

Ключевые слова: отцеп, сортировочная горка, сортировочный путь, векторная оптимизация, точечный вагонный замедлитель

Алексей НАЗАРОВ*

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

Лазаряна, 2, Днепр, 49010, Украина

*Corresponding author. E-mail: nazarovalexej65@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА ЗАПОЛНЕНИЯ ВАГОНАМИ СОРТИРОВОЧНЫХ ПУТЕЙ, ОБОРУДОВАННЫХ СИСТЕМОЙ КВАЗИНЕПРЕРЫВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ОТЦЕПОВ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования процесса заполнения вагонами сортировочных путей, которые оборудованы системой квазинепрерывного регулирования скорости отцепов, изложена методика оценки качества таких систем, в которых используют точечные вагонные замедлители. Целью исследования является определение параметров системы, при которых можно достичь рационального соотношения между показателями качества заполнения сортировочных путей вагонами. Для достижения этой цели использован метод векторной оптимизации по двум критериям. С помощью методов имитационного моделирования получены зависимости качества заполнения вагонами сортировочного пути от параметров системы квазинепрерывного регулирования скорости отцепов. По результатам исследования предоставлены рекомендации относительно определения параметров системы с наилучшими показателями качества заполнения вагонами сортировочного пути.

Практически на всех сортировочных горках железных дорог Украины принята технология прицельного регулирования скорости отцепов балочными вагонными замедлителями парковой тормозной позиции, расположенной в начале сортировочного пути [1]. После выхода отцепа из парковой тормозной позиции происходит нерегулированное скатывание отцепа, который может привести как к преждевременной остановке отцепов с плохими ходовыми свойствами, так и к увеличению скорости отцепов с хорошими ходовыми свойствами до небезопасного уровня.

Таким образом принятая технология регулирования скорости отцепов не исключает повреждаемости вагонов и грузов, которые в них перевозятся, а также приводит к увеличению маневровой работы по осаживанию отцепов, которые не докатились до точки прицеливания [2]. Это связано главным образом с инерционностью и нестабильностью тормозных характеристик балочных вагонных замедлителей [3], зависимостью от состояния продольного профиля путей [4], ошибками в работе операторов тормозной позиции и автоматизированных систем управления ими из-за неполного учета факторов, которые влияют на скорость отцепов [5], большой протяженностью нерегулированного скатывания отцепов и т.п. [6, 7]. То есть качество заполнения сортировочных путей вагонами на отечественных сортировочных станциях остается невысоким.

Известно много способов повышения качества заполнения сортировочных путей вагонами [8]. Однако, в последнее время на зарубежных сортировочных станциях получили распространение системы квазинепрерывного регулирования скорости отцепов с использованием точечных вагонных замедлителей [9].

Качество процесса заполнения вагонами сортировочных путей оценивают по двум показателями, каждый из них характеризует разные стороны процесса. Один из них характеризует скорость подхода отцепов к вагонам на сортировочном пути, а другой полноту заполнения сортировочного пути вагонами. Это связано с тем, что цель процесса заключается в том, чтобы с одной стороны все отцепы докатились до вагонов на сортировочном пути без преждевременной остановки и образования окон, а с другой стороны, чтобы скорость подхода отцепов к вагонам на сортировочном пути при этом была в безопасных пределах. Поэтому для оценки качества заполнения вагонами сортировочных путей выбраны два показателя, которые характеризуют обе стороны процесса: степень заполнения сортировочного пути вагонами и вероятность подхода отцепов к вагонам на сортировочном пути с безопасной скоростью.

На сортировочных путях, оснащенных системой квазинепрерывного регулирования скорости отцепов, эти показатели зависят, прежде всего, от уклона (i) и от плотности (r) размещения точечных вагонных замедлителей.

Оба показателя нужно максимизировать. Задача определения рациональных параметров системы квазинепрерывного регулирования скорости вагонов на сортировочном пути сводится к тому, чтобы минимальным количеством точечных вагонных замедлителей на по возможности меньшем уклоне достичь максимального заполнения сортировочного пути вагонами с обеспечением безопасной скорости подхода отцепов к вагонам на сортировочном пути.

Показатели качества работы системы обозначим следующим образом: через $P(i, r)$ вероятность подхода отцепов к вагонам на сортировочном пути с безопасной скоростью не больше 1,4 м/с, а через $G(i, r)$ степень заполнения вагонами сортировочного пути.

Возникает потребность найти такую пару (i, r) , чтобы $P(i, r)$ и $G(i, r)$ были бы по возможности большими.

В математическом плане получили задачу векторной оптимизации [10-12] по двум критериям:

$$\begin{pmatrix} -P(i, r) \\ -G(i, r) \end{pmatrix} \rightarrow \min \quad (1)$$

при условиях, что

$$\underline{r} \leq r \leq \bar{r}; \underline{i} \leq i \leq \bar{i}, \quad (2)$$

где $\underline{i}$, $\bar{i}$ – минимальный и максимальный уклон, ‰.

$\underline{r}$, $\bar{r}$ – минимальная и максимальная плотность размещения точечных вагонных замедлителей на сортировочном пути, ед./м.

Для решения задачи введем следующие определения:

Определение 1.

Пара (i, r) называется эффективной, если любая ее вариация приводит к ухудшению хотя бы одного показателя.

Другими словами, если $(\tilde{i}, \tilde{r})$ – вариация пары (i, r) , то имеет место:

$$\begin{pmatrix} P(i, r) \leq P(\tilde{i}, \tilde{r}) \\ G(i, r) \geq G(\tilde{i}, \tilde{r}) \end{pmatrix} \text{ или } \begin{pmatrix} P(i, r) \geq P(\tilde{i}, \tilde{r}) \\ G(i, r) \leq G(\tilde{i}, \tilde{r}) \end{pmatrix},$$

причем среди выписанных неравенств, должно быть хотя бы одно строгим.

Определение 2.

Две пары (i, r) называются несравнимыми, если для одной пары лучше один показатель, а для другой пары лучше другой показатель.

Определение 3.

Решением задачи векторной оптимизации (1) будем называть такой набор пар (i, r) из области допустимых значений (2), что все они эффективные и несравнимые между собой.

Необходимое условие, что пара (i, r) есть эффективной, принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial i} + t \frac{\partial G}{\partial i} = 0; \\ \frac{\partial P}{\partial r} + t \frac{\partial G}{\partial r} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $t \geq 0$.

Пусть $i(t)$ и $r(t)$ являются решением системы (3). Отобрав эти пары так, чтобы они были несравнимыми, получим решение задачи (1) - (2).

Последнее означает, что необходимо найти такие $\underline{t}$ и $\bar{t}$, что для любого $t \in [\underline{t}, \bar{t}]$ пары $(i(t), r(t))$ удовлетворяют условиям определений 1, 2.

Определение $\underline{t}$ и $\bar{t}$ производим следующим образом:

В пространстве функционалов P, G строим множество S эффективных точек для $t \geq 0$.

Среди элементов множества S отбираем точки, которые удовлетворяют условию:

$$Kp(A) \cap S = \{A\}, \quad (4)$$

где $Kp(A)$ – конус Парето с вершиной в точке A .

Находим множество таких точек, для каждой из которых пересечение конуса Парето с областью S вырождается в точку. Геометрическое представление соотношения (4) представлено на рис. 1.

Прежде чем воспользоваться изложенной методикой, выполним аппроксимацию $P(i, r)$ и $G(i, r)$, полученную с помощью математического моделирования процесса скатывания отцепов.

По результатам математического моделирования скатывания отцепов на сортировочный путь, оснащенный системой квазинепрерывного регулирования скорости отцепов с использованием точечных вагонных замедлителей [13, 14], получена информация об $P(i, r)$ и $G(i, r)$, на основании анализа которых установлены зависимости $P = f(i, r)$ и $G = f(i, r)$ с помощью метода наименьших квадратов:

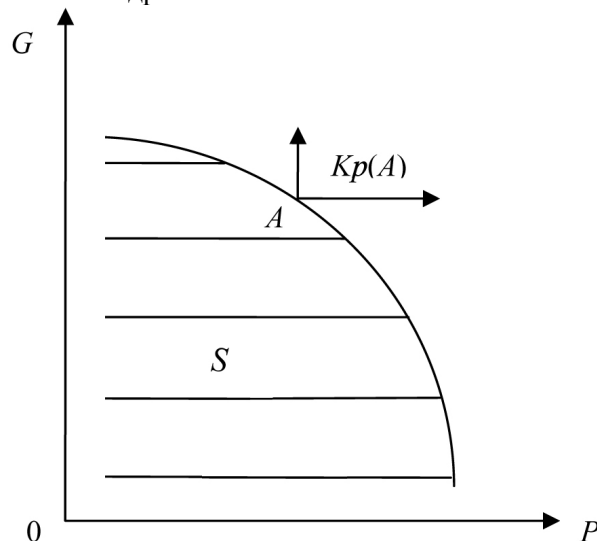


Рис.1. Геометрическая интерпретация условия (4)

$$P = 0,0956 + 0,5874r + 0,3941i - 0,9483r^2 + 0,3271ri - 0,1067i^2; \quad (5)$$

$$G = 0,4266 - 0,0642r + 0,1189i + 0,0618r^2 - 0,0146ri - 0,0201i^2. \quad (6)$$

Зависимости представляют собой уравнения поверхностей. Эти поверхности $P(i, r)$ и $G(i, r)$ представлены на рис. 2 и 3.

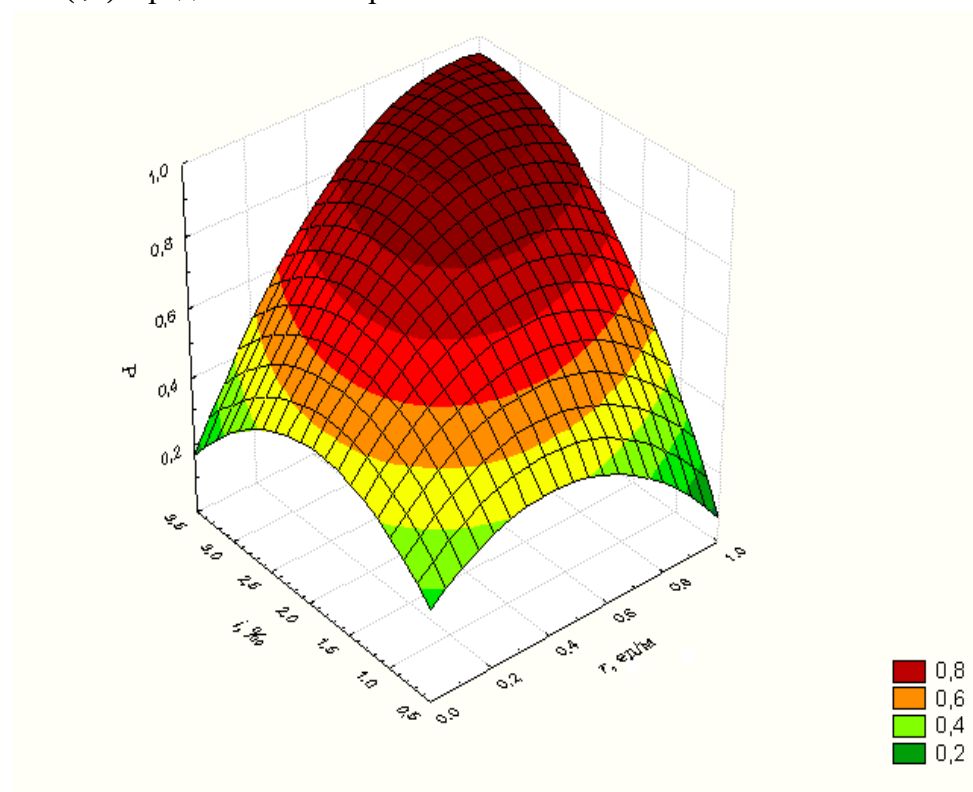


Рис.2. Поверхность $P(i, r)$

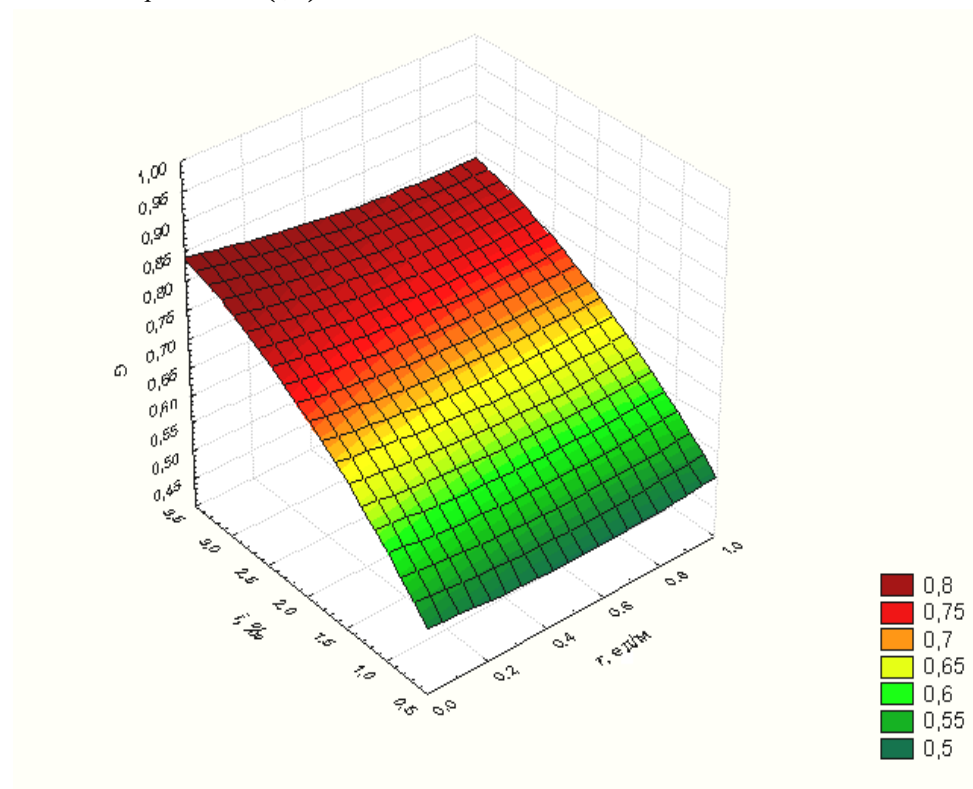


Рис.3. Поверхность $G(i, r)$

Обе поверхности на области определения можно считать выпуклыми. Этот факт свидетельствует о том, что все эффективные варианты являются несравнимыми между собой.

Согласно выше изложенной методике, вычисляем градиенты функций $P(i, r)$ и $G(i, r)$, полагая:

$$P1 = \frac{\partial P}{\partial i}; \quad P2 = \frac{\partial P}{\partial r};$$

$$G1 = \frac{\partial G}{\partial i}; \quad G2 = \frac{\partial G}{\partial r},$$

которые в нашем случае будут равняться:

$$P1 = 0,3941 + 0,3271r - 0,2134i;$$

$$P2 = 0,5874 - 1,8966r + 0,3271i;$$

$$G1 = 0,5874 - 1,896r + 0,3271i;$$

$$G2 = -0,0642 + 0,1236r - 0,0146i.$$

Используя пакет символьных вычислений Maple [15] решаем систему уравнений (3), а именно:

$$\begin{cases} P1 + tG1 = 0; \\ P2 + tG2 = 0. \end{cases}$$

```
>A:=evalf(solve({P1+t*G1=0,P2+t*G2=0},{i,r}),5):
>if
    op(1,op(1,A))=r
then
    r:=op(2,op(1,A)):
    i:=op(2,op(2,A)):
else
    r:=op(2,op(2,A)):
    i:=op(2,op(1,A)):
end if;
```

Решение $r(t)$ и $i(t)$ в специальных функциях Maple имеют вид:

$$r = -\frac{533880 \cdot t^2 - 0,65949 \cdot 10^7 t - 0,25426 \cdot 10^8}{-0,29774 \cdot 10^8 - 0,59418 \cdot 10^7 t + 518190 \cdot t^2};$$

$$i = \frac{12 \cdot (186760 \cdot t^2 - 0,23332 \cdot 10^7 t - 0,78229 \cdot 10^7)}{-0,29774 \cdot 10^8 - 0,59418 \cdot 10^7 t + 518190 \cdot t^2}.$$

Графики зависимостей переменных $r(t)$ и $i(t)$ от параметра t представлены на рис. 4, 5.

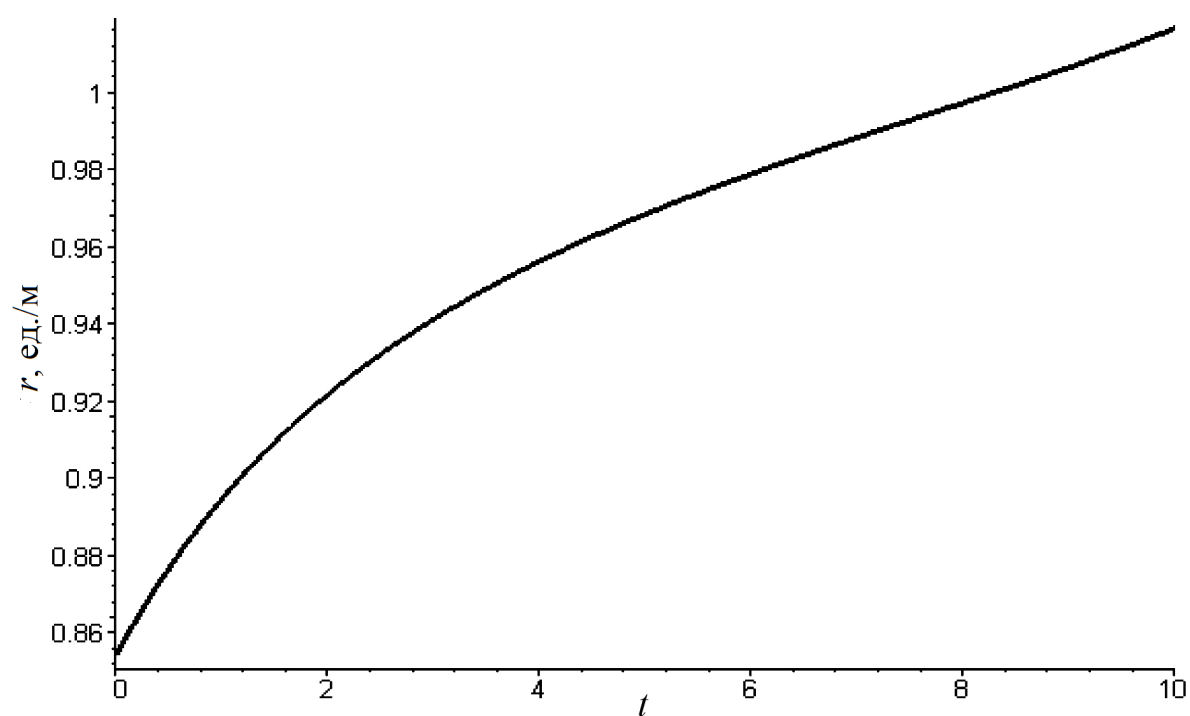


Рис.4. Графическое представление $r(t)$

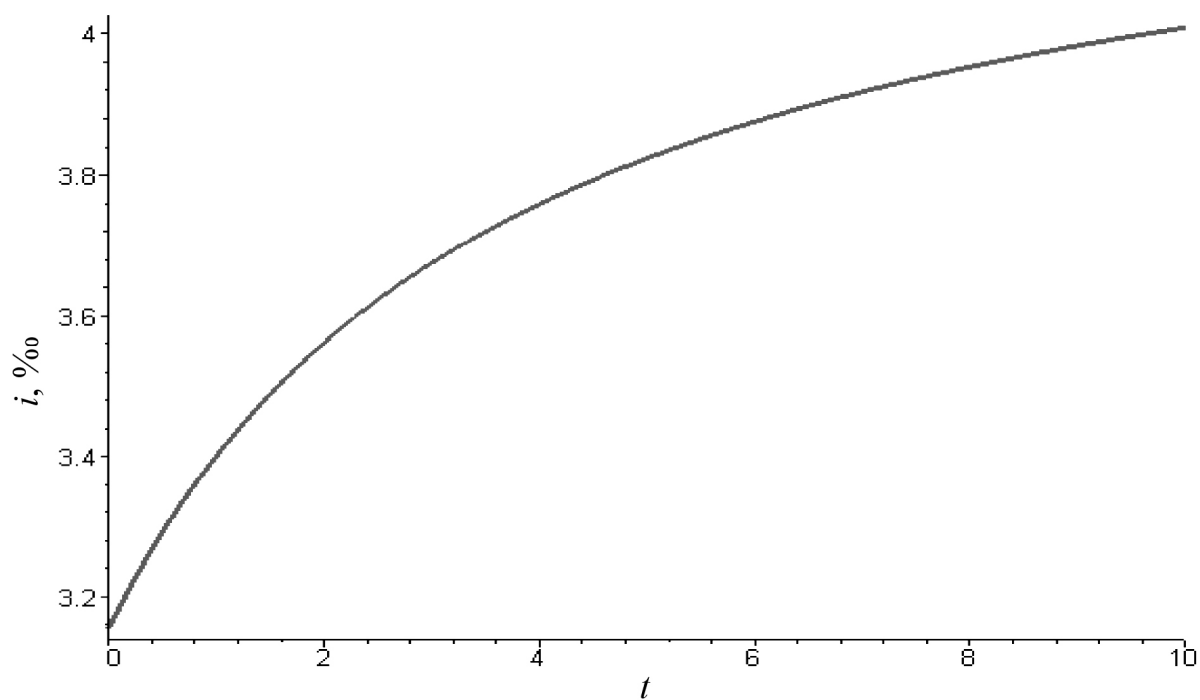


Рис. 5. Графическое представление $i(t)$

Исключив из $r(t)$ и $i(t)$ параметр t , получим зависимость $i = f(r)$, которая представлена на рис. 6.

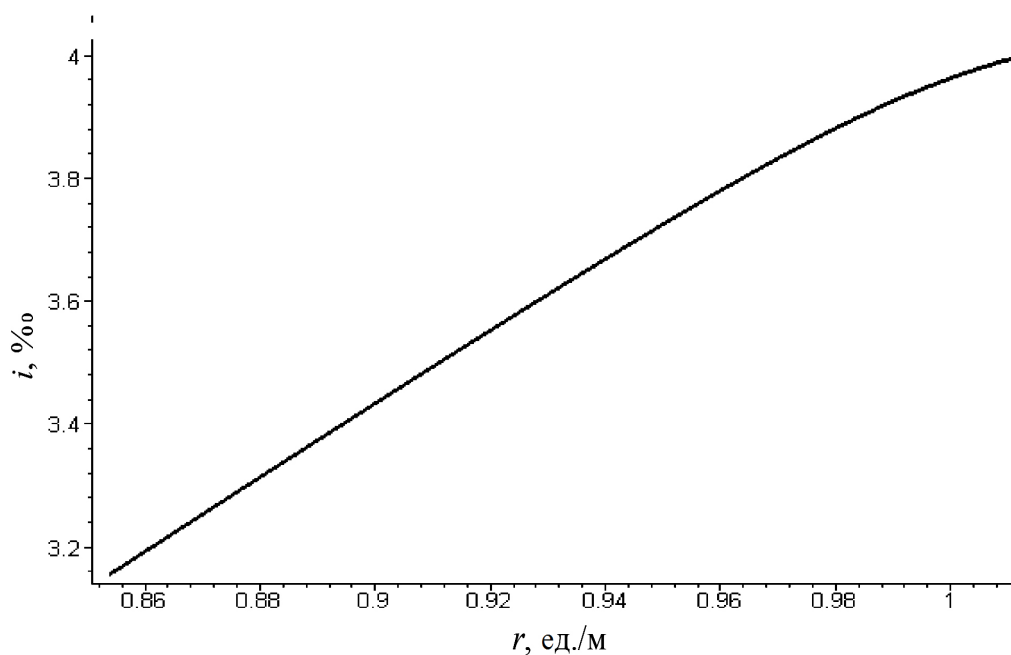


Рис. 6. Графическое представление $i = f(r)$

Из рис. 6 следует, что если плотность размещения точечных вагонных замедлителей изменяется в пределах $[0,86;1,00]$ замедлителей на метр, а соответствующие уклоны принадлежат интервалу $[3,2;4,0]$ ‰, тогда это обеспечивает рациональную связь между P и G , представленную на рис. 7.

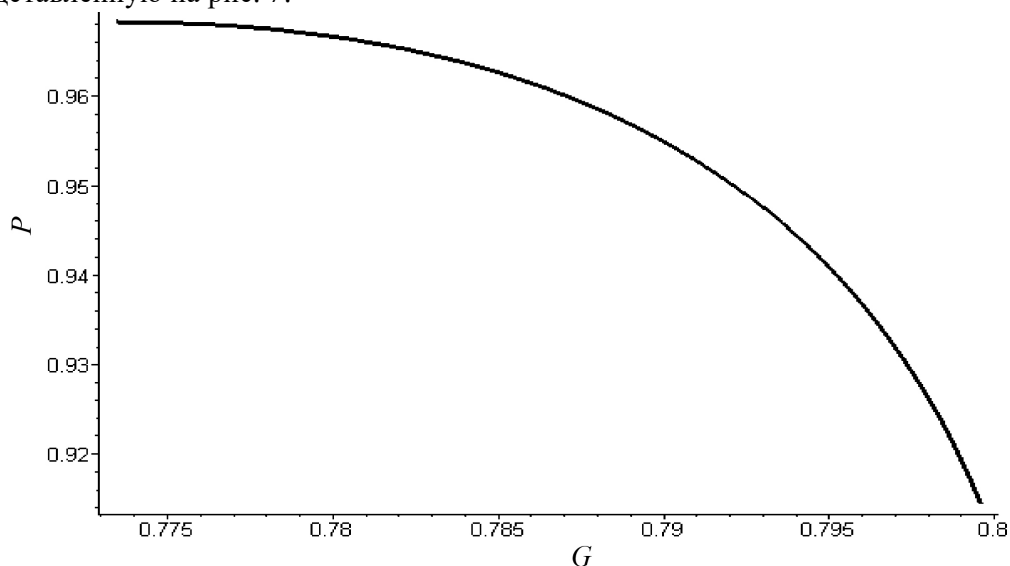


Рис. 7. Графическое представление $P = f(G)$

Полученное рациональное соотношение между P и G , показанное на рис. 7 позволяет решать следующие задачи:

1. Например: задаемся вероятностью подхода отцепов к вагонам на сортировочном пути с безопасной скоростью 0,95, тогда степень заполнения сортировочного пути вагонами будет равняться 0,792;

2. Второй пример: задаемся степенью заполнения сортировочного пути вагонами равной 0,78, тогда вероятность подхода отцепов к вагонам на сортировочном пути с безопасной скоростью получим равной 0,966.

Если подставить избранные значения в выражения (5) и (6), то достанем значение параметров системы r и i , при которых можно достичь вышеупомянутых показателей качества заполнения сортировочных путей вагонами.

Полученные зависимости позволяют определить параметры системы квазинепрерывного регулирования скорости отцепов на сортировочных путях, при которых можно достичь рационального соотношения между показателями качества заполнения вагонами сортировочных путей, оборудованных точечными вагонными замедлителями. Для достижения таких показателей уклон сортировочного пути должен быть в пределах 3,2-4,0 ‰, а плотность размещения точечных вагонных замедлителей от 0,86 до 1,0 замедлителя на метр пути.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Огарь, А. Н., Таратушка, К. В. Исследование эффективности применения технологии гравитационно-прицельного торможения отцепов. Транспортные системы и технологии перевозок: сборник научных трудов Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Днепропетровск, 2015. Выпуск 9.
2. Атаманенко, Е. Г. Регулирование скоростей при роспуске составов. Железнодорожный транспорт. 1991. No 1. С. 12-14.
3. Шелухин, В. И., Малышев, И. Н., Милехин, Д. А. Прицельное торможение отцепов на базе адаптивных алгоритмов. Автоматика, связь, информатика. 2000. No 2. С. 29-32.
4. Бобровский, В. И., Колесник, А. И. Анализ влияния параметров продольного профиля сортировочной горки на динамику скатывания отцепов. Транспортные системы и технологии перевозок: сборник научных трудов Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. – Днепропетровск. 2012. Выпуск 3. С. 10-14.
5. Нагорный, Е. В., Берестов, И. В. Эффективность применения систем автоматического регулирования конечных скоростей движения отцепов. Сборник научных трудов ХИИТа. Харьков, 1988. Выпуск 7. С. 54-58.
6. Муха, Ю. А., Харланович, И. В., Шейкин, В. П. Автоматизация и механизация переработки вагонов на станциях. Москва: Транспорт, 1985. С. 248.
7. Самсонкин, В. Н. Человеческий фактор в обеспечении безопасности железнодорожного транспорта. Железнодорожный транспорт Украины. 2000. No 5-6. С.65-67.
8. Муха, Ю. А., Бобровский, В. И. О способах повышения качества процесса заполнения сортировочных путей при расформировании составов. Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях: межвузовский сборник научных трудов ДИИТа. Днепропетровск. 1978. Выпуск 197/12. С. 38-50.
9. Zhang, C. Analysis of Over-speed Coupling Accidents on Hump based on Fuzzy Petri Net / C. Zhang, Y. Li // Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM), 2010 IEEE 17Th Intern. Conference on (29.10-31.10.2010). Xiamen: IEEE. 2010. Г. 1014-1018. doi: [10.1109/ICIEEM.2010.5646453](https://doi.org/10.1109/ICIEEM.2010.5646453).
10. Босов, А. А. Функции множества и их применение: Монография. - Днепродзержинск: Издательский дом "Андрей". 2007. 182 с.
11. Босов, А. А., Кодола, Г. Н., Савченко, Л. Н. Векторная оптимизация по двум показателям: Монография. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Днепропетровск. 2007. Выпуск 17. С. 134-138.
12. Подиновский, В. В., Ногин, В. Д. Парето-Оптимальные решения многокритериальных задач. Москва: Наука. 1982. 256 с.
13. Бобровский, В. И. Дифференциальные уравнения движения отцепа и методы их решения.

- Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 1996. No 6. С. 34-39.
14. Назаров, А. А. Анализ возможности применения систем квазинепрерывного регулирования скорости отцепов типа DOWTY на сортировочных горках. Транспортные системы и технологии: сборник научных трудов КУЭТТ. Киев, 2004. Выпуск 4. С. 61-66.
 15. Матросов, А. В. Maple 6. Решение задач высшей математики и механики. Санкт-Петербург: БХВ – Петербург. 2001. 528 с.