

## Исследование устойчивости импульсных процессов в системе реализации металлопроката

*О.И. Горбанева, И.И. Князев*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В статье построена когнитивная карта организации, деятельность которой связана с реализацией продукции металлопроката. Построенная карта исследуется при помощи анализа импульсных процессов, возникающих в построенной системе. Предполагается, что на систему могут воздействовать такие случайные факторы, как экономические и социальные кризисы, примерами которых могут послужить локдаун во время пандемии, военные действия в стране, санкции и тд., а также погодные условия, которые хоть и случайны но в большей степени являются более предсказуемыми, чем экономико-социальные катаклизмы. Процессы исследуются на импульсную и абсолютную устойчивость. Анализируются возможности повышения устойчивости в системе. Предлагаются способы повышения устойчивости в системе с целью сохранения прибыли в предприятии реализации металлопроката.

**Ключевые слова:** когнитивная карта, система реализации металлопроката, социально-экономические катаклизмы, погодные условия, импульсные процессы, импульсная устойчивость, абсолютная устойчивость, лепестковая последовательность, характеристический многочлен, положительные и отрицательные циклы.

### Введение

В статье описывается построение когнитивной карты системы реализации металлопроката. Организация получает доход от реализации металлических изделий, которые покупает у производителя. Спрос покупателей на продукцию данной организации зависит от многих факторов, таких, как погодные условия, экономическая и социальная ситуация в местности. Статья посвящена анализу последствий влияния вышеперечисленных условий на прибыль организации, а также анализу возможностей устранить эти последствия. При помощи построения импульсных процессов и их анализа доказывается, что в рассматриваемой системе нет импульсной и абсолютной устойчивости, но ее можно добиться, изменив знак одной дуги в когнитивной карте. Предлагается два способа повышения устойчивости в системе и обосновывается один из них как более предпочтительный.

---

## Обзор литературы

Впервые математическое моделирование было применено к задачам, связанным с системой металлопроката в [1]. В данной статье проведен теоретический анализ методов оптимизации затрат на производство продукции системы металлопроката. В [2,3] описано развитие методов математического моделирования, которые в дальнейшем можно применить к решению данной проблемы, а именно в пункте [2] описано применение метода FMEA, в пункте [3] описано применение казуальных графовых методов. В [4,5] описан метод когнитивного моделирования, который применяется ко многим задачам, в том числе к задачам, связанным с изготовлением и продажей изделий металлопроката. В [6-8] описан опыт построения экспертных систем, связанных с некоторым сложными структурами, включая систему металлопроката.

## Постановка задачи

Пусть имеется организация, которая реализует продукцию металлопроката. То есть, рассматриваемая организация занимается реализацией некоторых металлических изделий, которые закупает у поставщиков и доставляет при помощи перевозчиков либо к себе на склад, либо сразу напрямую к заказчику. Для фирмы предпочтительнее, если в момент поступления заказа от клиента имеющийся товар имеется в наличии на складе. В противном случае, чтобы не потерять заказ, фирма должна организовать в счет дополнительных средств закупку товара у поставщика и перевозку его клиенту. Но при этом возникают дополнительные сложности. Имеется ли в данный момент этот товар у поставщика? Имеются ли свободные транспортные средства у перевозчика? Удастся ли привезти товар в срок? Есть ли экономический эффект от затраченных на это усилий? Конечно, лучше, чтобы товар уже имелся на складе. Но в таком случае нужно периодически пополнять склады товарами в соответствии со спросом

клиентов. Но спрос далеко не постоянен и зависит от некоторых факторов, в том числе от сезона, от погодных условий, от социально-экономических условий, сложившихся на данный момент в регионе.

### **Когнитивная карта системы реализации металлопроката**

Используя описанное, составим когнитивную карту системы металлопроката.

Система металлопроката нацелена на получение прибыли от продажи металлических изделий. Но эта прибыль зависит от следующих факторов, каждый из которых будет представлять элемент системы. В первую очередь прибыль металлопроката напрямую зависит от покупательского спроса. Он зависит от природных и социально-экономических условий. Все остальные факторы подчинены именно ему; а именно: количество товаров на складе, количество имеющегося товара у поставщиков, имеющийся у перевозчика свободный транспорт. То есть, когнитивная карта состоит из 7 элементов:

1. Прибыль организации (Организация).
2. Количество товара на складах (Склад).
3. Спрос покупателей (Покупатели).
4. Количество нужного товара к поставщиков (Поставщики).
5. Количество свободного транспорта у перевозчиков (Перевозчики).
6. Погодные условия.
7. Социо-экономические условия.

Определим связи между ними в виде однонаправленных дуг, которые имеют начало и конец. Положительную связь на рисунке 1 будем обозначать знаком «плюс», отрицательную – знаком «минус». Положительная связь будет означать следующую закономерность: чем больше значение начальной вершины, тем больше значение конечной вершины. И наоборот: чем меньше значение начальной вершины, тем меньше значение конечной вершины.

---

Соответственно, отрицательная связь будет означать противоположную закономерность: чем больше значение начальной вершины, тем меньше значение конечной вершины. И наоборот: чем меньше значение начальной вершины, тем больше значение конечной вершины.

Определим возможные связи в системе и их характер. Чем теплее и суше погода, тем больше люди занимаются строительством. И наоборот. Значит, между погодными условиями и спросом покупателей связь положительная. Аналогично и с социально-экономическими условиями. Чем лучше экономическая ситуация в стране, тем лучше живут люди, тем чаще они занимаются строительством и покупают нужные им изделия металлопроката. Значит, между социально-экономическими условиями и спросом покупателей связь также положительная. Но чем лучше природные и экономические условия, тем лучше экономическое положение поставщиков и перевозчиков, тем меньше нужных изделий на складе поставщиков (другие клиенты раскупили) и тем меньше свободного транспорта у перевозчиков (возят для других клиентов). Соответствующие связи отрицательны. Чем больше спрос покупателей, тем меньше товара на складе фирмы. Связь между данными вершинами отрицательная. Но чем больше товара на складе, тем больше вероятность его быстро продать и тем больше прибыли фирме, поэтому связь от вершины «Склад» к вершине «Товар» положительная. Кроме того, чем больше товаров на складе, тем больше покупателей будет обслужено, то есть связь от склада к покупателям положительная. Чем больше прибыль фирмы, тем больше товаров можно завести на склад (связь положительная). Чем больше товара на складе, тем меньше нужен товар поставщика и транспорт перевозчика, соответствующие связи отрицательны, но чем больше товара на складе поставщика и чем больше свободного транспорта у перевозчика, тем больше товара на склад фирмы металлопроката можно привезти.

---

Соответствующая когнитивная карта изображена на рисунке 1.

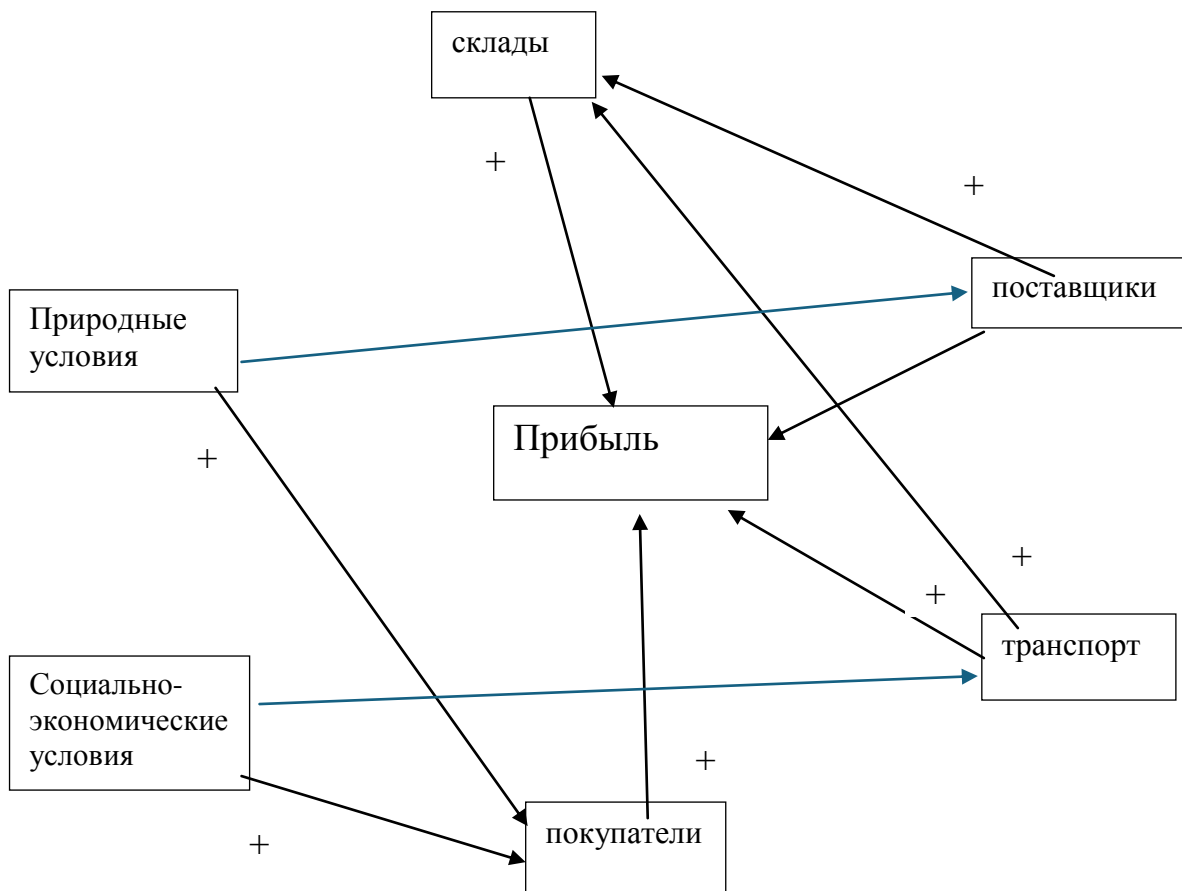


Рис. 1. – Когнитивная карта системы металлопроката

### Исследование когнитивной карты на устойчивость

Для исследования данной когнитивной карты на устойчивость выпишем все циклы в полученной когнитивной карте и их знаки. Знаком цикла является произведение знаков ребер, входящих в него.

В системе 6 циклов:

- 1) Склад – Прибыль – Склад. Цикл содержит два положительных ребра, поэтому знак этого цикла: «+».
- 2) Склад – Покупатель – Склад. Цикл содержит одно положительное, одно отрицательное ребро, поэтому знак цикла «-».
- 3) Склад – Поставщик – Склад. Цикл содержит одно положительное, одно отрицательное ребро, поэтому знак цикла «-».

- 4) Склад – Перевозчик – Склад. Цикл содержит одно положительное, одно отрицательное ребро, поэтому знак цикла «-».
- 5) Склад – Перевозчик – Прибыль – Склад. Цикл содержит два положительных ребра, одно отрицательное, поэтому знак цикла «-».
- 6) Склад – Поставщик – Прибыль – Склад. Цикл содержит два положительных ребра, одно отрицательное, поэтому знак цикла «-».

Несмотря на то, что целью организации является повышение прибыли организации реализации металлопроката, не «Прибыль» является ключевой вершиной в карте, а «Склад». Именно вершина «Склад» входит в каждый цикл. А так как «Склад» и «Прибыль» связываются положительным ребром, то для максимизации прибыли надо наладить работу склада.

Вершины «Природные условия» и «Социально-экономические условия» не входят ни в один цикл. Кроме того, они и задают возмущения в системе. Они будут входными для задания импульсов. Учитывая это, можно убрать эти две вершины для определения устойчивости оставшегося графа, изображенного на рисунке 2.

Рассмотрим различные критерии определения устойчивости когнитивной карты.

- 1) Итак, имеется 6 циклов. Из них 5 отрицательных. Чем больше отрицательных циклов, тем устойчивее система. Система устойчива на  $5/6$ , или примерно на 83%. То есть, система существенно устойчива.
- 2) По критерию В.А. Светлова нужно сложить знаки всех циклов системы:

$$R=1-1-1-1-1-1=-4<-1$$

Система неустойчива, но бесконфликтна.

3) Через анализ характеристических значений. Для этого сначала составим матрицу смежности, затем найдем ее собственные значения и применим теоремы для ее анализа.

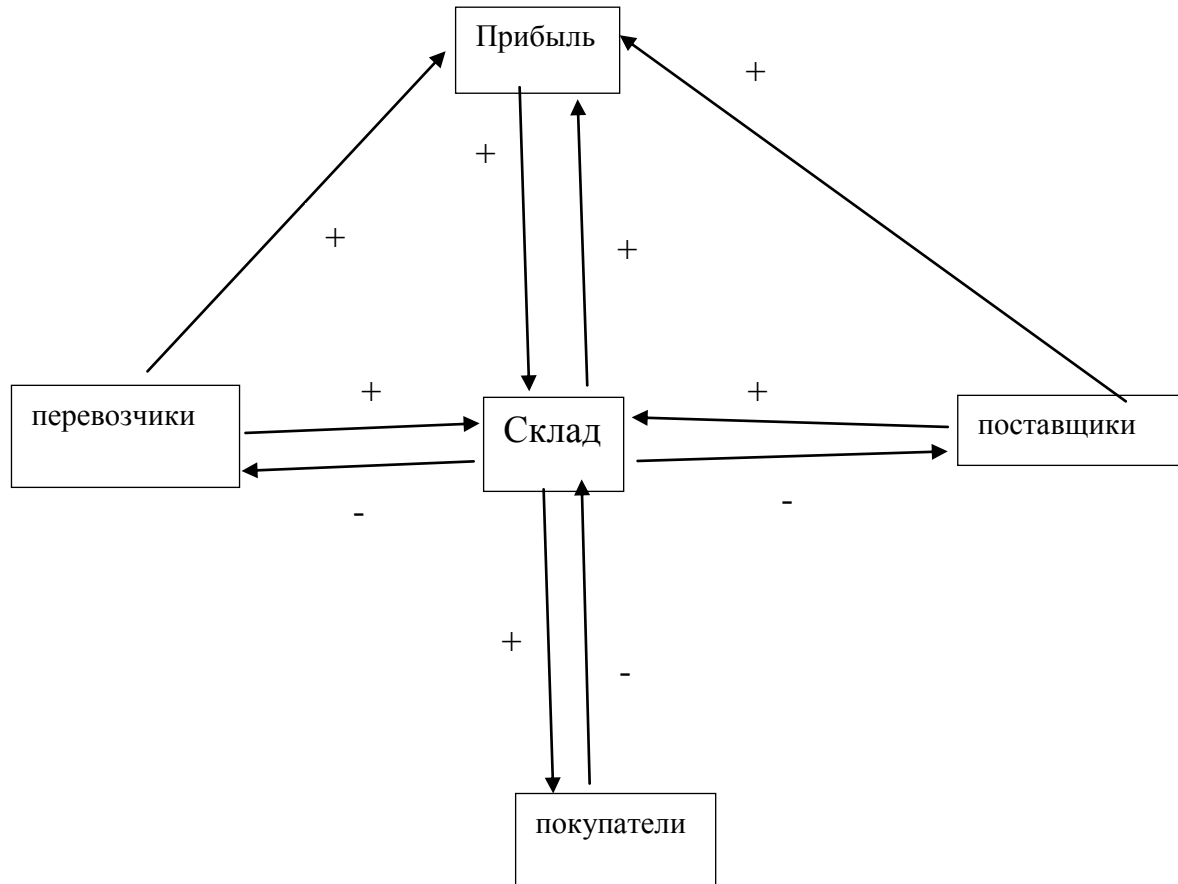


Рис. 2. – Уточненная когнитивная карта

Пронумеруем вершины. 1 - Склады, 2 – Прибыль, 3 – Поставщики, 4 – Покупатели, 5 – Перевозчики.

$$W = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Составим матрицу  $W - \lambda E$ :

$$W - \lambda E = \begin{pmatrix} -\lambda & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -\lambda & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -\lambda & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & -\lambda \end{pmatrix}$$

Найдем определитель полученной матрицы, разложив его, допустим, по последнему столбцу (сейчас и далее):

$$\begin{aligned} W - \lambda E &= \begin{vmatrix} -\lambda & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -\lambda & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -\lambda & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & -\lambda \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -\lambda & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -\lambda & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -\lambda \\ -1 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} - \\ & -\lambda \begin{vmatrix} -\lambda & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -\lambda & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -\lambda & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -\lambda \end{vmatrix} = \lambda \begin{vmatrix} 1 & -\lambda & 0 \\ -1 & 1 & -\lambda \\ -1 & 1 & 0 \end{vmatrix} - \lambda \begin{vmatrix} 1 & -\lambda & 0 \\ -1 & 1 & -\lambda \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} + \\ & + \lambda^2 \begin{vmatrix} -\lambda & 1 & 1 \\ 1 & -\lambda & 0 \\ -1 & 1 & -\lambda \end{vmatrix} = \lambda(-\lambda^2 + \lambda) - \lambda^3 + \lambda^2(-\lambda^3 + 1) = \lambda^2(-\lambda^3 - 2\lambda + 2) \end{aligned}$$

Получили характеристический многочлен, для нахождения характеристических значений которого нужно найти его корни. Для устойчивости когнитивной карты для всех простых импульсных процессов все его значения должны не превышать по модулю единицу.

$$\lambda^2(-\lambda^3 - 2\lambda + 2) = 0$$

Отсюда  $\lambda_{1,2} = 0$ , для оценки остальных значений можно воспользоваться следствием к использованной к теореме, в котором говорится о том, что «если оргграф с целочисленными весами дуг импульсно устойчив для всех простых импульсных процессов, то каждое ненулевое собственное значение по модулю равно единицы. Процесс определения импульсной устойчивости в системе описан в [9,10].



Рассмотрим уравнение  $f(-\lambda) = -\lambda^3 - 2\lambda + 2 = 0$ . Так как  $f(0)=2$ , а  $f(1)=-1$ , то между 0 и 1 содержится корень, значит условие к следствию теоремы не выполняется. Следовательно, рассматриваемая когнитивная карта не обладает импульсной устойчивостью для всех простых импульсных процессов, а следовательно, она не обладает и абсолютной устойчивостью для всех простых импульсных процессов.

4) Заметим, что рассматриваемый граф является обобщенной розеткой, так как имеется вершина, через которую проходят через все циклы – Склады. Составим лепестковую последовательность, элементы которой равны сумме знаков в циклах определенной длины.

В графе нет петель, значит  $a_1 = 0$ , имеется четыре цикла длины 2, поэтому  $a_2 = -1 + (-1) + (-1) + 1 = -2$ , два цикла длины 3, поэтому  $a_3 = -1 + (-1) = -2$ . Так как больше циклов нет, то  $s=3$ , где  $s$  – последний ненулевой элемент лепестковой последовательности. То есть, лепестковая последовательность имеет вид  $(0, -2, -2)$ . Для того, чтобы обобщенная розетка была импульсно устойчивой, нужно, чтобы:  $a_3 = \pm 1$ ,  $a_1 = -a_3 a_2$ ,  $a_2 = -a_3 a_1$ . Ни одно из этих свойств не выполняется. Попробуем поменять знаки некоторых ребер.

Не понижая  $s$ , невозможно повысить устойчивость системы. Так как одно изменение знака изменяет значение  $a_3$  на два (на четное значение). А нужно на 1 или на 3 (нечетное значение). Тогда только можно заменить  $a_3$  нулем, тем самым понизив  $s$ . Для этого нужно поменять знак одного цикла длины 3. Если при этом поменяется знак в одном цикле длины 2, то и  $a_2$  станет равным 0. Для этого в одном из цикле длины три надо поменять знак

в том ребре, которое одновременно входит и в цикл длины 2. Это либо ребро Склады-Поставщики, либо Склады – Перевозчики. В одном из этих ребер нужно поменять знак с “-” на “+”, но не в обоих сразу. В любом из этих случаев лепестковая последовательность будет вырожденной (0, 0, 0), при ней импульсная и абсолютная устойчивость для всех процессов.

Итак, для того, чтобы система стала устойчивой, нужно поменять знак в одном из ребер Склады-Поставщики, либо Склады – Перевозчики с “-” на “+”, но не в обеих сразу. Но в силу того, что перевозчик подойдет любой, а поставщик только тот, у которого в наличии имеется требуемое изделие, то предпочтительнее менять знак в ребре Склады-Поставщики.

### **Заключение**

В статье построена когнитивная карта организации реализации металлопроката. Проведен анализ полученной карты при помощи импульсного процесса, возникающего в системе. Доказано, что карта не обладает ни импульсной, ни абсолютной устойчивостью. Предложены способы повысить устойчивость в построенной системе.

### **Литература**

1. Мищенко О.В., Федорина Е.В. Разработка технологических процессов раскря металлопроката холодноштамповочного производства с использованием прогрессивных методов математического моделирования // Известия МГТУ «МАМИ», 2014, № 1. с. 33 – 35.

2. Подоплелова Е.С., Князев И.И. Модификация метода FMEA при помощи алгоритмов машинного обучения // Известия ЮФУ. Технические науки, 2023, №6. С. 88–95.

3. Князев И. И. Исследование методов построения каузальных графовых моделей для сложных социогуманитарных систем // Известия ЮФУ. Технические науки, 2024, №2. С. 83-89.

4. Tselykh A., Vasilev V., Tselykh L. Assessment of influence productivity in cognitive models // Artificial Intelligence Review, 2020, №53. P. 5383–5409. URL: [doi.org/10.1007/s10462-020-09823-8](https://doi.org/10.1007/s10462-020-09823-8).

5. Гинис Л. А. Развитие инструментария когнитивного моделирования для исследования сложных систем // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1806](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1806).

6. Tselykh A., Tselykh L., Vasilev V., Barkovskii S. Expert System with Extended Knowledge Acquisition Module for Decision Making Support. In: Abraham, A., Kovalev, S., Tarassov, V., Snasel, V., Vasileva, M., Sukhanov, A. (eds) Proceedings of the Second International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI'17) // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2017, № 680. Springer, Cham. URL: [doi.org/10.1007/978-3-319-68324-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68324-9_3)

7. Dağlarlı E. Explainable Artificial Intelligence (xAI) Approaches and Deep Meta-Learning Models. In: Aceves-Fernandez, M.A., Ed., Advances and Applications in Deep Learning. IntechOpen, London, P. 1-17. 2018. URL: [doi.org/10.5772/intechopen.92172](https://doi.org/10.5772/intechopen.92172)

8. Целигорова Е.Н. Современные информационные технологии и их использование для исследования систем автоматического управления // Инженерный вестник Дона, 2010, №3. URL: [vdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/222](http://vdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/222).

9. Игнатьев М. А. Определение устойчивости импульсных систем управления второго порядка по коэффициентам характеристического уравнения // Молодой ученый, 2019, № 34 (272). С. 18-20. URL: [moluch.ru/archive/272/62118/](http://moluch.ru/archive/272/62118/).

---

10. Ордуянц Г. Г. Импульсные системы, дискретные функции, разностные уравнения и устойчивость импульсных систем, 2011. URL: [elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/3435/1/Orduianc\\_1\\_2011.pdf](http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/3435/1/Orduianc_1_2011.pdf)

### References

1. Mishhenko O.V., Fedorina E.V. Izvestija MGTU «MAMI», 2014, № 1. pp. 33 – 35.
2. Podoplelova E.S., Knjazev I.I.. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki, 2023, №6. pp. 88–95.
3. Knjazev I. I. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki, 2024, №2. pp. 83-89.
4. Tselykh A., Vasilev V., Tselykh L. Artificial Intelligence Review, 2020, №53. pp. 5383–5409. URL: [doi.org/10.1007/s10462-020-09823-8](https://doi.org/10.1007/s10462-020-09823-8).
5. Ginis L.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1806](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1806).
6. Tselykh, A., Tselykh, L., Vasilev, V., Barkovskii, S. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2017, № 680. Springer, Cham. URL: [doi.org/10.1007/978-3-319-68324-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68324-9_3)
7. Dağlarlı E. Explainable Artificial Intelligence (xAI) Approaches and Deep Meta-Learning Models. In: Aceves-Fernandez, M.A., Ed., Advances and Applications in Deep Learning. 2020, IntechOpen, London, P. 1-17. URL: [doi.org/10.5772/intechopen.92172](https://doi.org/10.5772/intechopen.92172)
8. Celigorova E.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2010, №3 URL: [vdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/222](http://vdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/222).
9. Ignat'ev M. A. Molodoj uchenyj, 2019, № 34 (272). pp. 18-20. URL: [moluch.ru/archive/272/62118](http://moluch.ru/archive/272/62118).
10. Ordujanc G. G. Impul'snye sistemy, diskretnye funkicii, raznostnye uravnenija i ustojchivost' impul'snyh system. [Impulse systems, discrete functions, difference equations and stability of impulse systems]. 2011. URL: [elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/3435/1/Orduianc\\_1\\_2011.pdf](http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/3435/1/Orduianc_1_2011.pdf)

**Дата поступления: 9.11.2024    Дата публикации: 13.12.2024**

---