

УЧЕТ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ AGV ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ НА СКЛАДЕ

С.А. Евдокимова¹, Т.П. Новикова²

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных
технологий»

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

В статье рассматривается задача построения оптимального маршрута движения устройств AGV на складе по критерию минимизации времени перемещения. Во время движения автоматических тележек могут возникать конфликтные ситуации из-за непредвиденных остановок или столкновений с препятствиями. В работе приводится математическая формулировка ограничений, которые накладываются на перемещения AGV, предотвращающие столкновения.

Ключевые слова: AGV средства, маршрут движения, математическая модель, задача оптимизации, система ограничений.

CONSIDERATION OF AGV COLLISION AVOIDANCE WHEN PLANNING A ROUTE IN A WAREHOUSE

S.A. Evdokimova¹, T.P. Novikova²

¹Voronezh State University of Engineering Technologies

²Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

The article considers the problem of constructing an optimal route for AGV devices in a warehouse based on the criterion of minimizing travel time. Conflict situations may arise during the movement of automatic trolleys due to unforeseen stops or collisions with obstacles. The paper

provides a mathematical formulation of the constraints that are imposed on AGV movements that prevent collisions.

Key words: AGV vehicles, driving route, mathematical model, optimization problem, constraint system.

Автоматически управляемые транспортные средства AGV предназначены для перемещения материалов и товаров на производстве и складах по заранее проложенным путям, они самостоятельно ориентируются в пространстве с помощью различных датчиков и систем навигации [1-4]. Их применение позволяет значительно повысить эффективность производственных и логистических процессов [5-8]. Однако при движении нескольких AGV в ограниченном пространстве возможны их остановки из-за столкновений с препятствиями или друг с другом [9, 10]. Поэтому задача учета предотвращения столкновений при планировании маршрута движения является актуальной задачей.

Целью AGV-маршрутизации является минимизация времени перемещения от начального узла к конечному [2, 6, 9]. Тогда модель оптимизации AGV-маршрутизации может быть сформулирована следующим образом:

$$\min \sum_{(s_1, s_2) \in G} (\mu_{s_1, s_2}^v \times t_{s_1, s_2}), \forall s_1, s_2 \in N, \forall v \in V \quad (1)$$

где v – индекс AGV, $v \in V$;

s – индекс узлов пространства, по которому перемещаются AGV, $s \in N$ (рисунок 1);

μ_{s_1, s_2}^v определяется как

$$\mu_{s_1, s_2}^v = \begin{cases} 1, & \text{если AGV } v \text{ проходит через путь от узла } s_1 \text{ к узлу } s_2, (s_1, s_2) \in N; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

t_{s_1, s_2} – время прохождения AGV от узла s_1 к узлу s_2 , $(s_1, s_2) \in N$.

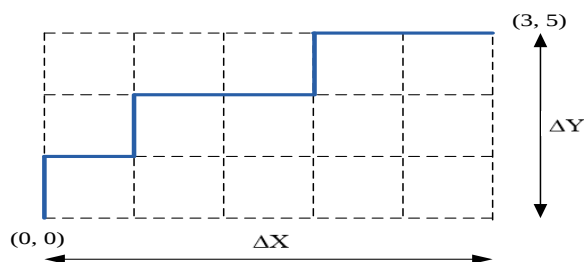


Рисунок 1 – Представление плоскости производственного помещения

Рассмотрим возможные конфликтные ситуации на пути следования AGV и математически опишем их. Конфликт узлов может возникнуть из-за того, что в узел одновременно прибывает более одного AGV (рисунок 2).

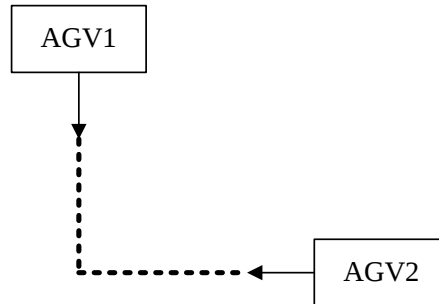


Рисунок 2 – Конфликтная ситуация – в один узел прибывают два AGV

Требование, что каждый узел может быть занят только одним AGV, запишем как:

$$\sum_{v=1}^V z_{st}^v \leq 1, \forall s \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (2)$$

где переменная z_{st}^v определяется как

$$z_{st}^v = \begin{cases} 1, & \text{если AGV } v \text{ занимает узел } s \text{ время } t; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Если двум средствам AGV требуется проехать перекресток (рисунок 3), т.е. два средства движутся по свободным дугам и дальнейшее их перемещение не приводит к конфликту, но нужно проехать общий узел, без остановок.

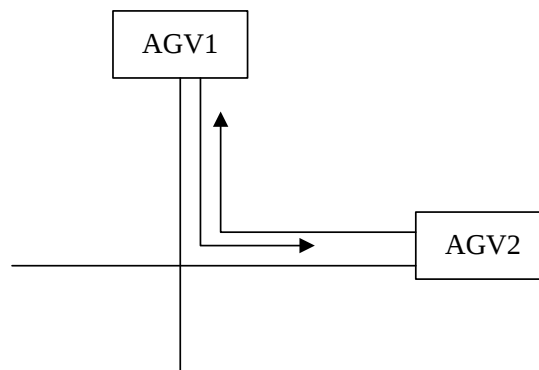


Рисунок 3 – Конфликтная ситуация на перекрестке

В этой ситуации есть два возможных варианта избежать остановки:

- одно AGV ждет другое средство AGV, не выезжая в узел;
- одно AGV изменяет путь движения, и перемещается другим маршрутом.

Пусть AGV₁ и AGV₂ подъезжают к одному узлу s_2 (рисунок 3), тогда математическая модель такой ситуации запишется как:

$$\text{если } W_{s_1 s_2 t}^{v_1} \cdot W_{s_3 s_2 t}^{v_2} = 1, \text{ то } A_{s_2 s_3 (t+t_{s_3 s_2})} = 1, \quad (3)$$

$$s_1, s_2, s_3 \in \{1, 2, \dots, N\}, s_1 \neq s_2 \neq s_3, v_1, v_2 \in \{1, 2, \dots, V\}, v_1 \neq v_2.$$

Переменные $W_{s_1 s_2 t}^v$ и $A_{s_1 s_2 t}$ определяются как

$$W_{s_1 s_2 t}^v = \begin{cases} 1, & \text{если AGV } v \text{ занимает путь } s_1 \text{ до соседнего узла } s_2 \text{ время } t, s_1 \neq s_2; \\ 0, & \text{если другие AGV проходят в другом направлении этого пути.} \end{cases}$$

$$A_{s_1 s_2 t} = \begin{cases} 1, & \text{если путь от } s_1 \text{ до соседнего узла } s_2 \text{ составляет } t, s_1 \neq s_2; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Из двух AGV, которые подъезжают к перекрестку, пусть AGV₁ находится ближе к узлу s_2 и поворачивает на соседний путь с AGV₂.

Предположим, что время, затраченное первоначальным оптимальным маршрутом на достижение конечного узла, равно t , общее время ожидания автомобиля на перекрестке равно Δt , а время, необходимое для замены неоптимального маршрута, равно t' . Неоптимальный в данной ситуации путь должен также учитывать проблему конфликта путей. Поэтому данную стратегию оптимизации пути приведем к локальной задаче оптимизации.

Оптимальное решение без учета конфликтных путей определяется как

$$t + \Delta t \geq \min[t', t'', t''', \dots, t^n], \quad (4)$$

т.е. время перемещения по новому пути должно быть меньше времени ожидания.

На новом пути также могут возникнуть конфликтные ситуации, т.е. появляется рекурсивная процедура определения наилучшего пути перемещения. Рекурсивная функция для планирования определения кратчайшего пути для AGV будет выглядеть как

$$t + \sum \Delta t \leq \min[t' + \sum \Delta t', t'' + \sum \Delta t'', t''' + \sum \Delta t''', \dots] \quad (5)$$

Предполагается, что кратчайший путь AGV от узла s к узлу s' необходимо пройти через n узлов, которые будут встречаться в процессе движения, тогда AGV столкнется не более чем с $n+1$ конфликтом путей того же типа, когда достигнет узла s' , и ему необходимо определить, следует ли каждый раз выбирать второй наилучший путь.

Следовательно, время ожидания конфликта второго наилучшего пути будет одинаково

$$\sum \Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n. \quad (6)$$

Таким образом, необходимо сравнить время перемещения и время ожидания неоптимального маршрута. Если выполняется неравенство (5), то следует выбрать оптимальный маршрут; иначе – неоптимальный маршрут.

Для вида конфликтной ситуации, показанной на рисунке 4, необходимо для AGV, который первым прибудет на перекресток, изменить маршрут и найти оптимальный путь, доступный для замены.

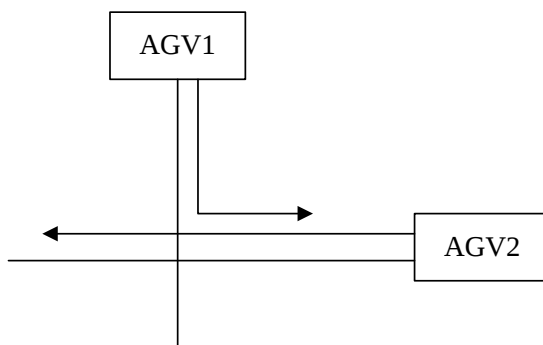


Рисунок 4 – Конфликтная ситуация на пересечении путей

Пусть AGV_1 находится ближе к конфликтному узлу s_2 , тогда маршрут следует скорректировать следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Если } W_{s_1 s_2 t}^{v_1} \cdot W_{s_3 s_2 t}^{v_2} = 1, A_{s_2 s_1(t+t_{s_1 s_2})} = 1, A_{s_2 s_3(t+t_{s_1 s_2})} = 0, \\ \text{то } A_{s_2 s_4(t+t_{s_1 s_2})} + A_{s_2 s_5(t+t_{s_1 s_2})} \geq 1, \end{aligned} \quad (7)$$

$$s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 \in \{1, 2, \dots, N\}, s_1 \neq s_2 \neq s_3 \neq s_4 \neq s_5,$$

$$s_2 \text{ прилегающий узел к } s_1, s_3, s_4, s_5, v_1, v_2 \in \{1, 2, \dots, V\}, v_1 \neq v_2.$$

Выражение $W_{s_1 s_2 t}^{v_1} \cdot W_{s_3 s_2 t}^{v_2}$ показывает, что пути от узла s_1 к узлу s_2 и от узла s_3 к узлу s_2 заняты AGV_1 и AGV_2 соответственно.

Равенство $A_{s_2 s_1(t+t_{s_1 s_2})} = 1$ означает, что после времени $t_{s_1 s_2}$ первым пойдет AGV_1 к узлу s_2 , а AGV_2 будет занимать путь от узла s_3 к узлу s_2 .

Неравенство $A_{s_2 s_4(t+t_{s_1 s_2})} + A_{s_2 s_5(t+t_{s_1 s_2})} \geq 1$ означает, что только один из двух путей к узлу s_2 доступен.

Если конфликтный узел s_2 на рисунке 2 имеет только три смежных узла, т.е. на Т-образном соединении возникает взаимоблокировка, то математическая модель корректировки будет следующая:

$$\text{Если } W_{s_1 s_2 t}^{v_1} \cdot W_{s_3 s_2 t}^{v_2} = 1, A_{s_2 s_1(t+t_{s_1 s_2})} = 1, A_{s_2 s_3(t+t_{s_1 s_2})} = 0,$$

$$\text{то } A_{s_2 s_4(t+t_{s_1 s_2})} + A_{s_2 s_5(t+t_{s_1 s_2})} \geq 1, \quad (8)$$

$$s_1, s_2, s_3, s_4 \in \{1, 2, \dots, N\}, s_1 \neq s_2 \neq s_3 \neq s_4,$$

$$s_2 \text{ прилегающий узел к } s_1, s_3, s_4, v_1, v_2 \in \{1, 2, \dots, V\}, v_1 \neq v_2.$$

Соотношения (7) и (8) обеспечивают возможность корректировки конфликтов, показанных на рисунках 2 и 3. Если (7) и (8) верны, то самый ранний AGV, прибывающий на конфликтный узел, может выбрать ожидание на свободном пути, пока не освободится исходный путь, или выбрать второй наилучший путь.

Конкретные схемы корректировки отражаются в формуле (5). Если отношения (7) и (8) неверны, то возникшая ситуация является неустранимой, как и в случае с рисунком 5.



Рисунок 5 – Конфликтная ситуация – движение по одной дуге

Если путь занят AGV, то этот путь не позволяет одновременно въезжать AGV в противоположном направлении. Поскольку AGV в системе движутся с одинаковой скоростью, то двум AGV, движущимся в одном направлении, разрешается двигаться по одному и тому же пути.

Для гарантии, что несколько AGV могут двигаться в одном направлении по одному и тому же пути, и что двум или более AGV не разрешается двигаться в одном направлении по одному и тому же пути, должно выполняться условие:

$$\text{Если } W_{s_1 s_2 t}^{v_1} = 1, \text{ то } W_{s_1 s_2 t}^{v_2} = 1, W_{s_2 s_1 t}^{v_3} = 0, \quad (9)$$

$$s_1, s_2 \in \{1, 2, \dots, N\}, s_1 \neq s_2, v_1, v_2, v_3 \in \{1, 2, \dots, V\}, v_1 \neq v_2 \neq v_3.$$

Для предотвращения движения двух AGV по одному участку пути в противоположном или том же направлении следует сделать недоступным данный участок пути. Другие AGV должны ждать или изменить маршрут движения. Для этого весь путь L делится на две части: набор временных окон простоя F_L и набор временных окон резервирования R_L , которые математически записываются как:

$$F_L = \left\{ f_g = [a_g, b_g] \right\}, \quad (10)$$

где f_g – период времени простоя;

g – индекс периода простоя, начиная с момента a_g до момента b_g ;

$$R_L = \left\{ r_g = [c_g, d_g] \right\}, \quad (11)$$

где r_g – период времени резервирования;

g – индекс периода резервирования, начиная с момента времени c_g до момента времени d_g .

Таким образом, при перемещении AGV могут возникнуть конфликтные ситуации (рисунки 2-5), предотвращение которых в математической модели поиска минимума функции (1) учитывается с помощью соотношений (2)-(11). Для определения минимального пути между двумя узлами использовались классические алгоритмы Йена и Дейкстры.

Список литературы

1. Евдокимова, С.А. Особенности автоматизации склада на базе WMS / С.А. Евдокимова, А.А. Вострикова // Информатика: проблемы, методы, технологии : материалы XXIV Международной научно-практической конференции. – Воронеж, 2024. – С. 993-997.
2. Digital-Twin-Driven AGV Scheduling and Routing in Automated Container Terminals / P. Lou [et al.] // Mathematics. – 2023. – Vol. 11. – С. 2678.
3. Евдокимова, С.А. Модель процессов при автоматизации склада на основе IoT и WMS / С.А. Евдокимова, А.И. Гончарова // Моделирование информационных систем и технологий : материалы Международной научно-практической конференции. - Воронеж, 2024. - С. 304-310.
4. Новикова, Т.П. Исследование применимости PERT метода к процессу управления проектами дизайн-центра микроэлектроники / Т.П. Новикова, С.А. Евдокимова, А.И. Новиков // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 77-85.
5. Выбор критерия оптимальности при принятии управленческих решений в сложных технических системах / А.В. Скрыпников [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 1. – С. 120-128.
6. Новикова, Т.П. Математическая модель интермодальных грузовых перевозок / Т.П. Новикова, С.А. Евдокимова, А.И. Новиков // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 2. – С. 62-70.
7. Евдокимова, С.А. Алгоритм анализа клиентской базы торговой организации / С.А. Евдокимова, Т.П. Новикова, А.И. Новиков // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 24-35.

8. Новикова, Т.П. Разработка и исследование базовой модели PERT для планирования работ по проекту / Т.П. Новикова, С.А. Евдокимова, А.И. Новиков // Моделирование систем и процессов. – 2021. – Т. 14, № 4. – С. 75-81.

References

1. Evdokimova, S.A. Features of warehouse automation based on WMS / S.A. Evdokimova, A.A. Vostrikova // Informatics: problems, methods, technologies : proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference. – Voronezh, 2024. – Pp. 993-997.

2. Digital-Twin-Driven AGV Scheduling and Routing in Automated Container Terminals / P. Lou [et al.] // Mathematics. – 2023. – Vol. 11. – C. 2678.

3. Evdokimova, S.A. A process model for warehouse automation based on IoT and WMS / S.A. Evdokimova, A.I. Goncharova // Modeling of information systems and technologies : proceedings of the International Scientific and Practical Conference. – Voronezh, 2024. – Pp. 304-310.

4. Novikova, T.P. Investigation of the applicability of the PERT method to the project management process of the microelectronics design center / T.P. Novikova, S.A. Evdokimova, A.I. Novikov // Modeling of systems and processes. – 2022. – Vol. 15, No. 1. – Pp. 77-85.

5. Choosing the optimality criterion when making managerial decisions in complex technical systems / A.V. Skrypnikov [et al.] // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 1. – Pp. 120-128.

6. Novikova, T.P. Mathematical model of intermodal freight transportation / T.P. Novikova, S.A. Evdokimova, A.I. Novikov // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – Pp. 62-70.

7. Evdokimova, S.A. Algorithm for analyzing the customer base of a trade organization / S.A. Evdokimova, T.P. Novikova, A.I. Novikov // Modeling of systems and processes. – 2022. – Vol. 15, No. 1. – Pp. 24-35.

8. Novikova, T.P. Development and research of the basic PERT model for project planning / T.P. Novikova, S.A. Evdokimova, A.I. Novikov // Modeling of systems and processes. – 2021. – Vol. 14, No. 4. – Pp. 75-81.