

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЕМ РЕМОНТА ДОРОГ

Д.Н. Федянин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: dfedyanin@inbox.ru

Д.Р. Карпухина

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: daryakarpukhina@gmail.com

Ключевые слова: транспортная система, центральность, центральность по посредничеству, управление расписанием, износ, индекс Винера.

Аннотация: Авторы рассматривают поддержание, износ и ремонт дорог в транспортной системе. На основе синтетического графа рассмотрена идея об одновременном ремонте двух важных ребер и возможность избежать такую ситуацию благодаря внесению элемента управления. На основе этой идеи предложена модель управления расписанием износа дорог в транспортной системе, устраняющая ситуацию, в которой граф города может приблизиться к ситуации распада на две компоненты вследствие нерегулируемого ремонта. Модель также приводит к существенному улучшению количества одновременно ремонтируемых дорог (сокращение на 30%) и уменьшению верхней границы индекса Винера во время процессов износа и ремонта (на 20%).

1. Введение

Наша модель, предложенная в [1], фокусируется на процессах износа дорог в мультиагентной транспортной системе (ТС) и их дальнейшего ремонта. Во время функционирования модели атрибуты графа города изменяются в соответствии с текущим состоянием ремонтных работ для каждой дороги. Ключевая идея заключается в том, что центральность ребра по посредничеству (*betweenness centrality*, BC) влияет на скорость его ухудшения, а последующие ремонтные работы влияют на вес и, следовательно, на BC. Такое взаимодействие между элементами системы, напоминающее домино, приводит к значительным последствиям для уличной сети в целом. Эта особенность транспортной системы (ТС), а точнее, взаимосвязь между частотой ремонта дорог и необходимостью дополнительных ремонтов, описана в [2]. Как подчеркивается в данной статье, ожидается, что ситуация в ТС будет ухудшаться по мере того, как ремонт дорог будет проводиться все чаще.

В данном докладе будет предложена идея стратегического управления мультиагентной ТС, заключающаяся в виртуальном изменении износа конкретной улицы с целью сохранения связности графа города и улучшения транспортной ситуации в нем.

2. Граф с двумя мостами

2.1. Подсчет центральности, введение обозначений

Рассмотрим граф, состоящий из двух клик на n и m вершинах, которые соединены двумя ребрами. Подсчитаем общее количество произвольных пар вершин в этом графе (считаем пути из α в β из β в α разными путями):

$$(1) \quad M = (n + m)(n + m - 1).$$

Общее количество произвольных пар вершин равно общему количеству кратчайших путей в графе. Подсчитаем общее количество кратчайших путей, проходящих через ребро (nn, mm) :

$$(2) \quad M_{(nn, mm)} = 2(n - 1)(m - 1) + 2.$$

Из (1) и (2) доля кратчайших путей, проходящих через ребро (nn, mm) :

$$(3) \quad c = \frac{2(n-1)(m-1)+2}{(n+m)(n+m-1)}.$$

Определим функцию износа для ребра (nn, mm) как:

$$s(t) = s(t - 1) + \alpha c,$$

где α – некоторый коэффициент, на который умножается подсчитанная вручную центральность по посредничеству (3). Отсюда получим:

$$(4) \quad s(t) = s(0) + \alpha c \cdot t.$$

Будем называть ребра $(n1, m1)$ и (nn, mm) «первый мост» и «второй мост» соответственно. Определим функции износа двух мостов как

$$\begin{cases} s_1(t) = s_1(0) + \alpha c \cdot t, \\ s_2(t) = s_2(0) + \alpha c \cdot t. \end{cases}$$

Будем считать, что известны исходные износы первого и второго моста: $s_1(0) = s_1$ и $s_2(0) = s_s$ соответственно, причем без ограничения общности будем считать, что $s_1 > s_2$. Построим графики зависимости износа от времени для обоих мостов.

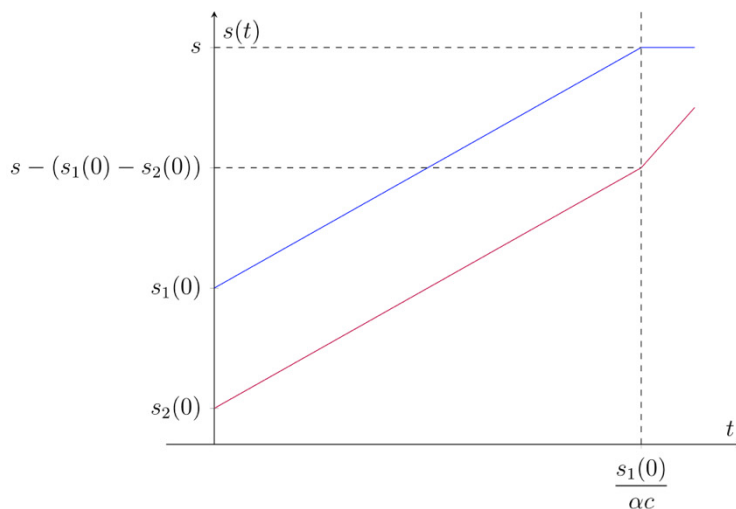


Рис. 1. Зависимость износа от времени.

В точке $(\frac{s_1(0)}{\alpha c}, s - (s_1(0) - s_2(0)))$ начинается ремонт первого моста. Будем считать, что в таком случае мост удаляется из графа. Теперь все кратчайшие пути проходят через второй мост. В силу симметрии количество кратчайших путей, проходящих через второй мост, увеличивается в два раза. Нам по очевидным причинам не очень нравится ситуация, в которой оба моста, соединяющие две части города, находятся на ремонте. Мы хотим избежать такой ситуации.

2.2. Два износа и одно время

Будем считать, что нам известно время ремонта первого моста τ_1 . В начале рассматриваемого процесса у второго моста есть некоторый запас износа: $s - s_2$.

Пока первый мост будет находиться на ремонте, второй мост износится на $2ac\tau_1$. Также он износится на act_x за время t_x , прошедшее до постановки первого моста на ремонт.

Заметим, что в начале наблюдения запас износа первого моста — это $s - s_1$, и первый мост не может износиться больше, чем этот запас. Тогда итоговое ограничение на t_x можно записать как

$$(5) \quad t_x \leq \min\left(\frac{s-s_1}{ac}, \frac{s-s_2}{ac} - 2\tau_1\right) = \frac{s - \max(s_1, s_2 + 2ac\tau_1)}{ac}.$$

2.2.1. Первый случай неравенства: $s_1 \geq s_2 + 2ac\tau_1$

Рассмотрим первый случай неравенства (5): $s_1 \geq s_2 + 2ac\tau_1 \rightarrow \tau_1 \leq \frac{s_1 - s_2}{2ac}$. В таком случае $t_x \leq \frac{s-s_1}{ac}$. Выбираем верхнюю границу, потому что нам хочется, чтобы первый мост функционировал нормально как можно дольше: $t_x = \frac{s-s_1}{ac}$.

Износ второго моста, когда первый мост встал на ремонт, равен:

$$s_2(t_x) = s_2 + \frac{s-s_1}{ac} \cdot ac = s + s_2 - s_1.$$

Второй мост встанет на ремонт через время $t_2 = \frac{s - (s + s_2 - s_1)}{2ac} = \frac{s_1 - s_2}{2ac}$ после начала ремонта первого моста. В рассматриваемом нами случае $\tau_1 \leq \frac{s_1 - s_2}{2ac}$, поэтому $\tau_1 \leq t_2$. Износ второго моста, когда ремонт первого моста завершен:

$$s_2(t_x + \tau_1) = s_2(t_x) + \tau_1 \cdot 2ac \leq s + s_2 - s_1 + \frac{s_1 - s_2}{2ac} \cdot 2ac = s.$$

То есть, $s_2(t_x + \tau_1) \leq s$, что означает, что износ второго моста в момент времени $t_x + \tau_1$ не превышает s , а значит, второй мост не попадет на ремонт до момента окончания ремонта первого моста.

2.2.2. Второй случай неравенства: $s_1 \leq s_2 + 2ac\tau_1$

Рассмотрим второй случай неравенства (5): $s_1 \leq s_2 + 2ac\tau_1 \rightarrow \tau_1 \leq \frac{s_1 - s_2}{2ac}$. В таком случае $t_x \leq \frac{s - s_2 - 2ac\tau_1}{ac}$. Выбираем верхнюю границу: $t_x = \frac{s - s_2 - 2ac\tau_1}{ac}$.

Износ второго моста к моменту окончания ремонта первого:

$$s_2(t_x + \tau_1) = s_2(t_x) + \tau_1 \cdot 2ac \geq s + s_2 - s_1 + \frac{s_1 - s_2}{2ac} \cdot 2ac = s.$$

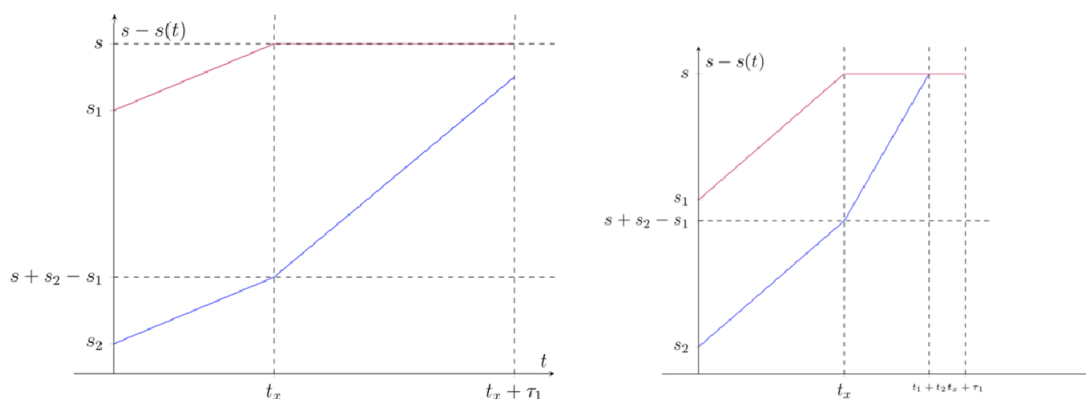


Рис. 3. Износ двух мостов при $s_1 \geq s_2 + 2ac\tau_1$ (слева) и при $s_1 \leq s_2 + 2ac\tau_1$ (справа)

2.2.1. Виртуальное увеличение износа. В случае, если $\tau_1 > \frac{s_1 - s_2}{2ac}$, мы можем виртуально увеличить s_1 , то есть заменить s_1 на s_1' : $\tau_1 \leq \frac{s_1' - s_2}{2ac} \rightarrow \tau_1 \leq \frac{s_1 - s_2}{2ac}$. Положим $s_1' = s_2 + 2ac\tau_1$.

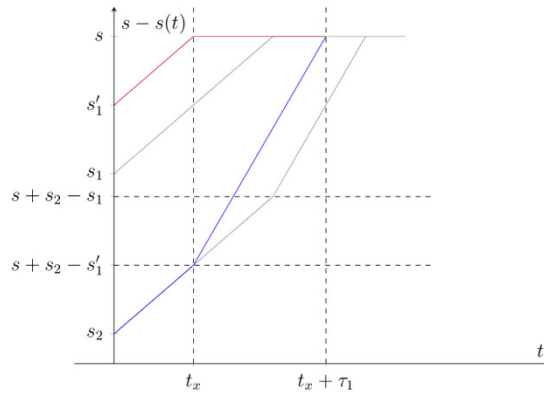


Рис. 4. Зависимость износа от времени: идея виртуального увеличения износа.

3. Результаты описанного подхода на графе Коломны

В качестве подготовительной работы найдем аналоги мостов из первого раздела на графе Коломны: это должны быть два ребра, одновременное удаление которых приводит к тому, что граф Коломны, состоявший из одной сильно связной компоненты, теперь состоит из двух сильно связных компонент.

Такие «мосты» были найдены, это участки ул. Октябрьской Революции:



Рис. 4. Участки ул. Октябрьской Революции, которые разрушают связность Коломны.

Наша цель – не допустить ситуации, в которой эти участки ремонтируются одновременно. Если это происходит, граф приближается к распадению на две компоненты. Воспользуемся идеей, описанной в первом разделе. Чтобы не допустить одновременный ремонт двух участков дороги, заранее виртуально увеличим износ одного из мостов, чтобы он начал ремонтироваться заранее, и мосты бы не ремонтировались одновременно.

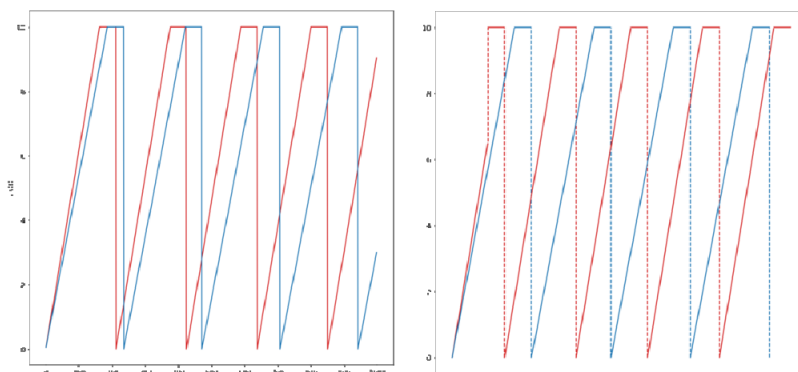


Рис. 5. Зависимость износа от времени в Коломне для двух участков ул. Октябрьской Революции: «было» и «стало».

В результате предложенной идеи о виртуальном изменении износа одного из участков действительно получилось избежать ситуации, в которой город близок к распаду на две компоненты.

Также рассмотрим, что произошло с системой в целом: заметим, что максимальное количество дорог на ремонте за время работы системы уменьшилось. Все еще присутствует циклический характер колебаний в графике количества дорог на ремонте от времени, но при этом общая тенденция роста менее заметна.

В процессе работы был также подсчитан индекс Винера для Коломны до внесенных изменений в график ремонта и после. В режиме ремонта без вмешательства индекс Винера колеблется от $2.4 \cdot 10^9$ до $4.0 \cdot 10^9$, а в режиме ремонта с вмешательством (с виртуальным увеличением износа) верхняя граница индекса Винера на протяжении того же времени снижается до $3.2 \cdot 10^9$, это сокращение на 20%, что можно считать существенным результатом.

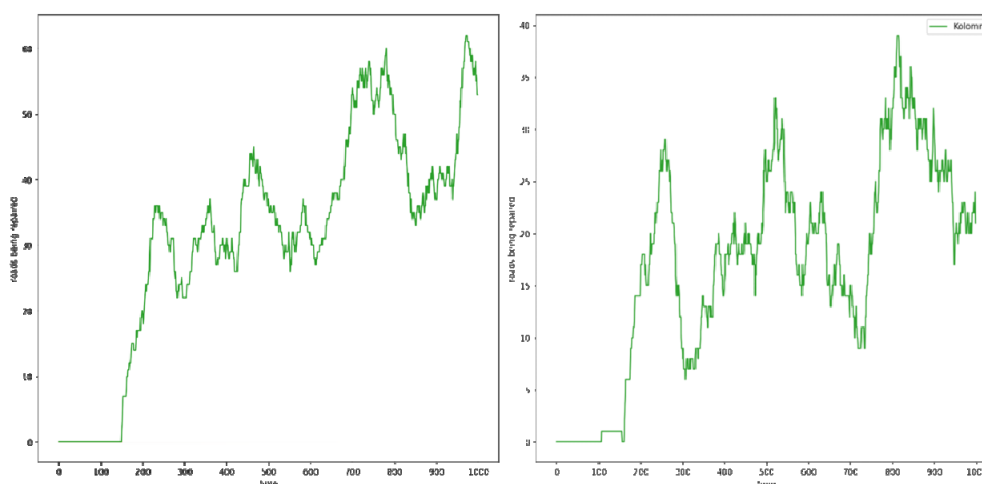


Рис. 6. Зависимость количества дорог на ремонте в Коломне: «было» и «стало».

4. Заключение

На основе идеи, предложенной для синтетического графа, были получены хорошие результаты для графа реального города (Коломна). Модель, описанная в [1], приближена к реальности, внесен элемент управления, заключающийся в постоянном отслеживании состояния дорог и виртуальном изменении износа дорог для того, чтобы избежать одновременный ремонт двух дорог, разбивающих граф города на две компоненты.

Список литературы

1. Karpukhina D., Fedyanin D. Centrality for Modeling Greedy Algorithms of Road Maintenance // 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk, Russian Federation, 2023. P. 888-893. doi: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349548.
2. Sabri M.I.S.A., Sarif A.S. Analysis of Pavement Maintenance Using Geographical Information System (GIS) // Progress in Engineering Application and Technology. 2023. P. 942-948.
3. Dall'Asta L., et al. Vulnerability of Weighted Networks // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. 2006. No. 04. P. 04006.
4. Leung I.X.Y., et al. Intra-city Urban Network and Traffic Flow Analysis from GPS Mobility Trace. arXiv preprint arXiv:1105.5839. 2011.
5. Wang H., Hernandez J. M., Van Mieghem P. Betweenness Centrality in a Weighted Network // Physical Review E. 2008. Vol. 77, No. 4. P. 046105.
6. Henry E., et al. Spatio-temporal Correlations of Betweenness Centrality and Traffic Metrics // 2019 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS). IEEE, 2019. P. 1-10.