. The Red Bead Experiment for Educators // Quality Progress. 1998. №6. С. 69-74.