

УДК 519.86 : 656.073 : 338.3

UDC 519.86 : 656.073 : 338.3

5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы экономики (физико-математические науки, экономические науки)

5.2.2. Mathematical, statistical and instrumental methods of economics (physical and mathematical sciences, economic sciences)

АЛГОРИТМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ ЛОГИСТИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ

ALGORITHM OF A MATHEMATICAL MODEL FOR REGULATING CARGO FLOWS BASED ON LOGISTIC MAPPING

Стрельцова Елена Дмитриевна
доктор экономических наук, профессор кафедры
«Программное обеспечение вычислительной
техники»

Streltsova Elena Dmitrievna
Dr.Sci.Econ., Professor

SPIN – код автора:1033-3390

el_strel@mail.ru

*Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ) имени М.И.
Платова, г. Новочеркасск, Россия*

RSCI SPIN-code: 1033-3390

el_strel@mail.ru

*South-Russian State Polytechnic University (NPI)
named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russia*

Яковенко Ирина Владимировна
доктор экономических наук, доцент, профессор
кафедры «Прикладной экономики и экономической
безопасности»

Yakovenko Irina Vladimirovna
Dr.Sci.Econ., Professor

SPIN – код автора:1595-7974

iranyak@mail.ru

*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет, г. Белгород,
Россия*

RSCI SPIN-code: 1595-7974

iranyak@mail.ru

*Belgorod State National Research University,
Belgorod, Russia*

Колесникова Елена Валентиновна
аспирант кафедры «Прикладной экономики и
экономической безопасности»

Kolesnikova Elena Valentinovna
Postgraduate Student

SPIN – код автора:5970-6134

kolesnikova_e@bsuedu.ru

*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет, г. Белгород,
Россия*

RSCI SPIN-code: 5970-6134

kolesnikova_e@bsuedu.ru

*Belgorod State National Research University,
Belgorod, Russia*

Титов Александр Юрьевич
руководитель отдела информационной
безопасности

Titov Alexander Yurievich
Head of the Information Security Department

SPIN – код автора:6939-9736

titov_a@voice-company.ru

ООО «Радиус» г. Белгород, Россия

RSCI SPIN-code: 6939-9736

titov_a@voice-company.ru

Radius LLC, Belgorod, Russia

Статья посвящена моделированию зависимости времени простоя грузов на таможенной службе от интенсивности контроля на основе логистического отображения. Предложен алгоритм, включающий: масштабирование реальных параметров системы к

The article is devoted to modeling the dependence of cargo idle time at the customs service on the intensity of inspections based on the logistic map. An algorithm is proposed, which includes: scaling the real parameters of the system to the variables of the logistic

переменным логистического отображения, генерацию данных времени простоя и жёсткости контроля, классификацию режимов работы системы и визуализацию бифуркационной диаграммы Фейгенбаума. Создан программный продукт CUSTOMS, реализующий алгоритм анализа динамических режимов таможенной службы. Алгоритм позволяет устанавливать точные значения бифуркационных точек. Реализованный алгоритм может быть интегрирован в системы поддержки принятия решений при регулировании грузового потока

map, generating data on idle time and inspection rigidity, classifying the system's operational modes, and visualizing the Feigenbaum bifurcation diagram. The CUSTOMS software product has been created, implementing the algorithm for analyzing the dynamic modes of the customs service. The algorithm allows for establishing exact values of bifurcation points. The implemented algorithm can be integrated into decision support systems for regulating cargo flow

Ключевые слова: ТАМОЖЕННАЯ СЛУЖБА, НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА, ЛОГИСТИЧЕСКОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ, БИФУРКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Keywords: CUSTOMS SERVICE, NONLINEAR DYNAMICS, LOGISTIC MAP, BIFURCATION ANALYSIS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-215-049>

Введение

В условиях современной глобализированной экономики эффективность транспортно-логистических систем становится ключевым фактором конкурентоспособности предприятий, регионов и государства в целом. Рост объёмов и сложности грузопотоков, а также необходимость их оперативного и экономически эффективного регулирования требуют внедрения новых подходов к управлению. Динамические изменения рыночной конъюнктуры и усложнение логистических цепочек порождают потребность в разработке адаптивных и устойчивых алгоритмов, способных обеспечить оптимальное распределение ресурсов, снижение издержек и повышение надёжности перевозок. Возрастающая роль информационных технологий и математического моделирования в логистике дополнительно подчёркивает актуальность данного направления исследований. Следует отметить, что проблема оперативного управления сложными материальными потоками в условиях неопределённости и множественности критериев носит межотраслевой характер. Аналогичные методологические трудности, связанные с неадекватностью классических линейных моделей (таких как транспортная задача) для решения

многокритериальных задач управления, отмечаются, например, при организации уборочно-заготовительных кампаний в АПК [1]. Как и в сфере таможенного администрирования, здесь требуется учесть интересы множества участников, нелинейность процессов и динамически меняющиеся внешние условия, что обуславливает необходимость разработки более совершенного математического аппарата. В этом контексте математическое моделирование грузовых потоков позволяет не только описывать текущие процессы, но также прогнозировать их поведение, разрабатывать стратегии регулирования и оптимизации. Особое значение приобретает использование методов нелинейной динамики, в частности, аппарата логистического отображения — канонической модели для изучения перехода от порядка к хаосу через каскад бифуркаций [2]. Актуальность применения данного подхода к управлению сложными потоковыми системами, подобными таможенной службе, подтверждается исследованиями, в которых методы нелинейной динамики и синергетики успешно использовались для моделирования транспортных процессов и управления развитием логистической инфраструктуры [3, 4]. Эти методы позволяют учитывать нелинейные связи, сложные взаимодействия и динамическую природу транспортных систем. Предметная область логистического моделирования включает в себя разработку и применение различных математических моделей, которые помогают управлять потоками грузов с учётом интенсивности контроля. В рамках данных исследований особое внимание уделяется алгоритмам математической модели регулирования грузовых потоков в зависимости от жёсткости контроля, основанным на использовании логистического отображения. Такой подход обеспечивает гибкость и точность в управлении, что особенно важно в условиях высокой динамики и неопределённости транспортных процессов. Разработка и внедрение таких моделей способствует повышению эффективности логистических систем,

сокращению времени и затрат за счёт более конкурентоспособных и устойчивых транспортных решений. В конечном итоге, применение логистического отображения в моделировании грузовых потоков открывает новые перспективы для автоматизации и интеллектуализации логистических процессов, что является важным направлением развития современной транспортной отрасли.

Особое значение в современных логистических системах приобретает таможенная сложность – многоступенчатый и многоуровневый процесс оформления грузов при пересечении границ. Этот процесс существенно влияет на сроки, стоимость и надёжность перевозок. Эффективное управление таможенными процедурами и интеграция их в общую логистическую стратегию позволяет сокращать время прохождения грузов через границу, уменьшать издержки и минимизировать задержки, связанные с бюрократическими процедурами.

Актуальность рассматриваемой темы вызвала значительный интерес у учёных и специалистов в области моделирования и управления таможенными процессами. Исследования в этой области нашли широкое отражение в научных статьях. Анализ существующих работ позволяет выделить основные направления исследований, а также определить пробелы и перспективы дальнейшего развития методов моделирования процессов таможенной службы. Теоретическая база для алгоритмизации задач таможенного управления развита в работе [5]. Авторами представлено строгое математическое обоснование существования оптимальных решений в таможенном администрировании, разработан формальный аппарат для анализа управляемости таможенных процессов. Ранний этап развития риск-ориентированного подхода в таможенной деятельности продемонстрирован в работе [6]. Однако, авторами используются преимущественно качественные методы оценки.

Актуальные тренды цифровизации таможенной службы отражены в статье [7]. Но автор фокусируется на технологических аспектах, не затрагивая вопросы нелинейной динамики систем. Передовые методы моделирования экономических систем при решении сложных задач предложены в [8,9,10,11]. Авторами применён междисциплинарный синтез нечёткой логики и теории автоматов при математическом моделировании фискальных инноваций. Анализ современных научных публикаций подтвердили корректность исследований, изложенных в настоящей статье.

Целью данной статьи является создание алгоритма математической модели, воспроизводящей различные сценарии деятельности таможенной службы с учётом изменения времени простоя грузов в зависимости от интенсивности контроля, а также исследование факторов, оказывающих влияние на этот процесс.

Для достижения поставленной цели в статье решаются следующие задачи:

1. Разработать концептуальную модель таможенной службы. Рассмотреть её как сложную открытую, диссипативную, нелинейную и неравновесную динамическую систему, выявив специфические свойства и характер взаимодействия внутренних элементов и внешних факторов.
2. Обосновать применение аппарата нелинейной динамики и кибернетического подхода для описания и прогнозирования поведения таможенной системы, в частности, для моделирования управления грузовым потоком на основе модели «чёрного ящика».
3. Обосновать выбор логистического отображения в качестве математической основы модели. Задача включает содержательную интерпретацию (аналогия режимов работы таможни и динамических режимов отображения) и математическое обоснование (анализ свойств функции, соответствие нелинейному характеру системы).

4. Разработать алгоритм математической модели, устанавливающей зависимость времени простоя грузов от интенсивности таможенного контроля на основе логистического отображения.
5. Реализовать процедуру масштабирования параметров, обеспечивающую сопоставление реальных диапазонов изменения жёсткости контроля и времени простоя с параметрами логистического отображения (r и x_n).
6. Исследовать влияние факторов (в первую очередь, управляющего параметра — интенсивности/жёсткости контроля) на динамику времени простоя и выявить возможные режимы функционирования системы (стабильный, циклический, хаотический).

Концептуальная модель таможенной системы

В данном исследовании таможенная служба рассматривается как динамическая система, состояние которой постоянно меняется во времени, все процессы таможенного контроля взаимодействуют как друг с другом, так и с процедурами регулирования пропускной способностью грузов, а её поведение зависит как от внутренних процессов, так и от внешних условий. При этом меняется объём грузов, скорость прохождения таможенного оформления, уровень задержек. Коммуницируя между собой, изменение в любом элементе системы таможенной службы (таких как контролируемые процедуры, информационные потоки или ресурсы) вызывают последствия в других элементах. Внутренние процессы таможенной системы подвержены влиянию также и внешних факторов, таких как международные торговые соглашения, экономическая ситуация, технологические инновации.

При этом, таможенная служба в настоящей статье рассматривается как сложная открытая, диссипативная, нелинейная, неравновесная динамическая система. Рассмотрим эти качества. Её открытость обусловлена постоянным обменом с внешней средой через потоки энергии, вещества, информации. Вещественные потоки связаны с движением грузов

через границу, финансовые – с таможенными платежами и инвестициями, информационные – с обменом данными о товарах, нормативных изменениях и других документов. Внешние воздействия, такие как изменения законодательства, санкции, колебания рынков, также оказывают влияние на её функционирование и развитие.

Характеризуя состояние таможенной службы, следует подчеркнуть её важную особенность, состоящую в том, что в процессе своего функционирования в ней многие упорядоченные процессы переходят в класс неупорядоченных. Система рассеивает энергию, которая требует постоянной внешней подпитки, что подтверждает свойство диссипативности. Эти затраты включают ресурсы на проведение контроля (труд инспекторов, техника), а также издержки, связанные с бюрократическими процедурами. Кроме того, важную роль играет человеческий фактор, потери эффективности при передаче информации между подразделениями, необходимость постоянного финансирования для поддержания функционирования.

Нелинейность процессов, протекающих при функционировании таможенной службы, проявляется в отсутствии прямой пропорциональности между воздействием и откликом системы. В результате возникают пороговые эффекты, когда незначительное увеличение грузопотока может вызвать коллапс (эффект последней капли), а также эффект бабочки, когда локальная проблема на одном пункте пропуска вызывает цепную реакцию по всей системе. Кроме того, наблюдается нелинейная зависимость между жёсткостью контроля и временем простоя.

Неравновесность таможенной системы проявляется в её неспособности постоянно поддерживать стабильные условия функционирования в условиях изменяющихся нагрузок и внешних факторов, что ведёт к дисбалансам, временным отклонениям и колебаниям

в её работе даже при небольших воздействиях, снижая эффективность и повышая риск возникновения кризисных ситуаций.

Исходя из устоявшегося стандарта системного подхода, требующего учёта перечисленных особенностей, для адекватного описания и прогнозирования динамики таможенной системы необходимо применять методы нелинейной динамики, которые позволяют учитывать сложные взаимодействия, переходные режимы и появление новых устойчивых состояний, что обеспечивает более точное управление и повышение устойчивости системы в условиях постоянных изменений внешней среды. На основе системного подхода, который предполагает учёт указанных особенностей, для адекватного описания и прогнозирования динамики таможенной системы необходимо использовать методы нелинейной динамики. Эти методы позволяют учитывать сложные взаимодействия, переходные режимы и возникновение новых устойчивых состояний, что обеспечивает управление и повышает устойчивость в условиях постоянных изменений внешней среды.

В данном исследовании применяется кибернетический подход к математической модели управления деятельностью таможенной службы, ориентированный на регулирование грузового потока. В рамках этого подхода концептуальная модель управления деятельностью таможенной службой представлена в виде «чёрного ящика», что позволяет сосредоточиться на входных и выходных параметрах системы, а также на динамических связях между ними (рисунок 1).

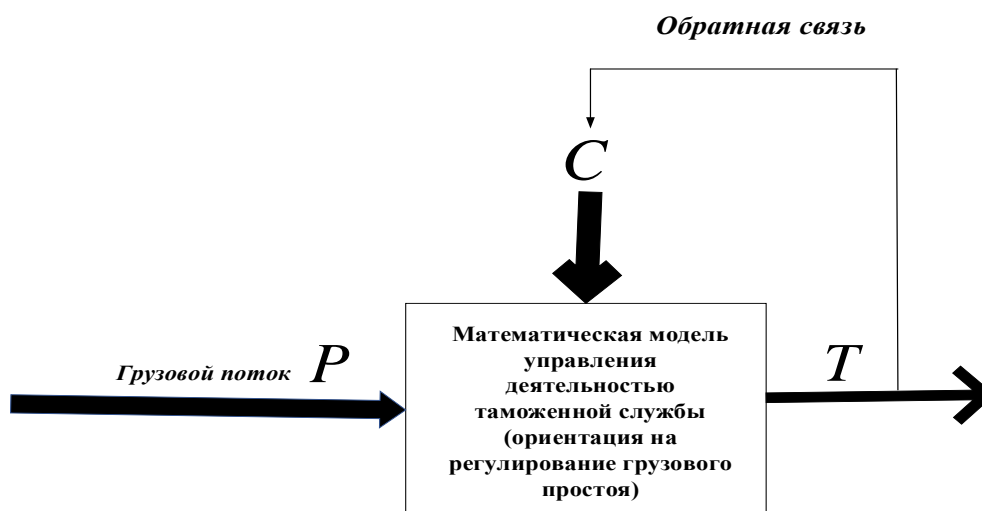


Рисунок 1 – Концептуальная модель управления деятельностью таможенной службы при ориентации на регулирование грузового простоя

В качестве входов и выходов концептуальной модели рассматриваются характеристики грузового потока P , проходящего через таможенную, и среднее время T простоя грузов. В роли входных управляющих переменных выступает интенсивность контроля C . Кибернетический подход к представлению концептуальной модели управления в виде «чёрного ящика» играет важную роль в моделировании, анализе и последующей оптимизации систем, где необходимо учитывать сложные взаимодействия между входами, управлением и результатами.

Такой подход позволяет сосредоточиться на функциональных связях и динамике системы без необходимости полного знания внутренней структуры, что значительно упрощает моделирование и управление. Использование входов-грузопотоков и выхода в виде среднего времени простоя грузов обеспечивает возможность оценки эффективности системы и своевременного реагирования на изменение внешних условий. Управляющие переменные, как контрольные воздействия, позволяют гибко регулировать процесс, обеспечивая оптимальное функционирование

системы. Этот подход обеспечивает высокую адаптивность, устойчивость и эффективность системы управления, а также позволяет выявлять ключевые зависимости и оптимальные стратегии регулирования в условиях неопределённости и сложности внешней среды.

Математический аппарат логистического отображения

Выбор логистического отображения для моделирования таможенных процессов базируется на содержательной и математической обоснованности. Содержательная интерпретация обоснованности обусловлена следующей аналогией, которую можно провести между поведением системы таможенной службы (в плане регулирования простоев грузов) и изменением режимов логистического отображения. В системе таможенного контроля, как и в логистическом отображении, существуют различные режимы, например, минимальные задержки при эффективной работе службы и значительные простои при возникновении бюрократических или технических препятствий. Эти режимы соответствуют стабильным состояниям системы, когда процессы происходят без существенных задержек, и переходам в другие состояния, вызванным увеличением нагрузки, изменением правил или внешних факторов, что ведёт к увеличению простоев. В стабильном режиме функционирования таможенной службы при относительно небольшой интенсивности контроля система выходит на предсказуемое значение эффективности. Несмотря на то, что в этом режиме пропускная способность грузов высока, возникают риски, связанные с нарушением законодательства. Таким образом, путём сравнения стабильного режима деятельности таможенной службы с равновесным режимом логистического отображения, можно сделать заключение о сходимости её состояния к фиксированной точке. С увеличением интенсивности контроля грузовых потоков на таможенной службе, происходит качественное изменение режимов в точках бифуркации и её состояние, как

динамической системы, начинает колебаться между периодами высокой и низкой эффективности. Аналогично логистическому отображению, это приводит к режимам удвоения периода, циклическим колебаниям. При очень высоких значениях интенсивности контроля эффективность пропуска становится непредсказуемой. Малые изменения в количестве поданных деклараций или их сложности приводят к резким скачкам времени простоя грузов. Система управляется хаотично (аналог хаотическому режиму логистического отображения) и предсказать эффективность на длительный срок невозможно.

Подобно тому, как изменение режима логистического отображения зависит от параметров системы и внешних условий, деятельность таможенной службы регулируется внутренними и внешними факторами, вызывающими переходы между различными режимами работы. Таким образом, динамику и регулирование простоев грузов можно интерпретировать как переходы системы между устойчивыми режимами, что отражает общие закономерности поведения динамических систем. Следовательно, выбор логистического отображения для моделирования изменения времени простоя грузов в зависимости от жёсткости таможенного контроля основан на его способности описывать сложные нелинейные динамические процессы, характерные для таможенной системы. Логистическое отображение является канонической моделью, демонстрирующей широкий спектр режимов поведения: от стабильных до хаотических. Эти режимы соответствуют наблюдаемым пороговым эффектам и качественным переходам в работе таможенного контроля при изменении уровня жёсткости. Кроме того, данная модель обеспечивает структурное подобие систем, наличие бифуркаций и возможность точного масштабирования параметров, что позволяет связать параметр контроля с динамическими режимами системы. Её простота, универсальность и аналитическая прозрачность делают логистическое отображение наиболее

подходящим инструментом для выявления и анализа ключевых нелинейных эффектов, таких как пороговые переходы и внезапные изменения времени простоя.

Математическая обоснованность выбора логистического отображения, задаваемого аналитическим выражением $x_{n+1} = r \cdot x_n \cdot (1 - x_n)$, заключается в его графическом изображении, как динамической параболы, что отражает нелинейную природу поведения системы. Форма и высота этой динамической параболы меняются при изменении параметра r . В процессе выбора логистического отображения в статье представлена характеристика его функциональной формы. Функция $f(x) = r \cdot x \cdot (1 - x) = rx - rx^2$ обладает квадратичной зависимостью, её график представляет собой параболу с направленными вниз ветвями. Функция $f(x)$ имеет следующие ключевые свойства:

- нули функции $f(0) = 0$; $f(1) = 0$;
 - вершина параболы x_{\max} определяется, исходя из производной
- $$f'(x) = r - rx = 0 ; x_{\max} = 0.5 ; f(x_{\max}) = \frac{r}{4}$$
- функция $f(x)$ вогнута: $f''(x) = -2r < 0$ при $r > 0$.

Напомним, что в проведённом моделировании жёсткость таможенного контроля C напрямую связана с управляющим параметром r , а время задержки грузов T – с состоянием логистического отображения x_n . В этой интерпретации масштабированные значения времени задержки в текущий момент n обозначены x_n , а обновлённое значение этого параметра в момент $n+1$ – x_{n+1} . В таможенной системе время задержки T_{n+1} в последующий момент времени, обозначенное как x_{n+1} , зависит от предыдущего времени T_n (x_n) нелинейным образом. Это означает, что увеличение задержки в один момент может вызвать значительные

изменениям в будущем. Такие изменения могут проявляться как плавные, так и хаотичные, что подтверждает оправданность использования логистического отображения для моделирования данного процесса.

Анализируя связь времени простоя T_n с уровнем жёсткости контроля C , а также связь параметров x_n и r в логистическом отображении, можно сделать вывод: увеличение r (то есть повышение жёсткости C контроля) способствует увеличению скорости $f'(x) = r - 2rx$ изменения x_n (времени задержки T_n). В определённый момент, при критическом r , задержки могут стать очень большими и хаотичными. Увеличение r (жёсткости контроля C) ведёт к росту максимальных задержек и, следовательно, к более сложной динамике поведения грузов: от стабильных до хаотических режимов. В конечном итоге математическое обоснование выбора логистической функции обусловлено следующими свойствами:

- простотой при одновременной способности моделировать сложные динамические процессы;
- наличием чёткого критического значения параметра r ;
- отражением в максимуме $r/4$ параболы максимальной задержки, что характеризует жёсткость контроля.

Таким образом, использование логистического отображения оправдано его способностью моделировать сложные нелинейные зависимости и переходы в динамике системы. Это делает его ценным инструментом для анализа поведения таможенной системы при различных уровнях контроля.

Как указывалось ранее, в решаемой задаче моделирования таможенных процессов регулирования простоев грузов управляющий параметр r логистического отображения связывается с жёсткостью контроля (индекс жёсткости) C , переменная состояния x_n — с временем

простоя T . В качестве исходных данных рассматриваются два временных ряда:

– $T = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ – время простоя грузов;

– $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ – жёсткость контроля.

Если отображать значения $t_i \in T$ и $c_i \in C$ на параметры логистического отображения $x_{n+1} = r \cdot x_n \cdot (1 - x_n)$, то следует учесть, что управляющая переменная r и переменная состояния x_n изменяются в других диапазонах: $r \in [r_{\min}, r_{\max}] = [2.5, 4]$, $x_n \in [0, 1]$.

Алгоритм моделирования и масштабирования

В этом разделе статьи излагаются результаты построения алгоритма математической модели $T = f(C)$, отображающей зависимость времени T простоя грузов, изменяющегося в пределах $T \in [T_{\min}, T_{\max}] = [2, 48]$, от интенсивности контроля C , варьирующего в рамках $C \in [C_{\min}, C_{\max}] = [0.1 - 0.9]$. При этом в алгоритме величины C и T генерируются по равномерному закону распределения. Алгоритм предполагает для моделирования преобразования вход-выход использование логистического отображения $x_{n+1} = r \cdot x_n \cdot (1 - x_n)$ где x_n – переменная, представляющая состояние системы в момент n , $x_n \in [0, 1]$; r – параметр, управляющий поведением системы, $r \in [0, 4]$.

В задаче моделирования для сопоставления реальных значений жёсткости контроля $c_i \in C$ с значениями управляющего параметра $r_i \in [r_{\min}, r_{\max}] = [2.5, 4]$ и реальных значений времени простоя $t_i \in T$ с значениями состояния $x_n \in [0, 1]$ логистического отображения проведено линейное масштабирование по формулам, представленным при описании блоков алгоритма. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 2.

Первый блок (блок 1) алгоритма выполняет инициализацию следующих параметров модели:

- диапазона времени простоя $T \in [T_{\min}, T_{\max}] = [2, 48]$;
- индекса жёсткости контроля $C \in [C_{\min}, C_{\max}] = [0.1 - 0.9]$;
- параметров логистического отображения $r \in [r_{\min}, r_{\max}] = [2.5, 4]$,
 $x_n \in [0, 1]$.

Во-втором блоке (блок 2) иницируются такие параметры вычислений, как количество точек $N = 2000$ по управляющему параметру r логистического отображения, количеству $M = 800$ транзиентных операций, количеству $L = 200$ итераций аттрактора.

Третий блок (блок 3) выполняет функцию генерации возможных значений жёсткости контроля $C \in \text{random}[C_{\min}, C_{\max}]$ и времени простоя грузов $T \in \text{random}[T_{\min}, T_{\max}]$ по равномерному закону распределения вероятностей.

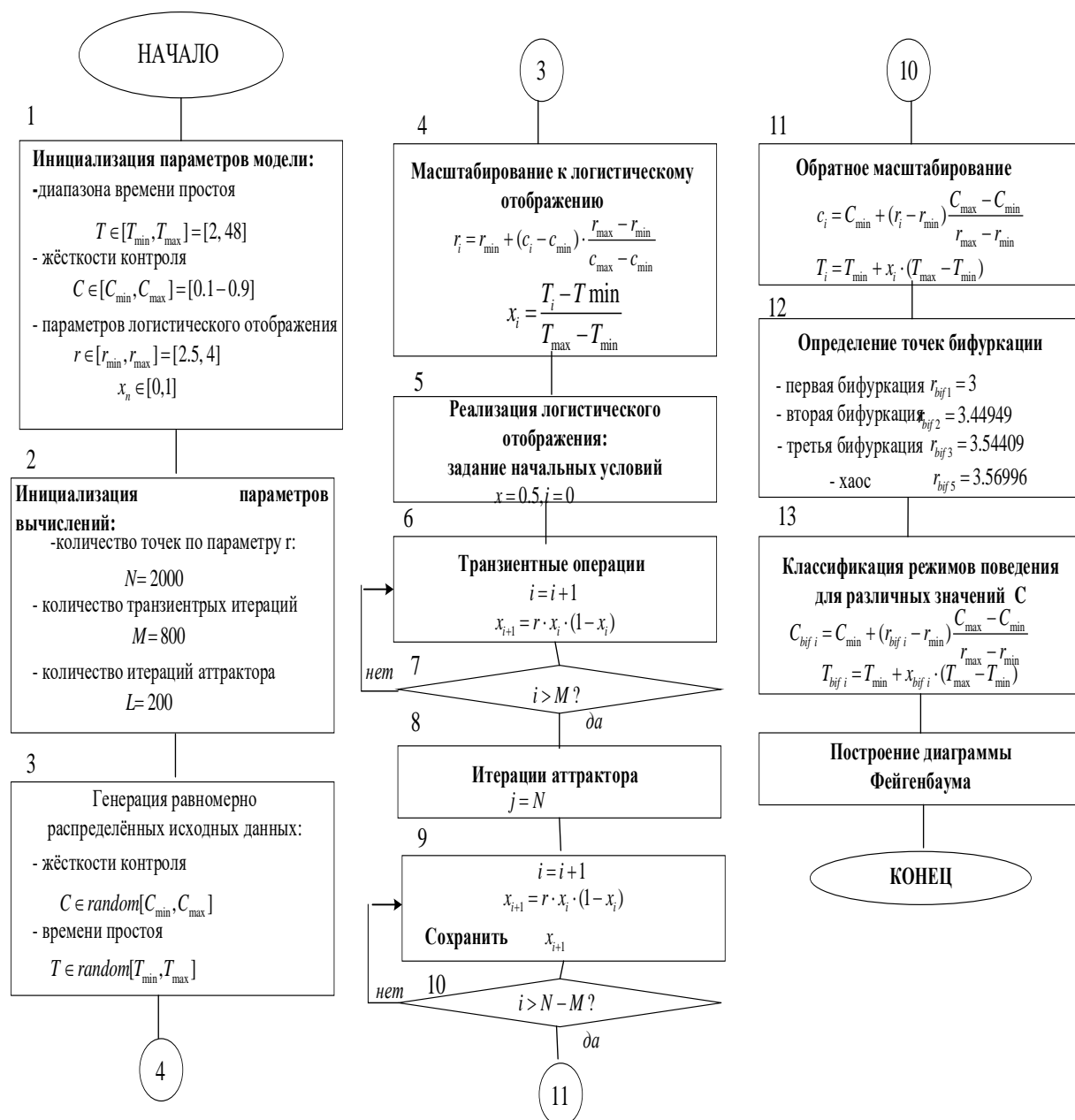


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма исследования режимов таможенной службы в аспекте регулирования грузопотоков

Пределы изменения $C \in [0, 0.9]$ определялись экспертами, обладающими знаниями о текущей и предлагаемой системе контроля на таможне. Эти оценки основаны на их профессиональном опыте, знаниях о нормативных требованиях, уровне автоматизации, а также о практике работы системы. Пределы изменения времени простоя $T \in [2, 48]$ часов взяты из реальных наблюдений. Эти диапазоны отражают предполагаемые

минимальные и максимальные уровни контроля и задержек, что позволяет моделировать широкий спектр сценариев функционирования системы. Такой подход обеспечивает предварительный анализ системы и подготовку к дальнейшей калибровке при наличии фактических данных. В ситуации отсутствия эмпирических данных о конкретных значениях уровня жёсткости контроля C и времени задержки T стояла задача выбора метода, позволяющего моделировать возможные сценарии работы системы. В отсутствие информации о том, как именно распределяются C и T в реальности, предполагается, что все возможные значения в заданных диапазонах равновероятны. Это нейтральный подход, который не вводит дополнительных предположений о вероятностной структуре. Генерация по вероятностному закону – это стандартный подход в моделировании при отсутствии точных данных, позволяющий обеспечить вариативность сценариев. Генерация по равномерному закону гарантирует, что все значения внутри диапазона имеют одинаковую вероятность, что позволяет моделировать любые потенциальные сценарии – от минимальных до максимальных уровней жёсткости задержек. Такой метод позволяет протестировать систему в различных условиях, что важно при предварительном анализе и планировании. После сбора эмпирических данных распределение параметров можно уточнить, а текущие результаты использовать как базовые сценарии.

Следующий блок (блок 4) производит масштабирование сгенерированных значений жёсткости контроля c_i и времени простоя грузов T_i к параметрам логистического отображения:

$$r_i = r_{\min} + (c_i - c_{\min}) \cdot \frac{r_{\max} - r_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}}; \quad x_i = \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}.$$

Далее в соответствии с алгоритмом осуществляется реализация значений состояний логистического отображения $x_{i+1} = r \cdot x_i \cdot (1 - x_i)$. Работа

этой части алгоритма начинается с произвольного начального условия $x_0 = 0.5$ (блок 5). Блоки 6 и 7 выполняют транзистные операции в виде последовательности $x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow \dots \rightarrow x_M$, где M – количество транзистных операций.

Блоки 7,8,9,10 реализуют итерации аттрактора. Следующий блок (блок 11) реализует переход от нормированных значений индекса жёсткости контроля r_i и времени простоя грузов T_i к их реальным значениям:

$$c_i = C_{\min} + (r_i - r_{\min}) \frac{C_{\max} - C_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}}$$

$$T_i = T_{\min} + x_i \cdot (T_{\max} - T_{\min}).$$

Далее (блок 11) фиксируются основные точки бифуркаций – критические значения параметра управления r_{bif} , при которых происходят качественные изменения режимов функционирования таможенной системы, как динамической системы:

- первая бифуркация $r_{bif1} = 3$;
- вторая бифуркация $r_{bif2} = 3.44949$;
- третья бифуркация $r_{bif3} = 3.54409$;
- точка Фейгенбаума (хаос) $r_{bif5} = 3.56996$.

Блок 12 определяет точки бифуркаций C_{bif_i} для значений жёсткости контроля и времени T_{bif_i} простоя в реальных единицах:

$$C_{bif\ i} = C_{\min} + (r_{bif\ i} - r_{\min}) \frac{C_{\max} - C_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}};$$

$$T_{bif\ i} = T_{\min} + x_{bif\ i} \cdot (T_{\max} - T_{\min}).$$

По определённым в соответствии с блок-схемой параметрам строится диаграмма Фейгенбаума. На базе разработанной блок-схемы математической модели $T = f(C)$ создан программный продукт

CUSTOMS, предназначенный для проведения комплексных экспериментов. Этот инструмент позволяет исследовать влияние вариаций значения индекса жёсткости контроля на поведение системы, обеспечивая гибкость и точность анализа в процессе моделирования и оптимизации грузовых потоков. Это делает построенную модель не просто математической абстракцией, а мощным инструментом для принятия обоснованных управленческих решений в условиях нелинейности и неопределённости.

Результаты и их обсуждение

В соответствии с предложенной на рисунке 1 блок-схемой алгоритма разработано программное средство CUSTOMS, позволяющая проводить анализ зависимости времени простоя грузов от жёсткости их таможенного контроля. Для наглядной демонстрации зависимости $T = f(C)$ программа CUSTOMS в соответствии с блок-схемой алгоритма, приведённой на рисунке 2, строит диаграмму Фейгенбаума (рисунок 3).

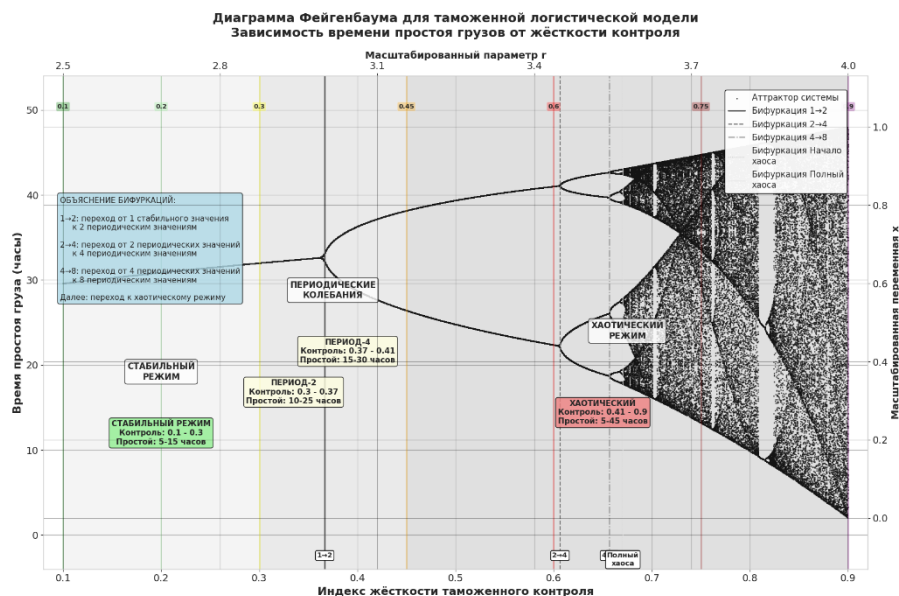


Рисунок 3 – Диаграмма Фейгенбаума, демонстрирующая зависимость

$$T = f(C)$$

На диаграмме Фейгенбаума бифуркация $1 \rightarrow 2$ обозначает переход от стабильного значения к двум периодическим значениям, затем $2 \rightarrow 4$ – от

двух периодических значений к четырём периодическим значениям, далее $4 \rightarrow 8$ – от четырёх периодических значений к восьми периодическим значениям, хаос свидетельствует о переходе от периодического поведения к хаотическому состоянию.

Программный продукт CUSTOMS в результате своего функционирования определяет диапазон режимов таможенной службы в реальных единицах:

- стабильный режим: $C \in [0.1 - 0.367]$;
- период-2: $C \in [0.367 - 0.606]$;
- период-4: $C \in [0.606 - 0.657]$;
- хаос: $C \in [0.671 - 0.9]$.

Состояние «хаос» в таможенной службе отражает неспособность или значительные трудности в применении систематизированных, предсказуемых и управляемых процедур из-за недостатка ресурсов, коррупции, несовершенства нормативной базы или технических проблем. В результате процессы становятся нестабильными и непредсказуемыми, что ведёт к увеличению издержек, снижению эффективности и ухудшению доверия участников внешнеэкономической деятельности к системе. Такое состояние способствует росту транзакционных издержек, увеличивает время прохождения грузов через границу, создаёт условия для неправомερных действий и коррупции. В экономическом контексте хаос снижает эффективность использования ресурсов, препятствует развитию международной торговли, увеличивает стоимость товаров и услуг, а также подрывает доверие к таможенной системе. В итоге, экономическая активность замедляется, инвестиционный климат ухудшается, и это негативно сказывается на общем уровне экономического развития страны.

Построенный алгоритм и реализованный на его основе программный продукт CUSTOMS подтверждают эффективность использования методов нелинейной динамики и теории хаоса для анализа поведения системы таможенной службы. Это позволяет выявлять сложные динамические режимы, такие как чувствительность к начальным условиям и наличие предельных циклов, что, в свою очередь, способствует более глубокому пониманию процессов и повышению эффективности управления таможенной системой.

Заключение и перспективы дальнейших исследований

Разработанный алгоритм регулирования простоев грузов на основе математической конструкции «логистическое отображение» демонстрирует свою эффективность в оптимизации процессов таможенной службы. Благодаря использованию нелинейных динамических моделей данный подход позволяет своевременно выявлять и предотвращать возможные сбои, повышая стабильность и надёжность системы. Внедрение данного алгоритма способствует улучшению планирования и повышению общей эффективности логистических операций. Перспективы дальнейших исследований включают адаптацию метода к более сложным системам и интеграцию с современными информационно-коммуникационными технологиями для повышения оперативности управления грузовыми потоками. Следующим этапом станет калибровка и валидация модели на реальных эмпирических данных о работе таможенных органов.

Литература

1. Бакурадзе Л. А. Математические модели, инструментарий и методики совершенствования оперативного управления уборочно-заготовительными кампаниями в АПК // Научный журнал КубГАУ. – 2010. – № 58(04). – С. 1-5.
2. Мэй, Р. Простые математические модели с очень сложной динамикой. Nature 261, 459–467 (1976). <https://doi.org/10.1038/261459a0>
3. Агуреев Игорь Евгеньевич, Гладышев Александр Владимирович Развитие синергетических методов в исследованиях транспортных систем // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – №6. – С. 139-161

4. Кузнецов А. Л., Галин А. В., Кириченко А. В. Синергетика как методологическая основа развития базовой инфраструктуры портоориентированной логистики // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2016. – №6 (40). – С. 19-34
5. Тахиров Ж. О., Абдурахмонов Т. Т., Саидов А. А. Теорема существования решения задачи оптимального управления процессом таможенного оформления // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2025. – Т. 51. – №. 2. – С. 73-84.
6. Бреева М. М. Моделирование процесса внедрения системы управления рисками в процесс таможенного контроля на примере товаров, содержащих объекты интеллектуальной собственности // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. – 2006. – №. 4. – С. 326-332.
7. Валиев Ф. Н. Модель реализации бизнес-процессов сквозного таможенного контроля ввозимых товаров в условиях цифровой прослеживаемости // Экономика, предпринимательство и право. – 2024. – Т. 14. – №. 10. – С. 5849-5866.
8. Дмитриева О. А. Модель деятельности таможенно-логистических терминалов при предоставлении таможенных услуг // Вестник университета. – 2013. – №. 6. – С. 33-36.
9. Abbasov A, Streltsova E, Borodin A, et al. (2022) Mathematical modeling of fiscal innovations based on the interdisciplinary synthesis of fuzzy logic and automata theory. *Azerbaijan J Math* 12: 2–29.
10. Streltsova E, Borodin A, Yakovenko I (2022) Fuzzy-logic model for feasibility study of project implementation: Project's investment risk. *Iranian J Fuzzy Syst* 19: 1–15. <https://doi.org/10.22111/IJFS.2022.6784>
11. Alex Borodin, Elena Streltsova, Zahid Mamedov, Irina Yakovenko, Irina Mityshina and Artem Streltsov Fuzzy-Logical model for analysis of sustainable development of fuel and energy complex enterprises. *AIMS Energy*, 2023, 11(5), страницы 974–990

References

1. Bakuradze L. A. Matematicheskie modeli, instrumentarij i metodiki sovershenstvovaniya operativnogo upravlenija uborochno-zagotovitel'nymi kampanijami v APK // Nauchnyj zhurnal KubGAU. – 2010. – № 58(04). – S. 1-5.
2. Mjej, R. Prostye matematicheskie modeli s ochen' slozhnoj dinamikoj. *Nature* 261, 459–467 (1976). <https://doi.org/10.1038/261459a0>
3. Agureev Igor' Evgen'evich, Gladyshev Aleksandr Vladimirovich Razvitie sinergeticheskikh metodov v issledovaniyah transportnyh sistem // Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki. – 2014. – №6. – S. 139-161
4. Kuznecov A. L., Galin A. V., Kirichenko A. V. Sinergetika kak metodologicheskaja osnova razvitija bazovoj infrastruktury portoorientirovannoj logistiki // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. – 2016. – №6 (40). – S. 19-34
5.).Tahirov Zh. O., Abdurahmonov T. T., Saidov A. A. Teorema sushhestvovaniya reshenija zadachi optimal'nogo upravlenija processom tamozhennogo oformlenija // Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki. – 2025. – Т. 51. – №. 2. – S. 73-84.
6. Breeva M. M. Modelirovanie processa vnedrenija sistemy upravlenija riskami v process tamozhennogo kontrolja na primere tovarov, soderzhashhih ob#ekty intellektual'noj sobstvennosti // Vestnik Tambovskogo universiteta. Serija: Gumanitarnye nauki. – 2006. – №. 4. – S. 326-332.

7. Valiev F. N. Model' realizacii biznes-processov skvoznogo tamozhennogo kontrolja vvozimyh tovarov v uslovijah cifrovoj proslezhivaemosti //Jekonomika, predprinimatel'stvo i pravo. – 2024. – T. 14. – №. 10. – S. 5849-5866.

8. Dmitrieva O. A. Model' dejatel'nosti tamozhenno-logisticheskikh terminalov pri predostavlenii tamozhennyh uslug //Vestnik universiteta. – 2013. – №. 6. – S. 33-36.

9. Abbasov A, Streltsova E, Borodin A, et al. (2022) Mathematical modeling of fiscal innovations based on the interdisciplinary synthesis of fuzzy logic and automata theory. Azerbaijan J Math 12: 2–29.

10. Streltsova E, Borodin A, Yakovenko I (2022) Fuzzy-logic model for feasibility study of project implementation: Project's investment risk. Iranian J Fuzzy Syst 19: 1–15. <https://doi.org/10.22111/IJFS.2022.6784>

11. Alex Borodin, Elena Streltsova, Zahid Mamedov, Irina Yakovenko, Irina Mityshina and Artem Streltsov Fuzzy-Logical model for analysis of sustainable development of fuel and energy complex enterprises. AIMS Energy, 2023, 11(5), stranicy 974–990