УДК 656.22 + 06

ЖЕСТКИЕ И МЯГКИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ВАГОНОПОТОКАМИ ОПЕРАТОРСКОЙ КОМПАНИИ

В.М. Задорожний
Ростовский государственный университет путей сообщения
Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2,
E-mail: zadorozniy91@mail.ru

М.В. Колесников
Ростовский государственный университет путей сообщения
Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2,
E-mail: kmv-d@list.ru

Ю.А. Бакалова
Ростовский государственный университет путей сообщения
Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2,
E-mail: yulia.rnd@mail.ru

Ключевые слова: системы управления вагонопотоками, жесткие и мягкие математические модели, системы дифференциальных уравнений, устойчивость.

Аннотация: разработаны и проанализированы жесткая и мягкая математические модели для изучения устойчивости систем управления вагонопотоками на железнодорожном транспорте. Особое внимание уделено двухуровневой системе управления отправлением порожних вагонов с железнодорожной станции. Исследование демонстрирует результат жесткой модели, и перспективы мягкой модели для достижения асимптотической устойчивости для решения системы дифференциальных уравнений, что будет способствовать оптимизации процесса управления вагонопотоками**.**

1. Введение

Управление вагонопотоками является ключевым сектором в изучении и оптимизации транспортных и технологических железнодорожных систем. Это исследование включает в себя аспекты, такие как анализ железнодорожной инфраструктуры, координация управления вагонопотоками и обеспечение безопасности на железных дорогах.

Различные методы и подходы применяются для решения этих задач, что подчеркивает многогранность и сложность сферы управления железнодорожными вагонопотоками [1-6].

В условиях конкуренции между различными операторами вагонных парков возникают различные задачи управления и принятия решений, которые можно сформулировать как сложные математические задачи с множественными целями и ограничениями (см., например, [1, 4, 5]).

2. Теоретические основы подхода в математическом моделировании систем управления

Рассматривается математическое моделирование систем управления на примере управления вагонопотоками. Модель предусматривает изменение количества вагонов x со временем t (сут.) и включает в себя некоторую функциональную зависимость $x = x(t)$. В модели выделены два ключевых субъекта управления: субъект «А», отвечающий за непосредственную отправку вагонов, и субъект «В», который регулирует деятельность субъекта «А», адаптируясь к текущим условиям и меняя скорость изменения количества отправляемых вагонов.

Цель субъекта «А» - максимизировать количество отправляемых вагонов, в то время как субъект «В» регулирует эту активность, используя обратную связь для стимуляции или сдерживания субъекта «А» в зависимости от ситуации. Эта взаимосвязь моделируется через систему дифференциальных уравнений, которые учитывают различные ограничения, связанные с инфраструктурой транспорта и операционными условиями.

Для выражения деятельности субъекта «А» введем переменную y, определив ее равенством:

$$y = \dot{x} \tag{1}$$

Деятельность субъекта «В» будем выражать переменной $\dot{y}$, определив ее равенством:

$$\dot{y} = -k(x - X) \tag{2}$$

Здесь X– некоторое известное субъекту «В» оптимальное количество отправляемых с данной станции порожних вагонов. Относительно коэффициента k отметим, что в общем случае это положительное число представляет собой некоторую характеристику технологии управления вагонопотоками на данном участке.

Математическая модель рассматриваемого процесса управления представляется автономной системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x} = y\,, \\ \dot{y} = -k(x - X)\,, \end{cases} \tag{3}$$

которая относится к жестким моделям управления [7].

Далее можно вводить разного рода ограничения для переменных y и $\dot{y}$ (3), которые позволят отразить специфику функционирования объектов транспортной инфраструктуры.

3. Характеристики транспортного объекта исследований

Применение математической модели управления вагонопотоками операторской компании на некотором железнодорожном участке «Н»-«К». В качестве ключевых субъектов управления выступают диспетчер компании («А»), стремящийся увеличить количество отправляемых вагонов, и перевозчик, обладающий информацией об оптимальном объеме отправлений («В»).

Основой для определения оптимального количества вагонов служит практический опыт и учет пропускной способности участка, включая движение пассажирских поездов. Учитывается длина поезда и максимальное количество поездов, которые могут быть приняты на участке. Таким образом, рассматриваемое в модели оптимальное значение (см. второе уравнение системы (3)) равно $X = 684$ ваг.

Важным аспектом модели является коэффициент, отражающий способность перевозчика регулировать вагонопоток.

4. Жесткое и мягкое моделирование системы управления вагонопотоками

В настоящем исследовании мы воспользуемся тем, что система (3) в определенном смысле эквивалентна линейному неоднородному обыкновенному дифференциальному уравнению 2-го порядка с постоянными коэффициентами:

(4) $$\ddot{x} + kx = kX$$

В рамках этой модели основное внимание уделяется устойчивости решений, которая определяется через характеристическое уравнение, анализируемое на основе параметров системы. Устойчивость решения связана со стационарным состоянием системы управления, и для ее исследования используются специализированные программные инструменты, такие как Maxima.

Выражаясь языком теории дифференциальных уравнений, будем исследовать на устойчивость при $t \to +\infty$ решения $x(t) \equiv X$ уравнения (4).

В данном случае будем пользоваться следующим выражением общего решения уравнения (4):

(5) $$x(t) = C\cos\left(\sqrt{k}\, t + \mu\right) + X$$

При этом числа C и μ находятся из равенств:

(6) $$\mathrm{C} = \sqrt{\mathrm{C}_1^2 + \mathrm{C}_2^2}, \cos\mu = \frac{C_1}{C}, \sin\mu = \frac{C_2}{C},$$

где C_1 и C_2 – произвольные вещественные постоянные.

В контексте управления вагонопотоками устойчивость системы зависит от реальных частей корней характеристического уравнения. В исследовании рассматривается случай, когда корни уравнения являются чисто мнимыми, что указывает на границу устойчивости решения.

Перейдем к изложению результатов исследования устойчивости системы управления порожними вагонами, отправляемыми с припортовой станции «Н», которые получены путем жесткого математического моделирования. На рис. 1 приведен график частного решения $x(t)$ уравнения (4), удовлетворяющего начальным условиям $x(0) = 665$ (ваг.) и $\dot{x}(0) = 10$ (ваг./сут.). Указанные условия выбраны произвольно с той целью, чтобы проиллюстрировать то общее положение [7], что при двухуровневой системе управления могут происходить периодические колебания значений функции $x(t)$. Однако, в данном случае не происходит катастрофического нарастания колебаний (как это имеет место для жестких моделей систем управления с тремя и более уровнями управления [7]).

Приведем аналитическое выражение указанного решения:

$$x(t) = 10{,}1\sin\frac{7\sqrt{2t}}{10} - 19\cos\frac{7\sqrt{2t}}{10} + 684.$$

Таким образом, в исследовании подчеркивается важность дополнительной связи между уровнями управления для обеспечения устойчивости системы.

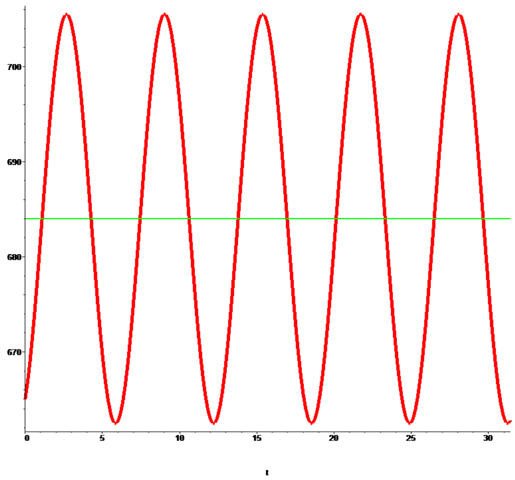

Рис. 1. График зависимости $x = x(t)$, полученной для жесткой модели.

Мягкое моделирование системы управления порожними вагонопотоками, основываясь на методологических подходах, должно учитывать небольшие изменения в системе управления, делая ее более адаптируемой и гибкой по сравнению с жесткой моделью. Перспективой исследований является детальная проработка мягкое модели и анализ устойчивости системы.

5. Заключение

В данной работе предложен инновационный подход к изучению устойчивости систем управления вагонопотоками на железнодорожном транспорте. Этот подход анализирует принципы жесткого и мягкого математического моделирования в рамках общей теории управления. Основным объектом исследования является система управления порожними вагонопотоками.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00869, https://rscf.ru/project/24-29-00869/.

Список литературы

1. Гершвальд А.С., Биленко Г.М., Еловиков А.В., Басыров И.М. Введение в теорию управления процессами на железнодорожном транспорте. Книга 1. 19 системообразующих задач / Под ред. А.С. Гершвальда. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2018. 118 с.
2. Иващенко А.В., Карсаев О.В., Скобелев П.О., Царев А.В., Юсупов Р.М. Мультиагентные технологии для разработки сетецентрических систем управления // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 3. С. 11-23.
3. Матюхин В.Г. Концептуальное моделирование процессов управления на железнодорожном транспорте // УБС. 2012. № 38. С. 20-35.
4. Chislov O.N., Zadorozhniy V.M., Bogachev V.A., Kravets A.S., Bogachev T.V., Bakalov M.V. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system // Transport Problems. 2021. Vol. 16, No. 2. P. 153-165.
5. Rakhmangulov A., Muravev D., Hu H., Mishkurov P. Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: Case study on the Ningbo-Zhoushan Port // International Journal of Information Management. 2021. Vol. 57. P. 102-133.
6. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: МПСИ, 2005. 584 с.
7. Арнольд В.И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. М.: МЦНМО. 2004. 32 с.