

УДК 656.2 + 06

## Исследование многоуровневых моделей управления вагонопотоками в адрес припортовых станций с применением теории дифференциальных уравнений

**Е. А. Чеботарева**

Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

**Для цитирования:** Чеботарева Е. А. Исследование многоуровневых моделей управления вагонопотоками в адрес припортовых станций с применением теории дифференциальных уравнений // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 3. С. 60–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-60-72

### Аннотация

**Цель:** рассмотреть вопрос устойчивости многоуровневых систем управления вагонопотоками в адрес припортовых железнодорожных станций в условиях интеллектуализации процессов управления перевозками. Оценить влияние трехуровневой и двухуровневой систем управления эксплуатационной работой припортовых дорог на качество планирования подвода поездов в адрес припортовых станций при различных режимах эксплуатационной работы железных дорог. Определить условия устойчивости системы управления вагонопотоками путем построения и изучения соответствующих жестких и мягких математических моделей, описываемых автономными системами обыкновенных линейных дифференциальных уравнений. **Методы:** в данном исследовании применяются методы теории устойчивости решений дифференциальных уравнений, а также теории управления и динамических систем. В наглядном представлении применяется фазовое пространство, выполняется качественный и количественный анализ поведения в нем фазовых траекторий, отвечающих невозмущенному и возмущенным решениям систем дифференциальных уравнений, описывающих построенные модели систем управления. **Результаты:** дано сравнение характеристик многоступенчатых систем управления вагонопотоками. Предложено исследование устойчивости многоуровневых моделей управления вагонопотоками в условиях интеллектуализации функций управления. В среде системы аналитических вычислений найдены и изучены условия асимптотической устойчивости во времени двухуровневой системы управления вагонопотоками. **Практическая значимость:** полученные путем вычислительного эксперимента результаты позволяют оценивать устойчивость функционирования припортовых транспортно-технологических систем в условиях изменения организации производства и интеллектуализации процессов управления перевозками. Системы компьютерной математики дают возможность реализовывать эвристическую составляющую исследований и получать теоретически обоснованные и наглядные решения задач оптимизации режимов управления грузо- и вагонопотоками.

**Ключевые слова:** транспортные системы, железнодорожный транспорт, припортовые станции, организация транспортного производства, устойчивость систем управления, дифференциальные уравнения, системы компьютерной математики

### Введение

Быстро меняющиеся условия работы транспортной отрасли, в том числе в связи с геополитическими факторами, развитием новых транспортных коридоров, изменением специфики работы припортовых железных дорог, актуализируют задачу поиска решений по совершенствованию системы управления и технологий

транспортного производства, обеспечивающих адаптацию к изменяющимся условиям функционирования припортовых транспортно-технологических систем. Необходимость развития инструментов управления перевозками в направлении портов обусловлена тем, что в железнодорожно-морском сообщении доставляется больший объем грузов, чем остальными видами транспорта (рис. 1).

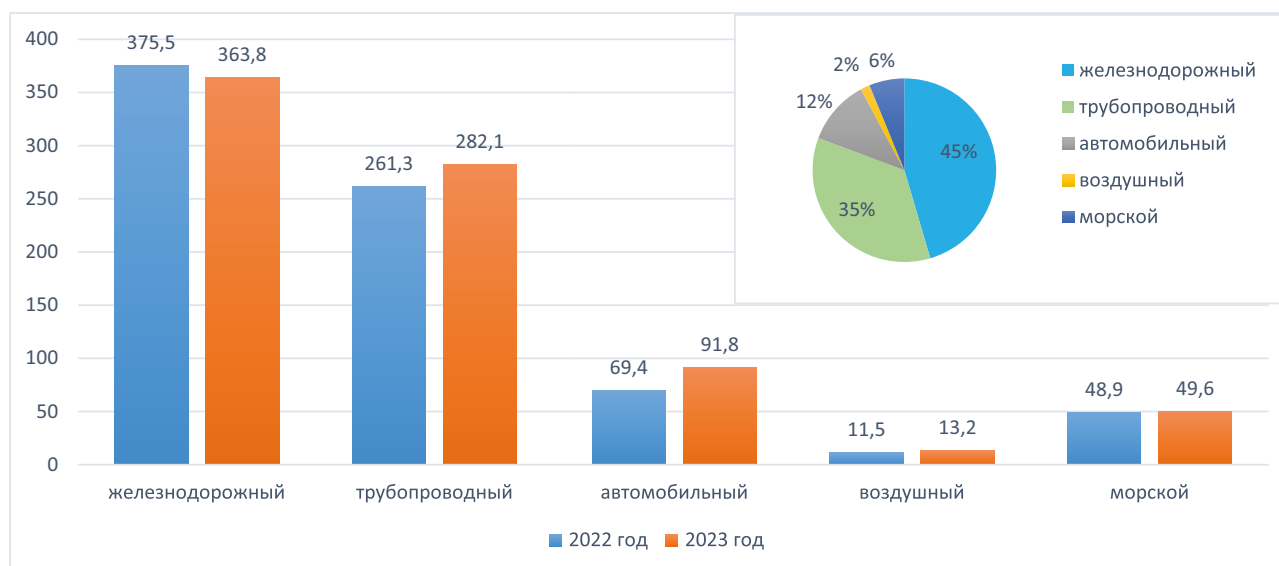


Рис. 1. Доставка грузов в морские порты России разными видами транспорта, млн т [1]

В стратегических документах Института экономики развития транспорта поставлены задачи по наращиванию мощностей по портам Азово-Черноморского, Северо-Западного бассейнов и Восточного полигона и увеличению объемов перевалки в железнодорожно-морском сообщении. Несмотря на проводимую работу по развитию железнодорожной инфраструктуры на подходах к портам, наличие участков с ограниченными резервами пропускной способности вызывает значительные затруднения при организации производственных процессов припортовых железных дорог. Указанное приводит к поиску резервов в производственных процессах как основной деятельности, так и обеспечивающих хозяйств с целью оптимизации технологии работы по всей технологической цепочке — от станций погрузки до станций перевалки (выгрузки), интеллектуализации процессов управления и развития системы управления перевозками.

### Модели управления вагонопотоками в адрес припортовых станций

Практический опыт работы припортовых железных дорог, например, Октябрьской, Дальневосточной, Северо-Кавказской, за последнее десятилетие дал понимание того, что в условиях ограниченных резервов пропускных способностей на подходах к портам требуется качественное планирование подвода вагонов в адрес припортовых станций [2, 3]. Указанное привело к изменениям как

в организационной структуре управления поездо- и вагонопотоками в адрес припортовых станций, так и с точки зрения развития новых интеллектуальных технологий. Речь идет о выделении в структуре управления перевозками логистических центров, разработке информационных инструментов [4, 5], таких как Дорожная информационно-логистическая система (модуль АСУ МР) [6], Динамическая модель загрузки инфраструктуры (ДМ ЗИ), последняя в том числе позволяет оценивать возможность реализации поданных заявок на перевозку с учетом различных инфраструктурных ограничений [7–9].

Рассмотрим схему управления перевозками с позиций управления транспортным производством. Существующая структура управления подводом поездов в адрес припортовых станций является многоуровневой, каждый уровень функционально решает задачу организации и контроля за продвижением вагонов на станции выгрузки. На рис. 2 приведена трехуровневая модель управления вагонопотоками в адрес припортовых станций (на основании анализа деятельности Северо-Кавказской железной дороги).

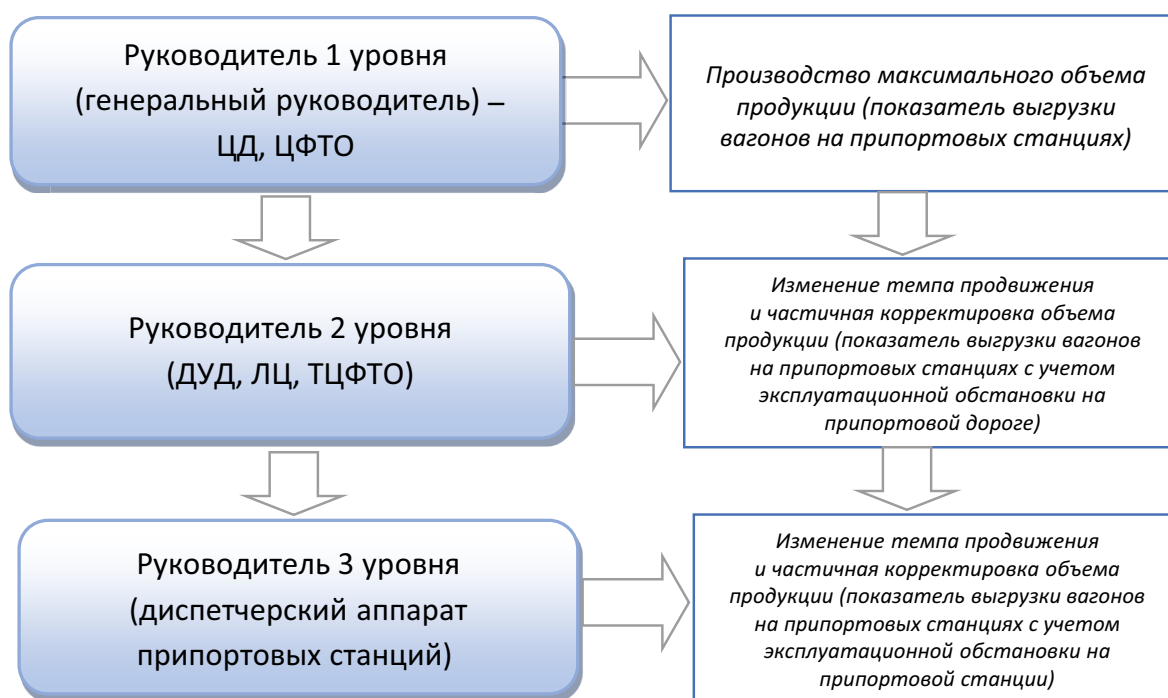


Рис. 2. Схема многоуровневой модели управления вагонопотоками в адрес припортовых станций

Изменение парадигмы управления и передача части функций, традиционно решаемых сотрудниками дирекций управления движением (ДУД), территориальных центров фирменного транспортного обслуживания (ТЦФТО) и логистических центров (ЛЦ) при приеме и согласовании заявок на перевозку, планировании и организации перевозок, определении очередности и приоритетов подвода

поездов в порты, интеллектуальным системам актуализировали задачи проверки моделей управления на устойчивость. Такая постановка задачи свойственна исследованиям академика В. И. Арнольда [10] с позиций теории управления производством. В указанных исследованиях производится оценка устойчивости многоуровневых моделей управления, что является актуальным для данного исследования.

Поэтому целью данного исследования является анализ устойчивости многоуровневых систем управления вагонопотоками в адрес припортовых станций в условиях интеллектуализации процессов управления. В отличие от моделей В. И. Арнольда [10] при планировании производственных процессов необходимо учитывать эксплуатационную ситуацию на припортовой станции, а также в целом на припортовой дороге, поэтому именно руководители 2-го и 3-го уровней имеют более четкое представление об оптимальном значении подводимых вагонов в адрес припортовых станций  $U$  для того или иного режима эксплуатационной работы. С точки зрения математического моделирования указанное позволяет выполнить виртуальное агрегирование уровней управления с целью анализа такой модели управления на ее устойчивость (рис. 3).

Руководитель	А	ЦД (включая автоматизированное решение ДМ ЗИ)	Агрегированный уровень управления
	В	Логистический центр	Агрегированный уровень управления
		Диспетчерский аппарат припортовых станций	

Рис. 3. Двухуровневая структура управления вагонопотоками в адрес припортовых станций, полученная путем виртуального агрегирования

Каждая из рассматриваемых моделей управления должна обеспечивать устойчивость при различных режимах эксплуатационной работы железных дорог: нормальном, тяжелом, утяжеленном, которые введены в данное исследование с учетом работы Д. Ю. Левина, но применительно к дороге, а не только к работе отдельно взятой станции [11]. С позиций интеллектуального управления каждый режим может характеризоваться набором параметров, изменение которых приводит к переходу системы из одного состояния в другое.

## Жесткая и мягкая математические модели систем управления вагонопотоками

С общей теоретической точки зрения отметим, что в настоящей статье продолжено исследование в области управления припортовыми транспортно-технологическими системами, концептуальная основа которого представляется жесткими и мягкими математическими моделями [10]. Изложенная в [12] методика моделирования систем управления вагонопотоками получает развитие по ряду направлений, в том числе в отношении применяемого математического аппарата. Для наглядности перейдем к изучению вопросов устойчивости систем управления путем рассмотрения в фазовом пространстве траекторий, соответствующих невозмущенному и возмущенным решениям систем дифференциальных уравнений, которыми описываются указанные модели. Предлагаемая ниже схема допускает различные вариации как в организационном и транспортно-технологическом отношениях, так и в плане иерархической организации субъектов управления в процессе их взаимодействия.

Рассмотрим припортовую железнодорожную станцию (или совокупность станций), в адрес которой отправляются груженные вагоны, число  $u$  которых зависит от времени  $t$  (сут.). Использование дифференциального исчисления подразумевает введение функциональной зависимости  $u = u(t)$ , которая рассматривается как неизвестная.

Предполагается, что отправление вагонов осуществляется субъектом  $A$  перевозочного процесса, который оперирует *темпом*  $\dot{u}$  изменения числа отправляемых в адрес станции вагонов (как правило, субъект  $A$  стремится увеличивать значения  $u$ ). Деятельность субъекта  $A$  символизируем переменной, которую зададим равенством:

$$v = \dot{u}. \quad (1)$$

Обращаясь к основам дифференциального исчисления, мы видим, что указанная символизация позволяет субъекту  $A$  изменять *темп* изменения числа  $u$  отправляемых в адрес станции вагонов.

Вместе с субъектом  $A$  рассматривается субъект  $B$  перевозочного процесса, который, если сказать коротко, регулирует деятельность субъекта  $A$ . Деятельность субъекта  $B$  символизируем переменной  $\dot{v}$ , которую выразим через число  $u$  отправляемых в адрес станции вагонов следующим образом:

$$\dot{v} = -K(u - U). \quad (2)$$

Здесь  $U$  — оптимальное число вагонов, отправляемых в адрес данной станции в сутки, которое предполагается известным субъекту  $B$  на основании его

практического опыта,  $K$  — положительный коэффициент, которым выражается степень влияния субъекта  $B$  на число  $u$  отправляемых со станции вагонов. Отметим, что величина коэффициента  $K$  зависит в первую очередь от загруженности той части транспортной инфраструктуры, которая непосредственно эксплуатируется в рассматриваемой ситуации. Из формул (1) и (2) следует, что субъект  $B$  изменяет *темп* изменения *темпа* изменения числа  $u$  отправляемых в адрес станции вагонов. Для вышеизложенного целесообразно привести краткие математические пояснения (см. табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Пояснения к связи между субъектами управления

$u < U$	$\dot{v} > 0$ ( $K > 0$ )	возрастает функция $\dot{u}(t) = v(t)$	возрастает темп $\dot{u}(t)$ изменения функции $u(t)$	субъект $B$ активизирует деятельность субъекта $A$
$u > U$	$\dot{v} < 0$	функция $v(t)$ убывает	убывает темп $\dot{u}(t)$ изменения функции $u(t)$	субъект $B$ сдерживает чрезмерную активность субъекта $A$

Модель системы управления вагонопотоками, получаемая в результате выполненных выше организационно-транспортных и математических построений, является жесткой [10] и имеет форму автономной системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{u} = v, \\ \dot{v} = -K(u - U). \end{cases} \quad (3)$$

Следующим шагом в проводимом исследовании является смягчение жесткой модели, которое получается в результате некоторого усложнения аналитической структуры правой части второго уравнения системы (3). Перейдем к изучению системы (также автономной) обыкновенных дифференциальных уравнений, которая имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{u} = v, \\ \dot{v} = -K(u - U) - \varepsilon v. \end{cases} \quad (4)$$

Мы вводим в рассмотрение положительный коэффициент  $\varepsilon$ , которым отражаются возможности регулирования субъектом  $B$  деятельности субъекта  $A$ , позволяющие учитывать *темп*  $\dot{u} = v$  изменения числа  $u$  отправляемых в адрес станции вагонов. Таким образом, обратная связь между субъектами  $A$  и  $B$  для рассматриваемой системы управления реализуется в более детальном виде (что будет иметь важность в дальнейшем при внедрении технологий искусственного интеллекта).

Согласно общей математической теории [13] устойчивость решений системы линейных дифференциальных уравнений и поведение отвечающих им траекторий зависят от знака вещественных частей корней характеристического уравнения матрицы этой системы. Для системы (4) указанные корни записываются формулой:

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left( -\varepsilon \pm \sqrt{\varepsilon^2 - 4K} \right). \quad (5)$$

### Изучение устойчивости системы управления вагонопотоками в рамках мягкой модели

Приведем результаты исследования устойчивости системы управления вагонопотоками, которые получены для построенной выше мягкой математической модели в среде программы компьютерной алгебры Maxima (Free Ware).

В качестве объекта приложения построенной модели будем рассматривать систему управления вагонопотоками, направляемыми в адрес припортовой станции Северо-Кавказской железной дороги. В данном случае рассматривается станция Туапсе, для которой в процессе эксперимента оптимальное значение объема выгрузки (объема производства продукции) принимается равным  $U = 700$  (ваг.), а значения коэффициентов во втором уравнении системы (3) — равными  $K = 0,5$  и  $\varepsilon = 1,5$ . То есть предполагается, что субъект  $B$  перевозочного процесса при взаимодействии с субъектом  $A$  ежедневно принимает во внимание *темп*  $\dot{u}$  изменения числа  $u$  отправляемых в адрес станции вагонов даже в большей степени, чем отклонение числа  $u$  от оптимального значения  $U$ .

Поскольку  $\varepsilon^2 - 4K = 0,25 > 0$ , то согласно выражению (4) корни характеристического уравнения системы (3) являются различными действительными отрицательными числами. Таким образом (см., например, [3]), невозмущенное решение системы (3), у которого компоненты равны  $u(t) \equiv U$  и  $v(t) \equiv 0$ , является асимптотически устойчивым, а траектории, отвечающие возмущенным решениям системы (3), оказываются расположенными на фазовой плоскости  $(u, v)$  так, что точка равновесия  $(U, 0)$  представляет собой узел. На рис. 4 коричневым, черным и зеленым цветами изображены найденные Maxima траектории, которые отвечают трем возмущенным решениям системы (3), а именно решениям задачи Коши с начальными значениями  $u(0)$  и  $v(0)$ , равными соответственно 600 и  $-25$ , 850 и  $-40$ , 800 и 10. Для траектории, отвечающей указанному выше невозмущенному решению системы и состоящей только из одной точки равновесия, использован красный цвет.

Из приведенного на рис. 4 фазового портрета системы (3) видно, что мягкая модель обеспечивает траекториям, отвечающим возмущенным решениям этой системы, «вхождение» в положение равновесия. На каждой из трех приведенных траекторий выделены точки, которые соответствуют 1-м, 2-м, ..., 6-м суткам и иллюстрируют временной режим функционирования системы управления в рамках, предписываемых моделью.

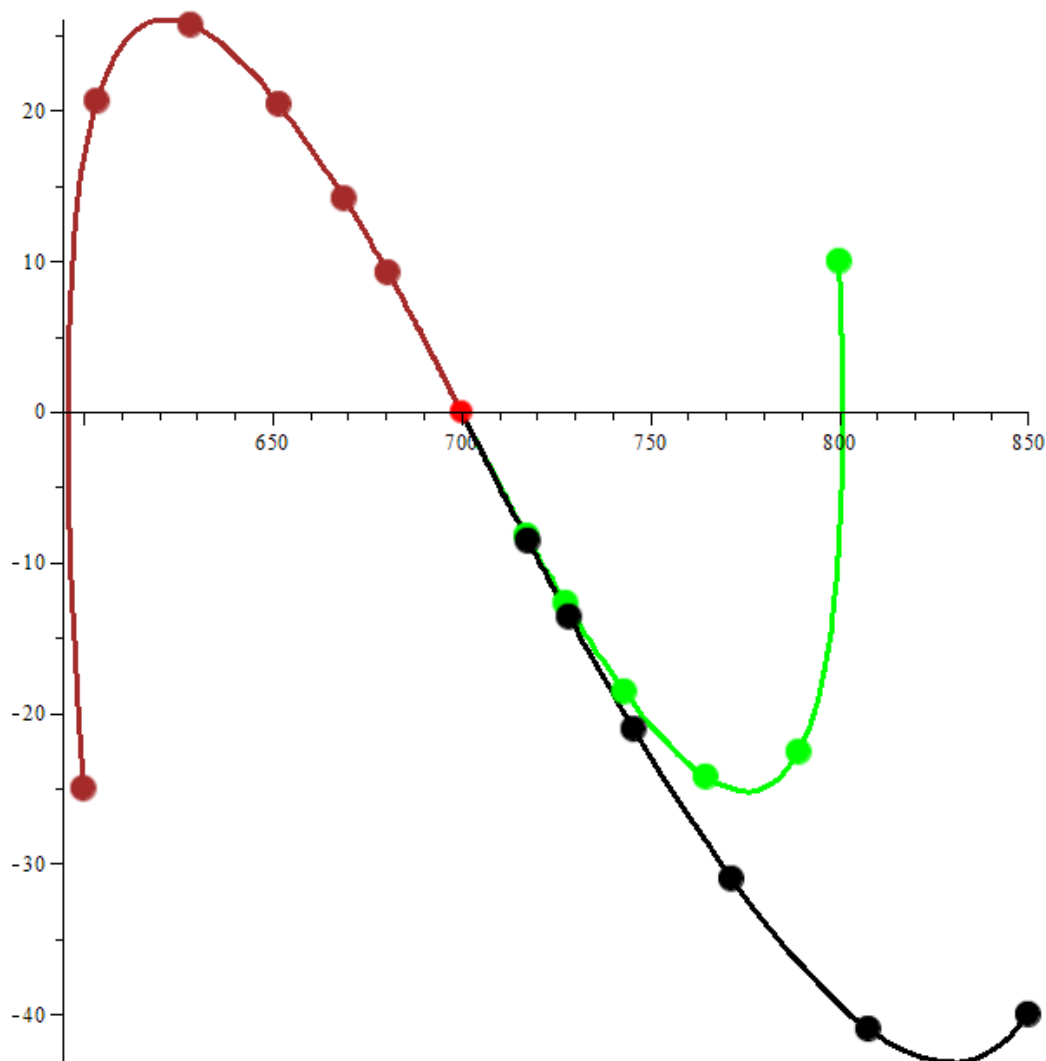


Рис. 4. Траектории, отвечающие решениям системы (3)

Если для рассматриваемой припортовой станции исходить из планирования объема подводимых вагонопотоков с глубиной трое суток, то траектории коричневого и зеленого цвета оказываются расположенными практически на одном расстоянии от точки равновесия  $(700,0)$  и ближе к ней, чем траектория черного цвета.

Причиной происходящего является то, что начальные значения, выбранные для частного решения системы, которому отвечает черная траектория, отличаются от оптимальных значений  $700$  и  $0$  больше, чем начальные значения (которые также указаны выше) для двух других частных решений. При планировании объема подводимых вагонопотоков глубиной шесть суток траектория черного цвета практически «догоняет» траекторию зеленого цвета и оказывается расположенной к точке равновесия несколько ближе, чем траектория коричневого цвета.

С практической точки зрения в проводимом исследовании нас интересует в первую очередь поведение функции  $u = u(t)$ , которой, напомним, выражается



число  $u$  направляемых в адрес рассматриваемой станции вагонов. Поэтому необходимо обратиться теперь к выражению компоненты  $u(t)$  общего решения системы (3), которое в данной ситуации имеет вид:

$$u(t) = C_1 e^{\frac{-\varepsilon - \sqrt{\varepsilon^2 - 4K}}{2} t} + C_2 e^{\frac{-\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 - 4K}}{2} t} = C_1 e^{-t} + C_2 e^{-\frac{t}{2}}, \quad (5)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — произвольные вещественные постоянные.

С практической точки зрения поведение графиков первых компонент  $u(t)$  решений системы (3) представляет первоочередной интерес. На рис. 5 в соответствии с фазовым портретом системы (3) (изображенном на рис. 4) приведены такие графики для трех возмущенных решений, а также невозмущенного решения (положения равновесия) этой системы.

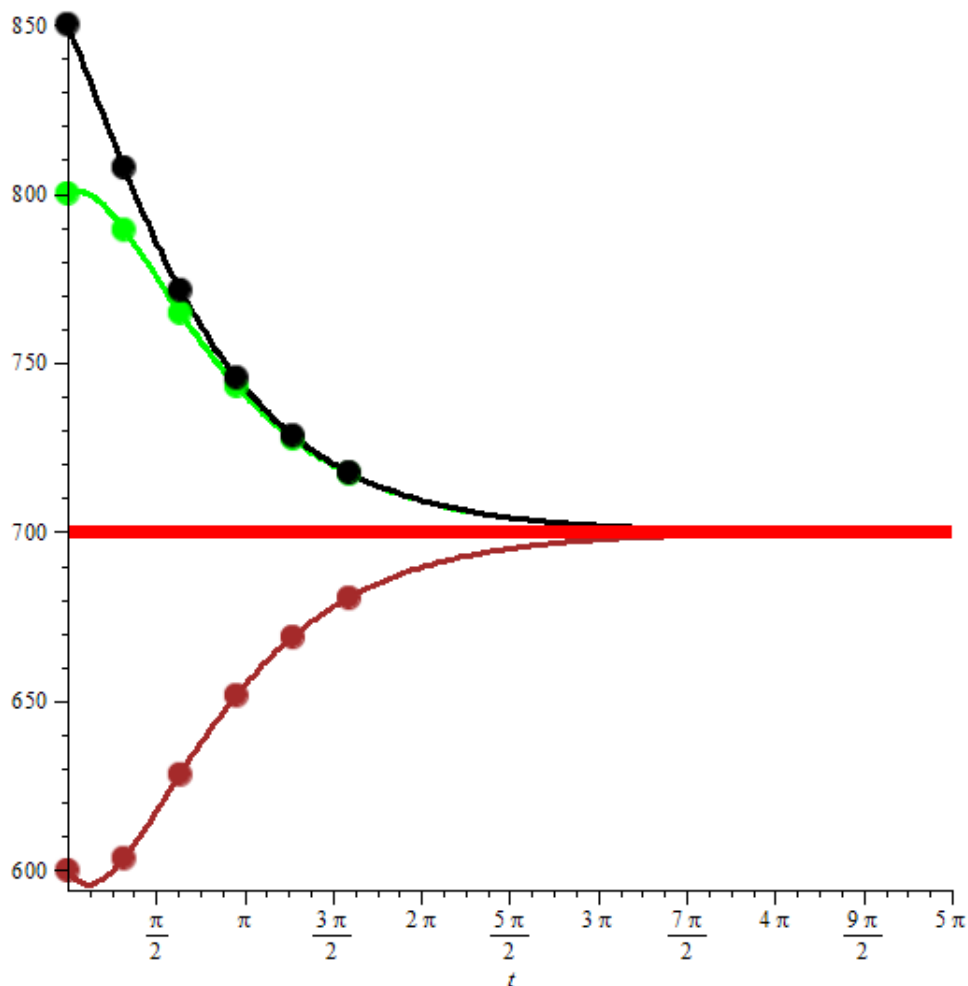


Рис. 5. Графики зависимостей  $u = u(t)$ , получаемых для мягкой модели

На третьи сутки значение первой компоненты возмущенного решения системы (3), которому отвечает зеленая траектория, отличается от оптимального значения меньше, чем соответствующие значения первых компонент возмущенных

решений, которым отвечает как черная траектория, так и коричневая. Однако на шестые сутки указанные различия практически сглаживаются. Такое наглядное изображение поведения системы в последующем позволит оценить устойчивость систем управления, в том числе при развитии интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

## Выводы

Продолжено исследование вопросов устойчивости многоуровневых систем управления вагонопотоками на железнодорожном транспорте в условиях интеллектуализации, методологическая основа которого представлена жесткими и мягкими моделями, описываемыми системами обыкновенных дифференциальных уравнений. В математическом плане реализуется переход к фазовой плоскости рассматриваемой системы уравнений и исследованию поведения траекторий, отвечающих невозмущенному и возмущенным решениям этой системы. Деагрегирование исходной жесткой модели двухуровневой системы управления в мягкую модель осуществляется путем введения дополнительных связей между рассматриваемыми субъектами перевозочного процесса. Реализованная в среде системы компьютерной математики методика построения моделей носит общий характер и может быть распространена на другие системы управления транспортным производством. Методы теории устойчивости решений дифференциальных уравнений позволяют убедиться в асимптотической устойчивости во времени рассматриваемого процесса управления вагонопотоками, что в дальнейшем позволит исследовать решения, полученные с применением технологий искусственного интеллекта.

*Примечание.* Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

## Библиографический список

1. Статистика // Ассоциация морских торговых портов. URL: <https://www.morport.com/rus/content/statistika-0> (дата обращения: 11.07.2024).
2. Черняев А. Г., Зубков В. Н., Чеботарева Е. А. Развитие полигонных технологий перевозок на основе совершенствования логистического управления вагонопотоками в границах нескольких дорог // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2017. № 2 (66). С. 75–82.
3. Пленкин С. А., Новичихин А. В. Разработка методики перераспределения вагонопотоков (на примере Северо-Западного полигона) // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. Вып. 3. С. 73–84. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-73-84.
4. Zadorozhniy V., Bakalov M. Principles of Mathematical Modeling of Wagon Flows Distribution in the Portside Transport and Technological System // Lecture Notes in Networks and Systems:

International School on Neural Networks, NN 2022 (St. Petersburg, Russian Federation, 08–10 February 2022). 2023. Vol. 509. P. 881–888. DOI: 10.1007/978-3-031-11058-0\_89.

5. Чеботарева Е. А. Теория и методология организации транспортного производства в припортовых транспортно-технологических системах: монография. Ростов н/Д.: ФГБОУ ВО РГУПС, 2020. 267 с.

6. Zubkov V. N., Ryazanova E. V., Anoshkin K. V. Proposals for the Development of the Road Information Logistics System (RILS) // Proceedings-2022: International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2022. 2022. P. 527–536. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896277.

7. Шапкин И. Н., Осьминин А. Т. Цифровые технологии приходят на смену прежней идеологии управления перевозками // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: сборник трудов научно-практической конференции с международным участием. М., 2022. С. 413–431.

8. Осьминин А. Т. О разработке интеллектуальной системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сборник материалов научно-практической конференции АО «ВНИИЖТ». Щербинка, 2021. С. 139–147.

9. Осьминин А. Т., Кабанов А. В. Динамическая модель загрузки инфраструктуры ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2021. № 8. С. 10–19.

10. Арнольд В. И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. 2-е изд. М.: МЦНМО, 2008. 32 с.

11. Левин Д. Ю. Теория оперативного управления перевозочным процессом: монография. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. 625 с.

12. Чеботарева Е. А., Богачев В. А. Исследование организационно-технологической устойчивости системы управления вагонопотоками с использованием теории дифференциальных уравнений // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (60). С. 4–12.

13. Петровский И. Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. 2009. 207 с.

Дата поступления: 15.07.2024

Решение о публикации: 07.08.2024

**Контактная информация:**

ЧЕБОТАРЕВА Евгения Андреевна — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Управление эксплуатационной работой»; abrosimova@ya.ru

## Investigation of multilevel models of car traffic management at port stations using the theory of differential equations

**E. A. Chebotareva**

Rostov State Transport University, sq. Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia, 2, Rostov-on-Don, 344038, Russia

**For citation:** *Chebotareva E. A.* Investigation of multilevel models of car traffic management at port stations using the theory of differential equations // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 3. P. 60–72. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-60-72

### Abstract

**Purpose:** To consider the issue of sustainability of multi-level control systems for car flows to port railway stations in the conditions of intellectualization of transportation management processes. To assess the influence of three-level and two-level control systems for the operational work of port roads on the quality of planning the supply of trains to port stations under various modes of operational operation of railways. Determine the conditions for the stability of the car flow control system by constructing and studying the corresponding hard and soft mathematical models described by autonomous systems of ordinary linear differential equations.

**Methods:** In this study, the methods of the theory of stability of solutions of differential equations, as well as the theory of control and dynamical systems are used. A phase space is used in a visual representation, a qualitative and quantitative analysis of the behavior of phase trajectories in it is performed, corresponding to undisturbed and perturbed solutions of systems of differential equations describing the constructed models of control systems. **Results:** A comparison of the characteristics of multistage car traffic control systems is given. A study of the stability of multilevel models of car traffic management in the context of the intellectualization of management functions is proposed. In the environment of the analytical computing system, the conditions of asymptotic stability in time of a two-level wagon traffic control system are found and studied. **Practical importance:** The results obtained by computational experiment make it possible to assess the stability of the functioning of port-side transport and technological systems in the context of changes in the organization of production and the intellectualization of transportation management processes. Computer mathematics systems make it possible to implement the heuristic component of research and obtain theoretically sound and visual solutions to problems of optimizing cargo and wagon traffic control modes.

**Keywords:** Transport systems, railway transport, port stations, organization of transport production, stability of control systems, differential equations, computer mathematics systems

### References

1. Statistika // Associaciya morskikh torgovyh portov. URL: <https://www.morport.com/rus/content/statistika-0> (data obrashheniya: 11.07.2024). (In Russian)
2. Chernyaev A. G., Zubkov V. N., Chebotareva E. A. Razvitie poligonnyh tehnologij perevozok na osnove sovershenstvovaniya logisticheskogo upravleniya vagonopotokami v graniczah neskol'kih dorog // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya. 2017. № 2 (66). S. 75–82. (In Russian)
3. Plenkin S. A., Novichihin A. V. Razrabotka metodiki pereraspredeleniya vagonopotokov (na primere Severo-Zapadnogo poligona) // Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovaniy. 2023. Vyp. 3. S. 73–84. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-73-84. (In Russian)

4. Zadorozhniy V., Bakalov M. Principles of Mathematical Modeling of Wagon Flows Distribution in the Portside Transport and Technological System // Lecture Notes in Networks and Systems: International School on Neural Networks, NN 2022 (St. Petersburg, Russian Federation, 08–10 February 2022). 2023. Vol. 509. P. 881–888. DOI: 10.1007/978-3-031-11058-0\_89.

5. Chebotareva E. A. Teoriya i metodologiya organizacii transportnogo proizvodstva v priportovyh transportno-tehnologicheskikh sistemah: monografiya. Rostov n/D.: FGBOU VO RGUPS, 2020. 267 s. (In Russian)

6. Zubkov V. N., Ryazanova E. V., Anoshkin K. V. Proposals for the Development of the Road Information Logistics System (RILS) // Proceedings-2022: International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2022. 2022. P. 527–536. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896277.

7. Shapkin I. N., Os'minin A. T. Cifrovye tehnologii prihodyat na smenu prezhnej ideologii upravleniya perevozkami // Innovacionnye tehnologii na zheleznodorozhnom transporte: sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. M., 2022. S. 413–431. (In Russian)

8. Os'minin A. T. O razrabotke intellektualnoj sistemy upravleniya perevozochnym processom na zheleznodorozhnom transporte // Nauka 1520 VNIIZhT: Zaglyani za gorizont: sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferencii AO “VNIIZhT”. Shherbinka, 2021. S. 139–147. (In Russian)

9. Os'minin A. T., Kabanov A. V. Dinamicheskaya model' zagruzki infrastruktury OAO “RZhD” // Zheleznodorozhny'j transport. 2021. № 8. S. 10–19. (In Russian)

10. Arnol'd V. I. “Zhestkie” i “myagkie” matematicheskie modeli. 2-e izd. M.: MCzNMO, 2008. 32 s. (In Russian)

11. Levin D. Yu. Teoriya operativnogo upravleniya perevozochnym processom: monografiya. M.: GOU “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte”, 2008. 625 s. (In Russian)

12. Chebotareva E. A., Bogachev V. A. Issledovanie organizacionno-tehnologicheskoy ustojchivosti sistemy upravleniya vagonopotokami c ispol'zovaniem teorii differencial'nyh uravnenij // Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya. 2023. № 4 (60). S. 4–12. (In Russian)

13. Petrovskij I. G. Lekcii po teorii obyknovennyh differencial'nyh uravnenij. 2009. 207 s. (In Russian)

Received: 15.07.2024

Accepted: 07.08.2024

**Author's information:**

Evgeniia A. CHEBOTAREVA — PhD in Engineering, Associate Professor; abrosimova@ya.ru