

# Стабилизация состояния нестационарного технологического процесса на основе канальной стратегии управления\*

Мусаев А.А.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт,  
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
[amusaev@technolog.edu.ru](mailto:amusaev@technolog.edu.ru)

Григорьев Д.А.

Центр эконометрики и бизнес-аналитики,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
[d.a.grigoriev@spbu.ru](mailto:d.a.grigoriev@spbu.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрена задача стабилизации параметров нестационарного технологического процесса, описываемого моделью стохастического хаоса. В качестве базового варианта управления рассмотрены версии канальных стратегий, основанных на анализе отклонений значений контролируемого из области допустимых значений (канала). На основе численных экспериментов исследованы потенциальные возможности этих управляющих стратегий. Показано, что основной проблемой для стабилизации режима нестационарного процесса является крайне высокий уровень неустойчивости системной составляющей рядов наблюдений, представляющей собой реализацию стохастического хаоса. Приведены версии улучшенных канальных стратегий управления, указаны основные направления повышения эффективности функционирования канальных технологий стабилизации нестационарных процессов.

**Ключевые слова:** нестационарная среда, хаотические процессы, канальные стратегии, стохастический хаос, управляющие стратегии, численные исследования, динамическая устойчивость.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при изучении технологических процессов (ТП), связанных с неустойчивыми средами используется классический математический аппарат гидродинамики, восходящий к фундаментальным работам Лагранжа, Эйлера, Коши, Стокса и др., а также результаты исследований современных авторов, пытающихся адаптировать известные методы математической физики к многообразию прикладных задач в указанной предметной области [1-5]. Все традиционные методы основаны на тех или иных допущениях или упрощениях, позволяющих получить приближенные решения. При этом достаточно часто возникают ситуации существенного расхождения между теоретическими результатами и наблюдениями, формируемыми в процессе их экспериментальной проверки. Общей причиной таких несоответствий, как правило, является некорректность используемых упрощающих предположений и неустойчивость анализируемой динамической среды.

Последний фактор начал активно изучаться после появления первых работ по теории динамического хаоса. Данное направление восходит к работам А. Пуанкаре и Ж.

Адамара, однако наиболее активное развитие получила лишь с 60-х годов 20-го века, после опубликования работ Э. Лоренца, Б. Мандельброта, С. Смэйла и др. Изложение теории динамического хаоса можно найти в книгах [6-17].

Современный подход, учитывающий хаотическую неустойчивость гидродинамических сред и потоков с позиции теории бифуркаций и странных аттракторов [12-17], помог выяснить причину низкой практической эффективности традиционных моделей ТП с неустойчивыми средами погружения, однако достаточно далек до получения эффективных технологий прогнозирования и управления в динамическом хаосе.

В настоящей статье предложен альтернативный подход к изучению неустойчивых ТП, основанный не на априорных моделях, а на непосредственном изучении рядов реальных физических наблюдений, формируемых динамической системой мониторинга соответствующих процессов. В качестве базовой структуры, описывающей временные ряды наблюдений, используется аддитивная двухпараметрическая модель, системная составляющая которой представляет собой колебательный неперiodический процесс с множеством локальных трендов. Вторая компонента наблюдений представляет собой нестационарный случайный процесс, так что, в совокупности, данные процессы образуют реализацию стохастического хаоса. В рамках указанной модели рассмотрена задача анализа возможности стабилизации конкретной реализации ТП с учетом хаотической природы наблюдаемых процессов на основе так называемых канальных технологий управления.

## МОДЕЛЬ НАБЛЮДЕНИЙ

Важной особенностью рассмотренного в настоящей статье подхода к стабилизации ТП с неустойчивой средой погружения является моделирование рядов наблюдений, формируемых системой параметрического мониторинга ТП, на основе двухпараметрической аддитивной вычислительной схемы вида [18-20]

$$y_k = x_k + v_k, \quad k = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где  $x_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  представляет собой системную составляющую, образованную путем последовательного сглаживания временного ряда исходных наблюдений

\* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

$y_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  и используемую в процессе выработки управляющих решений, а  $v_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  — шумовую составляющую. С физической точки зрения наблюдения  $y_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  представляют собой последовательность отсчетов, формируемых системой мониторинга нестационарного ТП (скорость потока, его плотность, вариации давления и температуры и т.п.).

Традиционная для статистического анализа вычислительная схема исходит из предположения, что системная составляющая представляет собой неизвестный детерминированный процесс, а шумовая составляющая — стационарный случайный процесс с независимыми приращениями. В более общем случае, основанном на байесовской концепции статистического анализа данных [21], системная составляющая также рассматривается как случайный процесс, а для его идентификации используются различные вычислительные схемы последовательного оценивания условного среднего. В качестве примера байесовского подхода можно указать калмановскую модель фильтрации [22], в которой системная составляющая определяется линейаризованной моделью вида  $x_{k+1} = \Phi_{k+1/k}x_k + w_k$ ,  $k = 1, \dots, n$ , где  $\Phi_{k+1/k}$  - переходная матрица,  $w_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  – винеровский процесс.

Перечисленные традиционные модели теоретически позволяют построить классы управляющих стратегий, основанных на анализе трендов [23], каждая из которых оказывается эффективной лишь в узком диапазоне возможных динамических вариаций наблюдаемого процесса. Принципиально важными отличиями изучаемых рядов наблюдений являются следующие факты:

- системная компонента  $x_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  представляет собой колебательный непериодический процесс с множеством локальных трендов. Такое описание указывает на возможность интерпретации данного процесса, как реализации модели динамического хаоса [24]. Однако доказательство этого утверждения требует строгой формализации процедуры дискриминации детерминированных хаотических и нестационарных случайных процессов, что потребует дополнительных исследований;

- шумовая компонента  $v_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  представляет собой нестационарный случайный процесс, приближенно описываемый гауссовской моделью с изменяющимися параметрами. При этом, структура шумовой компоненты сама содержит локальные тренды, их корреляционные характеристики и спектральные характеристики существенно изменяются во времени [19-20].

Перечисленные особенности нарушают условия применимости традиционных статистических методов синтеза эффективных управляющих решений [25]. Более того, нарушение условия повторяемости опыта не позволяет получить каких-либо аналитических оценок эффективности прогностических решений и отвечающих им проактивных стратегий управления. По существу, основным методом анализа качества управления ТП в этом случае являются численные исследования, обеспечивающие оценку эффективности тех или иных алгоритмов управления на больших интервалах наблюдений. Варианты стабилизационного управления ТП, относящиеся к классу так называемых канальных стратегий, представлены в настоящей статье.

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ

Имеем ряд наблюдений за изменением параметров хаотического процесса, описываемый моделью (1). Для выделения системной составляющей используется любая технология последовательной фильтрации. В простейшем случае для этой цели используется экспоненциальный фильтр, определяемый соотношением [25]

$$x_k = \alpha y_k + (1 - \alpha) y_{k-1} = x_{k-1} + \alpha (y_k - x_{k-1}), \quad (2)$$

$$k = 2, \dots, n$$

с коэффициентом сглаживания  $\alpha$ , чаще всего лежащим в интервале значений [0.01, 0.3].

Область значений наблюдений, ограниченная диапазоном  $Y_k = x_k \pm B$ ,  $k = 1, \dots, n$  называется «каналом» и вариации наблюдений внутри канала  $|y_k - x_k| = |\delta y_k| \leq B$ ,  $k = 1, \dots, n$  интерпретируются как флуктуационные колебания, не содержащие явно выраженной системной тенденции. Ширина канала  $B$  может выбираться из различных соображений и обычно лежит в диапазоне  $(1 - 3) \cdot s_y$ , где  $s_y$  - оценка *среднеквадратического отклонения* (ско)  $\delta y_k$ ,  $k = 1, \dots, n$ . В общем случае выбор ширины канала является опцией, зависящей от особенностей управления ТП и, в некоторых случаях, вообще быть величиной переменной  $B_k = B_k(y_k)$ ,  $k = 1, \dots, n$ . Выход текущего значения наблюдений  $y_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  за пределы канала в некоторых стратегиях управления интерпретируется как возникновение тренда. В случае применения известной управляющей стратегии, основанной на экстраполяции тренда, обнаружение значимой тенденции приводит к рекомендации о необходимости стабилизации ТП по данному параметру.

Однако в силу хаотичности процесса тренд может оказаться ложным, т.е. процесс развернувшись вновь возвратиться в канал допустимых значений. В этом случае включение стабилизации будет носить негативный характер и может перевести к эффекту «переуправления». Таким образом, эффективность стабилизации параметров ТП будет определяться тем, насколько правильно осуществлен прогноз изменения  $x_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  в момент его обнаружения  $k_0$ . Поскольку правильный прогноз тренда дает наибольшее рассогласование между значением параметра  $y(k_0)$ , когда тренд был обнаружен, и моментом времени, когда он был подтвержден  $y(k_c)$ , то в качестве показателя эффективности прогнозирования и, как следствие, качества управления,  $u_j$ ,  $j = 1, \dots, M$ , определяемого этим прогнозом, можно использовать величину

$$R(S) = \sum_{j=1}^M |y_j(k_{open}) - y_j(k_{close})| = \max. \quad (3)$$

Приведенная упрощенная постановка анализа качества стабилизации нестационарного ТП позволяет очистить задачу от множества второстепенных деталей и сделать ее предельно понятной с точки зрения терминальной задачи формирования наилучшего проактивного управления при выборе исследуемого класса управляющих стратегий.

## Численные исследования

Пусть  $y_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  - наблюдаемый процесс за изменением стабилизируемого параметра нестационарного ТП с заданной длительностью  $n$ . Системная составляющая  $x_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  формируется экспоненциальным фильтром (2) с заданным коэффициентом сглаживания  $\alpha$ . Ширина канала определяется величиной  $B$ , значения которой

измеряются в физических единицах наблюдаемого параметра. Аналогично задаются уровни подтверждения тренда  $LC$  (level confirmation) и уровень признания решения ошибочным  $LF$  (level false). Значения параметров  $\alpha$ ,  $B$ ,  $LC$ ,  $LF$  являются опциями, их выбор зависит от статистических свойств  $y_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  и определяют результативность дальнейшего стабилизационного управления. Собственно проактивное управления состоит в решении об использовании механизма стабилизационного управления при выходе наблюдаемого ТП за верхнюю или нижнюю границу канала. Прогноз о выходе значения параметра за пределы канала допустимых величин определяется очевидными правилами  $y_k > x_k + B$  или  $y_k < x_k - B$ ,  $k = 1, \dots, n$ . Подтверждение правильности прогноза осуществляется на основе достижения процессом уровня подтверждения  $y_c > y_o + LC$  или  $y_c < y_o - LC$  (в зависимости от того, за какую границу канала, верхнюю или нижнюю, вышло текущее значение ТП). В случае, если тренд не подтвердился и процесс, развернувшись, вышел за пределы уровня признания ошибочного прогноза, то данное событие будет определяться соотношениями  $y_c > y_o - LF$  или  $y_c < y_o + LF$ .

Рассмотренный вариант канальной стратегии является базовым и легко допускает различные усовершенствования. В частности, естественно осуществить остановку процесса стабилизации в момент разворота тренда, когда знак разности  $x_k - x_{k-nW}$ ,  $k = 1, \dots, n$ , где  $nW$  - размер скользящего окна наблюдений, меняется на противоположный. Однако, исследования данной статьи ориентированы на анализ принципиальных особенностей канальных управляющих стратегий, и, как следствие, опускают различные осложнения.

Иллюстрация характеристик базовой версии программы анализа эффективности управления, основанного на канальной стратегии стабилизации ТП, приведена на примере конкретной реализации на рис. 1.

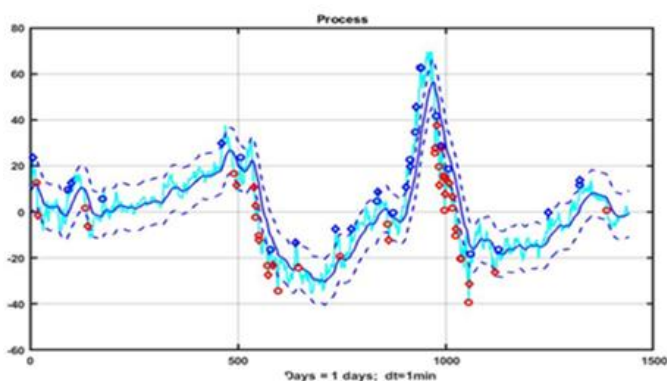


Рис. 1. Пример реализации анализа эффективности проактивного управления

Длительность интервала наблюдения в выбранном примере составляет 1 сутки (1440 минутных отсчетов). Системная составляющая  $x_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  формируется экспоненциальным фильтром (2) с  $\alpha = 0.05$ .

На графике синими ромбиками обозначены обнаружение тренда вверх, красными – вниз, а кружками соответствующих цветов – уровни принятия решения о качестве управления.

На рис. 2 приведен график изменения результативности управления (3) в процессе применения канальной стратегии в выбранном примере. Уровень ошибочных решений составил 93п. за сутки. Причины ошибочных решений очевидны: представленная технология прогнозирования может давать в среднем положительные результаты лишь на участках с сильным, явно выраженным трендом. На участках со слабовыраженными локальными тенденциями такая стратегия управления является не эффективной. Тем не менее, она допускает очевидные улучшения путем параметрической подгонки и введения дополнительных условий в алгоритм управления. Так, например, увеличение только одного параметра, ширины канала до  $B = \pm 18$ п. позволяет существенно повысить эффективность стратегии стабилизационного управления ТП на этом же участке наблюдения (см. рис. 3).

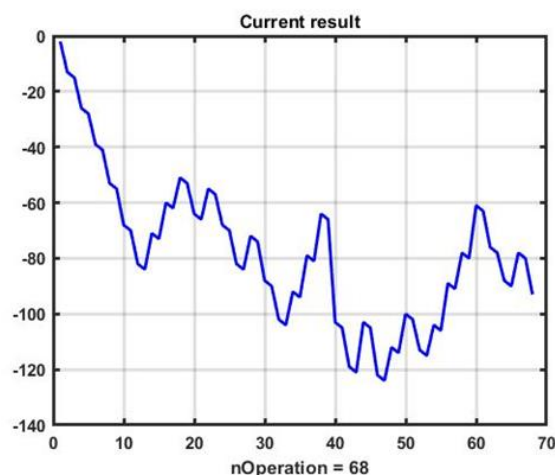


Рис. 2. Изменение результативности в процессе применения канальной стратегии в выбранном примере на рис. 1

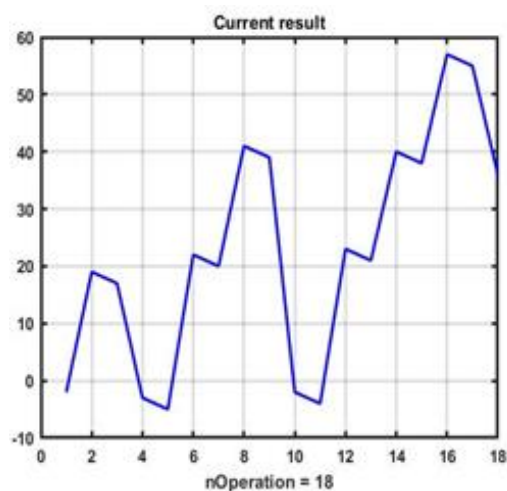


Рис. 3. Изменение результативности в процессе увеличения ширины канала до  $B = \pm 18$ п

Для оценки потенциального уровня эффективности управления первоначально использовалась технология полного перебора только для двух опциональных параметров в диапазонах:  $B=11:1:25$ ,  $LC=11:1:25$ . Для приведенных значений опций наилучший результат составил  $R=76п.$  при значениях опциональных параметров  $B=19$ ,  $LC=22$ .



Таким образом, можно сделать вывод, что результативность применения канальной стратегии управления, ориентированной на движение по направлению тренда, является неустойчивой. При этом параметрическая подгонка по ретроспективным данным на выбранном интервале наблюдения не гарантирует положительного результата на ближайшем последующем временном участке с теми же самыми наилучшими для предыдущего интервала параметрами. При использовании оптимальных для выбранного интервала наблюдения параметров управления на следующем временном интервале такой же длительности результат оказался отрицательным и составил величину  $R = -29п$ .

Рассмотрим типовые варианты совершенствования канальных управляющих стратегий. На рис. 4 представлены результаты управления, основанной на канальной стратегии движения по тренду, на интервале наблюдения длительностью трое суток с явно выраженными участками сильных трендов. При этом на основе априорной трехпараметрической оптимизации, полученной путём перебора значений опциональных параметров, установлены их наилучшие значения  $B^*=19$ ,  $LC^*=22$ ,  $LF^*=20$ , отвечающие экспоненциальному сглаживанию (2) с коэффициентом передачи  $\alpha = 0.05$ .

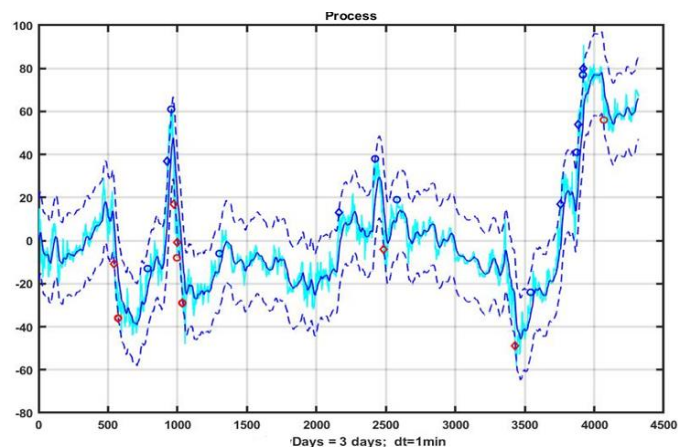


Рис. 4. Пример реализации канальной управляющей стратегии с тремя оптимизированными параметрами

Пример является выигрышным с  $R=32п$ , однако результат является неустойчивым и даже небольшие вариации структуры ряда наблюдений однозначно приводят к проигрышу. Без априорной оптимизации стратегия управления движения по тренду практически всегда приводит к негативному результату. Обоснование этого приведено в исследованиях инерционности хаотических процессов в работах [26-27].

Можно ли улучшить результат путем расширения вектора оптимизируемых параметров и применения различных значений для верхней и нижней границы канала? Для решения этого вопроса рассмотрим 5-ти параметрическую оптимизацию, включив в число варьируемых опций коэффициент сглаживания фильтра (2)  $\alpha$ , нижнюю и верхнюю границы канала  $B_{Dn}, B_{Up}$ , а также параметры остановки  $LC, LF$ . Установим диапазоны численного перебора выбранных параметров равными  $\alpha = 0.01:0.01:0.15$ ,  $B_{Dn}, B_{Up}=10:1:15$ ,  $LC, LF=10:1:15$ .

Для выбранного трехдневного участка наблюдений, рассмотренного в предыдущем примере, наилучший результат при использовании канальной стратегии составил  $R=166п$ . и отвечает набору параметров  $P^* = (\alpha, B_{Dn}, B_{Up}, LC, LF)^* = (0.1, 13, 16, 23, 16)$ . График реализации управляющей стратегии с указанными параметрами на выбранном интервале наблюдений приведен на рис. 5, а процесс изменения общего результата управления – на рис. 6.

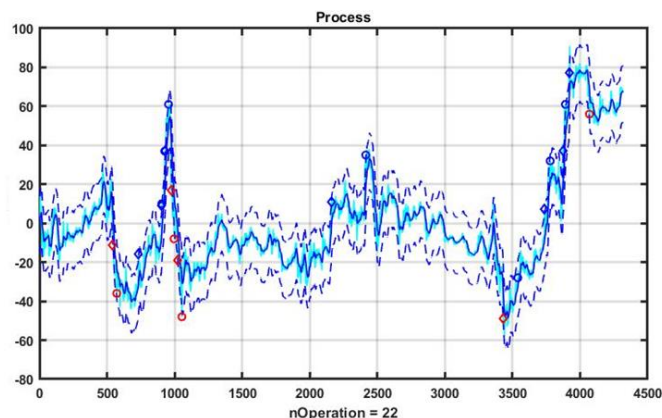


Рис. 5. Пример реализации канальной управляющей стратегии с пятью оптимизированными параметрами

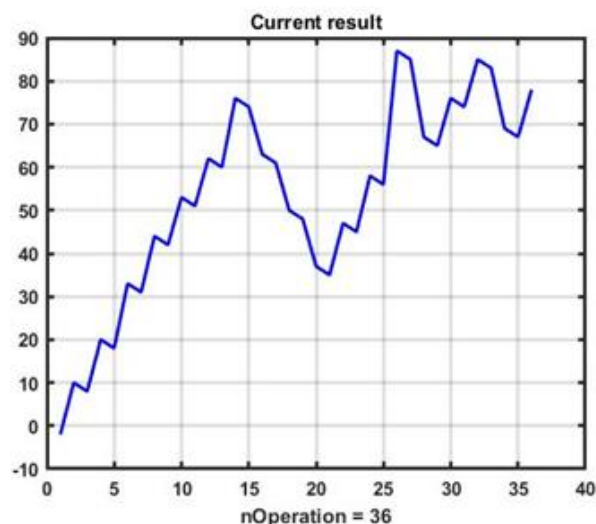


Рис. 6. Изменение результативности в процессе применения канальной стратегии в примере на рис. 5.

Численные эксперименты показывают, что функция эффективности (3) является неустойчивой, даже незначительные отклонения элементов вектора опциональных параметров  $\delta P$  от оптимума  $P^*$  приводит к резкому снижению результативности управления. Следует заметить, что технология оптимизации на основе полного перебора значений параметров связана с экспоненциальным ростом вычислений при увеличении числа параметров или требований к точности оценки оптимальных значений параметров (т.е. при уменьшении шага перебора). Этот хорошо известный факт может привести к серьезным проблемам при формировании адаптивных стратегий управления с последовательным оцениванием оптимальных значений параметров вектора  $P$ .

Другое важное замечание связано с асимметрией результативности управления, среди всех выбранных сочетаний только 26% дают положительный результат управления.

Попытки улучшить результативность применения данной стратегии за счет совершенствования процесса выделения системной компоненты, возможность которого была показана в предыдущем разделе, могут оказать лишь косвенное влияние, т.к. в процессе оптимизации этот эффект был компенсирован отдельным выбором границ  $B_{Dn}$ ,  $B_{Up}$  и коэффициента фильтрации  $\alpha$ .

Возможно, что более эффективная модернизация этой стратегии будет достигаться при динамическом регулировании верхней и нижней границ  $B_{Up}$ ,  $B_{Dn}$ , как функций от значения скорости изменения системной составляющей, оцененной на скользящем окне наблюдения  $B_{Up}$ ,  $B_{Dn} = F(x_k - x_{k-\tau})$ ,  $k = \tau + 1, \dots, n$ . Данный вопрос требует дополнительных исследований.

Повторная априорная оптимизация на этом же участке позволила получить результат всего лишь  $R=5n$ . с наилучшим вариантом опциональных параметров  $LC=12$ ,  $B=19$ .

Следует указать, что управление на основе канальных технологий имеет множество модификаций, каждая из которых имеет смысл для определенных типов наблюдаемого динамического процесса, однако ни одна из них не обладает запасом устойчивости, позволяющая получать положительный результат на всем многообразии процессов, генерируемых стохастическим хаосом.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Приведенные результаты численных исследований указывают скорее на теоретическую возможность канального управления конкретной реализацией хаотического процесса, образованного, в данном примере нестационарным изменением значения параметра ТП с нестабильной средой погружения. Проблема состоит в том, что хаотическая природа наблюдений не позволяет реализовать принцип повторяемости событий, лежащий в основе всей вероятностно-статистической парадигмы анализа данных. Данный факт наглядно проиллюстрирован в работах [26-27], в которых показано, что пролонгация реализаций процессов такого рода, даже при наличии сильного тренда на участке обнаружения, имеет 50%-ую вероятность дальнейшего движения вверх или вниз, причем отклонения от этого значения крайне незначительны.

Таким образом, практическая реализации канальных стратегий управления нестационарными процессами требует качественно иных подходов, позволяющих получить устойчивое решение в условиях стохастического хаоса. Традиционные подходы повышения такой устойчивости, основанные на принципах адаптации моделей, для хаотических процессов оказываются крайне неэффективными. Это связано с тем, что в условиях нестабильной среды погружения исследуемый процесс может изменяться так быстро и не прогнозируемо, что оперативное замыкание контура обратной связи становится весьма проблематичным.

В связи с этим более перспективным представляется подход на основе робастификации алгоритмов прогнозирования и управления, т.е. путем снижения чувствительности управляющих решений к изменению динамических и

статистических характеристик наблюдаемых процессов. Робастификация алгоритмов анализа данных и основанных на них управляющих решений основана на поиске наилучших вариантов для наименее благоприятных условий из заданного класса вариантов реализации исходных данных [28]. В первом приближении данный вопрос был рассмотрен в [23]. Данный подход требует численной проверки, и даже при подтверждении сделанного предположения представляет интерес использовать технологию робастификации в сочетании с другими методами повышения устойчивости проактивных управляющих стратегий. Несколько примитивным, но возможно действенным методом робастификации является использование параметров модели, полученных в процессе апостериорной оптимизации на очень больших участках наблюдения. В этом случае алгоритм управления будет учитывать самые различные варианты реализации хаотического процесса. Разумеется, такой подход для конкретной реализации может дать достаточно пессимистический результат, но на больших участках управления в среднем может оказаться выигрышным. Данное предположение требует дополнительных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Guo L. Anti-disturbance control for systems with multiple disturbances / L. Guo, S. Cao. – Crc Press, 2013. – 332 p.
2. Criminale W.O. Theory and computation in hydrodynamic stability / W.O. Criminale, T.L. Jackson, R.D. Joslin. – Cambridge University Press, 2018. – 564 p.
3. Холоднов В. А. и др. Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических процессов и систем в СПБГТИ (ТУ). Традиции и Инновации // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2016. – №9. – С. 121-124.
4. Chanson H. Applied hydrodynamics: an introduction to ideal and real fluid flows. – CRC press, 2009. – 448c.
5. Johnson R. W. (ed.). Handbook of fluid dynamics. – Crc Press, 2016. – 1580 p.
6. Perruquetti W. (ed.). Chaos in automatic control. – CRC Press, 2018. – 592 p.
7. Blokdyk G. Chaos. Theory a Complete Guide. 5STARCOoks Publ., 2021. – 302 p.
8. Blount K.A. Chaos Theory / K.A. Blount, L. Rush. – Entangled Crush Publ., 2021. – 302 p.
9. Davies B. Exploring Chaos: Theory and Experiment (Studies in Nonlinearity). – CRC Press., 2018. – 251 p.
10. Feldman D. Chaos and Dynamical Systems. – Princeton University Press., 2019. – 280 p.
12. Nyberg S.J. The Bayesian Way: Introductory Statistics for Economists and Engineers. – Wiley., 2018. – 512 p.
13. Rosenthal C. Chaos Engineering. System Resiliency in Practice / C. Rosenthal, N. Jones. – O'Reilly Publ., 2020. – 400 p.
14. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. – М.: Ком книга., 2007. – 328 с.
15. Skiadas C.H. Handbook of Applications of Chaos Theory / C.H. Skiadas, C. Skiadas. – Chapman and Hall/CRC, 2016. – 934 p.
16. Stetz A.W. Lectures on Nonlinear Mechanics and Chaos Theory. – WSPC, 2016. – 140 p.
17. Sundbye L. Discrete Dynamical Systems, Chaos Theory and Fractals. – CreateSpace Independent Publishing Platform, 2018. – 226 p.

18. Musaev A. Forecasting Multivariate Chaotic Processes with Precedent Analysis / A. Musaev, A. Makshanov, D. Grigoriev // *Computation*. – 2021. – Vol. 9, no. 10. – P. 110.

19. Мусаев А.А. Quod est veritas. Трансформация взглядов на системную составляющую наблюдаемого процесса // *Информатика и автоматизация*. – 2010. – №15. – С. 53-74.

20. Musaev A. Analyzing, modeling, and utilizing observation series correlation in capital markets / A. Musaev, D. Grigoriev // *Computation*. – 2021. – Т. 9, №8. – С. 88.

21. Курт У. Байесовская статистика. – СПб.: Питер, 2021. – 304 с.

22. Kendall M.G. The Advanced Theory of Statistics / M.G. Kendall, A. Stuart. – London: Charles Griffin & Co., Ltd., 1966. – 552 с.

23. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // *Journal of Basic Engineering*. – 1960. – №82(1). – С. 35-45.

24. Мусаев А.А. Численный анализ инерционности хаотических процессов // *Информатика и автоматизация*. – 2014. – Т.2, №33. – С. 48-59.

25. Musaev A. Numerical Studies of Statistical Management Decisions in Conditions of Stochastic Chaos / A. Musaev, D. Grigoriev // *Mathematics*. – 2022. – Т.10, №2. – С. 226.

26. Gardner Jr E. S. Exponential smoothing: The state of the art // *Journal of forecasting*. – 1985. – Т.4, №1. – С. 1-28.

27. Юсупов Р.М. Оценивание эффективности статистических методов прогнозирования в условиях динамического хаоса / Р.М. Юсупов, А.А. Мусаев, Д.А. Григорьев // IV Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2021): Сборник докладов. Санкт-Петербург. 21-23 сентября, 2021 г. – Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2021. – С. 223-226.

28. Мусаев А.А. Оценка инерционности хаотических процессов с учетом качественных характеристик локальных трендов // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. – 2014. – №25(51). – С. 83-87.

29. Huber P. J. Robust statistics. – John Wiley & Sons, 2004. – P. 523.

DOI: 10.24892/RIJIE/20220205

# Stabilization of the State of a Non-Stationary Technological Process Based on Channel Management Strategy

Musaev A.A.

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation  
of the Russian Academy of Sciences,  
Saint-Petersburg State Institute of Technology  
(Technical University)  
Saint-Petersburg, Russian Federation  
[amusaev@technolog.edu.ru](mailto:amusaev@technolog.edu.ru)

Grigoriev D.A.

Center of Econometrics and Business Analytics,  
St. Petersburg State University  
Saint-Petersburg, Russian Federation  
[d.a.grigoriev@spbu.ru](mailto:d.a.grigoriev@spbu.ru)

**Abstract.** The article considers the problem of stabilizing the parameters of a non-stationary technological process described by the stochastic chaos model. As a basic control variant, versions of channel strategies based on the analysis of deviations of controlled values from the range of acceptable values (channel) are considered. On the basis of numerical experiments, the potential possibilities of these control strategies are investigated. It is shown that the main problem for stabilizing the regime of a non-stationary process is the extremely high level of instability of the system

component of the observation series, which is the realization of stochastic chaos. Versions of improved channel control strategies are given, and the main directions for increasing the efficiency of the functioning of channel technologies for stabilizing non-stationary processes are indicated.

**Keywords:** non-stationary environment, chaotic processes, channel strategies, stochastic chaos, control strategies, numerical studies, dynamic stability

## Библиографическое описание статьи

Мусаев А.А. Стабилизация состояния нестационарного технологического процесса на основе канальной стратегии управления / А.А. Мусаев, Григорьев Д.А. // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2022. – Т.9, №2. – С. 28-33. DOI: 10.24892/RIJIE/20220205

## Reference to article

Musaev A.A., Grigoriev D.A. Stabilization of the state of a non-stationary technological process based on channel management strategy, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2022, vol.9, no.2, pp. 28-33. DOI: 10.24892/RIJIE/20220205