



## Применение обобщенного алгоритма обработки слабо формализованной информации для управления неравновесной химической реакцией

*А.А. Копыльцов*

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
имени В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация:** В статье рассматривается обобщенный алгоритм обработки слабо формализованной информации в технических системах на примере управления неравновесной химической реакцией типа реакции Белоусова-Жаботинского (БЖ). Реакция БЖ происходит в емкости, помещенной в термостат. К емкости подведены трубочки, по которым через вентили поступают растворы реагентов, которые перемешиваются мешалкой в емкости. В емкости происходят реакции, и избыток раствора вытекает через сток. Задача состоит в том, что необходимо вентили, регулирующие скорость поступления растворов в емкость, и скорость вращения мешалки отрегулировать таким образом, чтобы получилась устойчивая периодически повторяющаяся картина. В реакции БЖ это можно увидеть, как смену окраски раствора с красного (повышенная концентрация ионов  $Se^{3+}$ ) на синий (повышенная концентрация ионов  $Se^{4+}$ ) и обратно с периодом в несколько минут. В работе подробно описано применение обобщенного алгоритма к задаче регулирования вентилей и мешалки в емкости.

**Ключевые слова:** слабо формализованная информация, обработка информации, алгоритм, неравновесная химическая реакция, реакция Белоусова-Жаботинского, управление.

### Введение

Информация, поступающая от технических систем, обычно отличается разнообразием и попадает на различные датчики. Поступающая информация часто является слабо формализованной, т.е. ее недостаточно для принятия верного решения, она содержит искажения, помехи, шумы и т.д. Сложности, возникающие при обработке такой информации, обусловлены тем, что, с одной стороны, количество информации значительно возрастает, а с другой стороны, интервалы времени, когда необходимо принять верное решение,

---

резко сокращаются. Публикации в области интеллектуальных технологий и интеллектуальных вычислений подтверждают, что различные подходы к обработке слабо формализованной информации развиваются. В последнее время можно отметить рост числа публикаций по эволюционным алгоритмам и различным комбинациям их с нечеткими, нейронными, сетевыми и другими подходами, т.е., наибольшее развитие получили методы, в которых используются механизмы, заимствованные из живой природы [1-6].

Поэтому для обработки слабо формализованной информации в технических системах предлагается подход, учитывающий недавно открытые в живых организмах способы обработки и хранения информации [7]:

- информация, поступающая в мозг, хранится и обрабатывается в некоторой довольно компактной группе нейронов, независимо от вида информации;
- в мозге информация перерабатывается с учетом приоритетов и повторяемости наблюдаемых явлений;
- в мозге генерация новых знаний происходит путем сравнения специальным образом обработанной недавно поступившей информации с информацией, которая прежде попала в мозг и подверглась там специальной обработке.

Учитывая эти способы хранения и обработки информации в мозге и то, что часто поступающей информации недостаточно для принятия верных решений, предлагается обобщенный алгоритм обработки слабо формализованной информации в технических системах [8-13]. Используя такой подход можно слабо формализованную информацию хранить в виде результатов ее специальной обработки и при обработке информации варьировать приоритетами и выявлять повторяющиеся закономерности, а также получать новые знания, сравнивая и анализируя результаты специальной обработки поступающей информации. Применим обобщенный алгоритм к регулированию параметров установки, в которой происходит неравновесная химическая реакция, типа реакции Белоусова-Жаботинского.

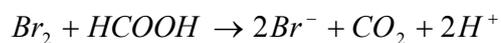
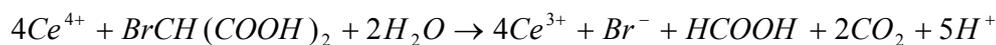
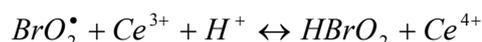
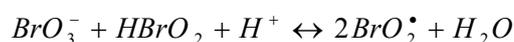
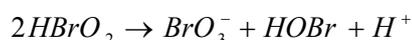
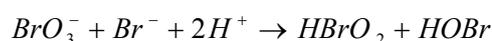
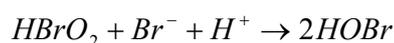
---

## Неравновесная химическая реакция

Для регулирования неравновесных реакций, например, таких как реакция Белоусова-Жаботинского и других, разработана экспериментальная установка [8], которая включает термостат, содержащий емкость, в которую поступают растворы реагентов. В емкости происходят реакции, а избыток содержимого емкости вытекает через сток. Равномерность распределения реагентов в емкости достигается за счет вращающейся мешалки.

Для реакции Белоусова-Жаботинского необходимы следующие растворы реагентов:  $H_2SO_4$  (серная кислота),  $CH_2(COOH)_2$  (малоновая кислота),  $NaBrO_3$  (бромат натрия),  $Ce_2(SO_4)_3$  (сульфат церия),  $Fe(C_{12}H_8N_2)_3SO_4$  (ферроин), которые поступают в емкость, в которой происходит их перемешивание и реакции.

Реакции в растворе происходят таким образом, что цвет раствора в емкости изменяется с красного (повышенная концентрация ионов  $Ce^{3+}$ ) на синий (повышенная концентрация ионов  $Ce^{4+}$ ) и обратно с периодичностью в несколько минут. Изменение цвета объясняется изменением концентраций ионов  $Ce^{4+}$  и  $Ce^{3+}$ , которые происходят согласно реакциям [14]



Задача состоит в том, чтобы отрегулировать вентили на трубочках, по которым поступают растворы реагентов, и скорость вращения мешалки таким образом, чтобы добиться изменения цвета раствора с красного на синий и обратно с заранее заданной периодичностью.

Реакция Белоусова-Жаботинского включает 13 реакций с 14 компонентами. Температура раствора в термостате поддерживается постоянной. Концентрации ионов в растворе измеряются специализированными датчиками, например, датчиками ионов  $Br^-$ ,  $Ce^{3+}$ ,  $Ce^{4+}$  и др.

### **Применение обобщенного алгоритма для управления неравновесной химической реакцией**

Обобщенный алгоритм обработки слабо формализованной информации содержит следующие этапы (Рис. 1) [8-13].

Этап 1. Информация поступает от ионных датчиков в модуль «Сбор информации». Предполагается, что датчики равномерно распределены по объему емкости.

Этап 2. Информация из модуля «Сбор информации» поступает в модуль «Распознавание информации», где происходит ее разделение на информацию по ионам, например, по ионам  $Br^-$ ,  $Ce^{3+}$ ,  $Ce^{4+}$  и др. Для каждого иона имеется свой специализированный датчик.

Этап 3. Из модуля «Распознавание информации» информация попадает в модуль «Классификация информации», где происходит ее разделение на  $n$  классов  $K_1, \dots, K_i, \dots, K_n$ , т.е. на классы: ионы  $Br^-$  (1-ый класс), ионы  $Ce^{3+}$  (2-ой класс), ионы  $Ce^{4+}$  (3-ий класс) и др.

Этап 4. В модулях «Свертка информации» информация в каждом классе (всего  $n$  классов) обрабатывается по определенному алгоритму свертки. Предполагается, что емкость, в которой происходит реакция,

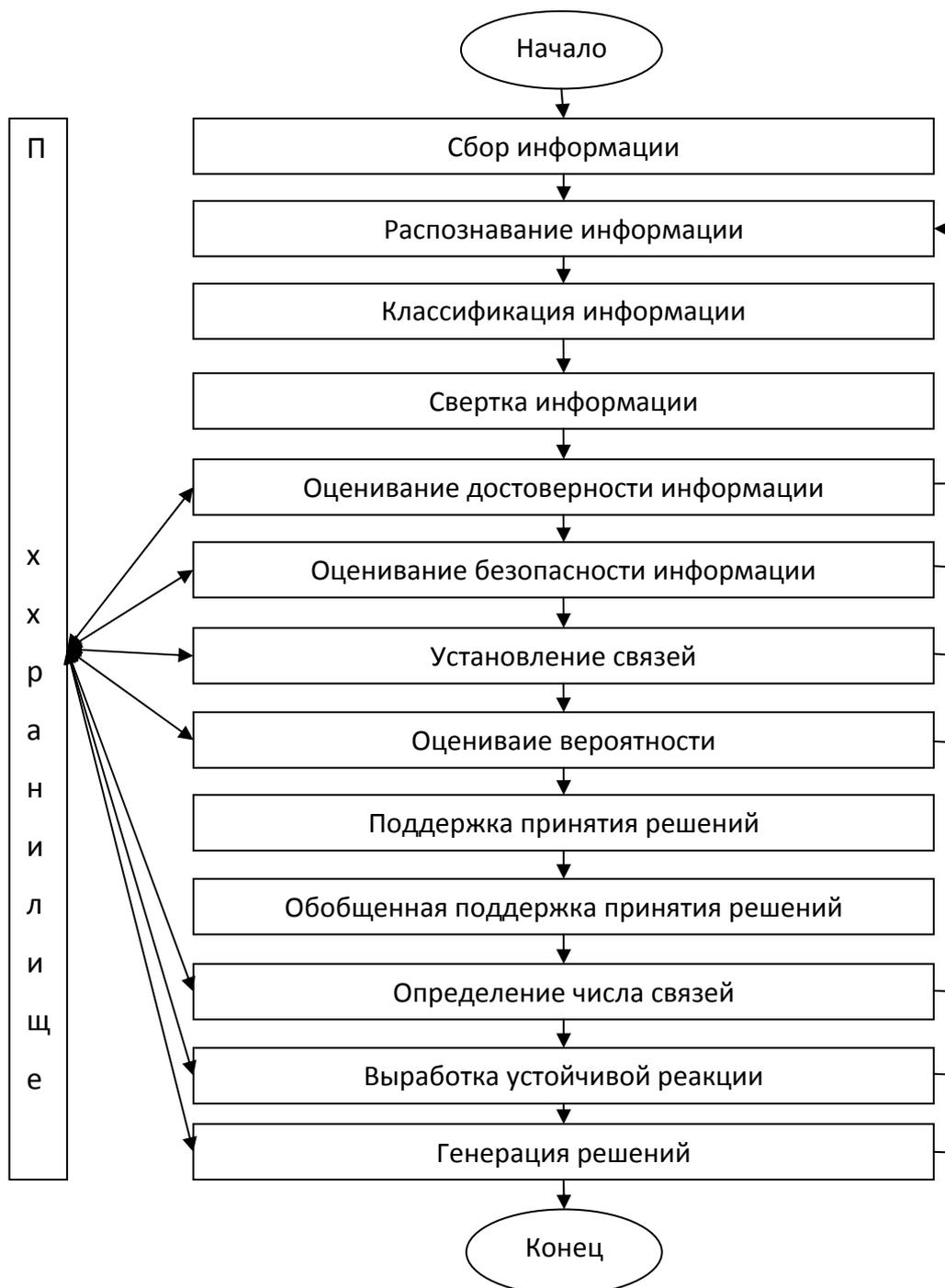


Рис. 1. – Обобщенный алгоритм обработки слабо формализованной информации

разбита на одинаковые объемы, в каждом из которых, имеется по одному датчику для ионов (например, для ионов  $Br^-$ ,  $Ce^{3+}$ ,  $Ce^{4+}$  и др.). В нашем

случае все веса одинаковые и для каждого из ионов получим среднюю концентрацию по  $i$  – тому выделенному объему

$$f_i = \sum_{j=1}^{m_i} P_j K_j ,$$

где  $P_i$  - коэффициенты,  $K_j$  ( $j = 1, \dots, m_i$ ) – концентрации ионов в выделенных объемах,  $m_i$  – число выделенных объемов для каждого иона.

Можно определить их среднее значение  $\bar{f}$ , дисперсию  $D$ , и среднеквадратичное отклонение  $\sigma = D^{0,5}$ , где  $N_0$  - число полученных  $f_i$ . Процедура получения  $\bar{f}$  называется сверткой. Отличие предлагаемой свертки от других сверток состоит в том, что весовые коэффициенты явно не вычисляются и расчеты осуществляются при недостатке информации, т.е. учитываются только условия нормировки, дискретности и приоритета [8-13]. Таким образом, получаем новую информацию, которая обработана специальным образом, характерным для конкретного класса (всего  $n$  классов).

Этап 5. В модулях «Оценивание достоверности информации» проводится сравнение в каждом классе этой информации с прежде полученной информацией. Если система работает, то достоверность поступающей информации  $I_{ДПИ}=1$ . Если система не работает, то  $I_{ДПИ}=0$ , а если система работает со сбоями, то достоверность поступающей информации  $0 < I_{ДПИ} < 1$ . Значение  $I_{ДПИ}$  можно оценить следующим образом. Предполагается, что была проведена серия экспериментов и для каждого иона в каждом выделенном объеме получили  $0 \leq H_{cp\ i} \leq H_{max\ i}$ . Проводим новый эксперимент и получаем  $H_{нов\ i}$ . Если оказывается, что  $H_{нов\ i} \leq H_{max\ i}$  для всех  $i$ , то информация достоверная. Пусть это справедливо для  $NI$  выделенных объемов. Тогда

$$I_{\text{дпи}} = \frac{N1}{N},$$

где  $N$  – число выделенных объемов.

Этап 6. В модулях «Оценивание безопасности информации» происходит оценка безопасности поступающей информации для каждого класса. Рассматриваем варианты, где  $H_{\text{нов } i} \geq H_{\text{max } i}$  в  $N-N1$  выделенных объемах. Это возможно по двум причинам: либо это верно (тогда нужно вносить коррекции), либо это неверно (система работает неправильно). Прогоняем вариант, который является тестовым. Если все правильно, то вносим коррективы. Если же неправильно, то подсчитываем количество ( $N2$ ), таких неправильных вариантов и безопасность поступающей информации

$$I_{\text{бпи}} = \frac{N - N2}{N}.$$

Этап 7. Установление связей между недавно поступившей информацией в классы (всего  $n$  классов) и ранее поступившей, осуществляется в модулях «Установление связей». Новой информацией является множество усредненных концентрации различных ионов по выделенным объемам, измеренных в некоторый промежуток времени. Сравниваем это множество с аналогичными множествами, полученными ранее и находящимися в модуле «Хранилище». Ищем множество, которое наиболее близко этому множеству (минимизируем среднее квадратичное отклонение). Если задать некоторую величину  $\Delta$ , то в  $\Delta$ -окрестность может попасть не одно множество, а несколько. Число таких множеств пусть равно  $M$  (число связей). В случае, когда количество связей меньше некоторой заданной для каждого из  $n$  классов, величины, осуществляется переход в модуль «Распознавание информации», где информация впоследствии перерабатывается и помещается в другой класс.

Этап 8. В модулях «Оценивание вероятности» происходит оценивание вероятности, с которой можно доверять поступившей в классы (всего  $n$

классов) информации. Если  $M \geq M^*$ , где  $M^*$  задано, то вероятность, с которой можно доверять недавно поступившей информации  $P=1$ . В противном случае  $0 \leq P < 1$  и осуществляется переход в модуль «Распознавание информации», где информация подвергается повторной обработке и помещается в другой класс. Например, если  $M=3$ ,  $M^*=1$ , то  $M \geq M^*$  и  $P=1$ .

Этап 9. В модулях «Поддержка принятия решений» генерируется совокупность решений для каждого класса. Поддержка принятия решений в классах (всего  $n$  классов) происходит следующим образом.

Если выполнены следующие условия:

- достоверность поступающей слабо формализованной информации  $I_{ДПИ} > I_{ДПИ}^*$  для некоторого  $I_{ДПИ}^*$ ;
- безопасность поступающей слабо формализованной информации  $I_{БПИ} > I_{БПИ}^*$  для некоторого  $I_{БПИ}^*$ ;
- число связей  $M > M^*$  для некоторого  $M^*$ ;
- вероятность, с которой можно доверять недавно поступившей слабо формализованной информации  $P > P^*$  для некоторого  $P^*$ ,

то эта новая поступающая информация включается в модуль «Хранилище» для данного класса. Нормируем число связей  $M$  следующим образом

$$M^N = \frac{M}{M_{\max}},$$

где  $M^N$  – нормированное и  $M_{\max}$  - максимальное значение  $M$ .

Таким образом достоверность поступающей информации  $I_{ДПИ}$ , безопасность поступающей информации  $I_{БПИ}$ , нормированное число связей  $M^N$ , вероятность, с которой можно доверять недавно поступившей информации  $P$ , находятся в промежутке от 0 до 1. т.е.

$$0 \leq I_{ДПИ} \leq 1, 0 \leq I_{БПИ} \leq 1, 0 \leq M^N \leq 1, 0 \leq P \leq 1.$$

Для того, чтобы новую поступающую информацию включить в модуль «Хранилище» для данного класса нужно, чтобы выполнялись неравенства

- $I_{ДПИ} > I_{ДПИ}^*$  для некоторого  $I_{ДПИ}^*$ ,
- $I_{БПИ} > I_{БПИ}^*$  для некоторого  $I_{БПИ}^*$ ,
- $M^N > M^{N*}$  для некоторого нормированного  $M^{N*}$ ,
- $P > P^*$  для некоторого  $P^*$ .

В нашем случае все 4 условия выполняются и, следовательно, новую информацию (множество концентраций различных ионов в выделенных объемах в некоторый момент времени) включаем в модуль «Хранилище». Возможно, также рассматривать усредненные концентрации ионов за некоторый промежуток времени.

Этап 10. В модуле «Обобщенная поддержка принятия решений» происходит генерация решений на основе решений, полученных в  $n$  классах. Поскольку, в нашем случае имеем датчики одного вида (ионные), то нашу новую информацию включаем в модуль «Хранилище», т.е. множество концентраций различных ионов в выделенных объемах в некоторый момент времени.

Этап 11. В модуле «Определение числа связей» происходит сравнение принятых решений с решениями принятыми раньше. В случае, когда число подтверждений не превосходит некоторого, заранее определенного числа, то, переходим в модуль «Распознавание информации», где информация подвергается переработке и помещается в другой класс. Определение числа связей (подтверждений) подтверждающих правильность принятого решения осуществляется следующим образом. При поступлении новой информации в хранилище осуществляется ее свертка  $C_N$  и сравнение со свертками ( $C_1, C_2, \dots, C_k$ ) ранее полученной информации, хранящимися в хранилище, следующим образом. Если  $\delta_i = |C_N - C_i| < \varepsilon$  для некоторого  $i \in \{1, 2, \dots, k\}$  и некоторого  $\varepsilon > 0$ , то считаем, что новая информация с номером  $N$  и старая информация с номером  $i$  между собой связаны. После установления связей считаем число этих связей  $MM$ . Если  $MM > MM^*$  для некоторого  $MM^*$ , то

---

считаем, что вероятность правильности принятого решения  $P=1$ . В противном случае  $P<1$ . В нашем случае, на основании предыдущего,  $P=1$ .

Этап 12. В модуле «Выработка устойчивой реакции» происходит выявление и запоминание в модуле «Хранилище» информации, которая поступает неоднократно. В нашем случае новая информация (множество концентраций различных ионов в выделенных объемах в некоторый момент времени) записываются в модуль «Хранилище». Сравниваем нашу новую информацию с ранее поступившей информацией. На основе среднего квадратичного отклонения, если расстояние меньше некоторого  $\varepsilon>0$ , то считаем, что наша новая информация является устойчивой информацией, и ее записываем в модуль «Хранилище» с индексом «устойчивая»:  $I_{УИ}$ .

Этап 13. В модуле «генерация решений» принимается обобщенная поддержка принятия решений на основе устойчивой информации, записанной в модуле «Хранилище». Собираем множество фрагментов устойчивой информации  $I_{УИi}$ ,  $i=1, \dots, n$ . Анализируем результаты сверток. Пусть имеем фрагменты информации с номерами  $i$  и  $j$  и пусть между ними имеется  $C_{ij}$  связей, причем  $C_{ij} > C^*$ , где  $C^*$  - некоторое число большее 0. Тогда считаем, что фрагменты информации с номерами  $i$  и  $j$  связаны непосредственно и уровень связности равен  $C_{ij}$ . Эту информацию можно рассматривать как новую информацию.

Этап 14. Модуль «Хранилище» содержит информацию, которая поступила раньше. В модуле «Хранилище» проверяется информация на новизну. Если это так, то информация поступает в модуль «Сбор информации» для дальнейшей обработки. Если фрагменты информации  $I_i$  и  $I_j$  связаны, то эту информацию  $I_k = I_{i \cup j}$  можно рассматривать как новую информацию. Т.е., если  $I_i$  определяется показателями  $i_1, i_2, \dots, i_{i1}$ , а  $I_j$  определяется показателями  $j_1, j_2, \dots, j_{j1}$ , то  $I_k$  определяется показателями  $i_1, i_2, \dots, i_{i1}, j_1, j_2, \dots, j_{j1}$ . Это означает, что вариант объединения двух

экспериментов тоже возможен. Эта новая информация поступает в модуль «Сбор информации» с последующей обработкой, согласно алгоритму.

Продолжая эту процедуру обработки информации, в итоге получим некоторые значения оборотов вентиля и частоту вращения мешалки, при которых достигается желаемое изменение цвета раствора в емкости с красного на синий и обратно с требуемой частотой.

### **Заключение**

Таким образом, рассмотрен обобщенный алгоритм обработки слабо формализованной информации в технических системах на примере управления установкой, в которой происходит неравновесная химическая реакция типа реакции Белоусова-Жаботинского. Реакция происходит в емкости, помещенной в термостат, в которую по трубочкам через вентили поступают растворы реагентов. В емкости происходят реакции, и избыток раствора вытекает через сток. Применение обобщенного алгоритма позволяет отрегулировать вентили, регулирующие скорость поступления растворов в емкость, и скорость вращения мешалки, таким образом, чтобы получилась устойчивая периодически повторяющаяся картина, т.е. смена окраски раствора с красного (повышенная концентрация ионов  $\text{Ce}^{3+}$ ) на синий (повышенная концентрация ионов  $\text{Ce}^{4+}$ ) и обратно с периодом в несколько минут. Таким образом, обобщенный алгоритм обработки слабо формализованной информации может быть применен для управления установкой, в которой осуществляется неравновесная химическая реакция.

### **Литература.**

1. Синявская Е.Д. Оптимизация на основе вероятностного подхода нечетких моделей управления производственными объектами управления // Инженерный вестник Дона. 2014. №3.
-



URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2462](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2462)

2. Cherpakov A.V., Soloviev A.N., Gricenko V.V., Mohanty S.C., Parshin D.Y., Butenko U.I., Bocharova O.V. Comparison of finite element modeling and analytical approach results for oscillating rod structure with crack // Инженерный вестник Дона. 2014. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2785](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2785)

3. Rutkowski L. Metody i techniki sztucznej inteligencji. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2005, 520 p.

4. Moon F.C. Chaotic Vibrations. New York: A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, 1990, 312 p.

5. Feder J. Fractals. New York: Plenum Press, 1991, 260 p.

6. Murray J.D. Lectures on Nonlinear-Differential-Equations Models in Biology. Oxford: Clarendon Press, 1977, 398 p.

7. Kandel E.R. In Search of Memory. New York: A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, 2006, 736 p.

8. Копыльцов А.А. Модель классификации информации и алгоритм ее предварительной обработки для статических и динамических объектов // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ” (известия государственного электротехнического университета), серия “Информатика, управление и компьютерные технологии”. 2013. № 6. С. 134-139.

9. Копыльцов А.А., Копыльцов А.В. Алгоритм обработки слабо формализованной информации, поступающей от технических систем // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ” (известия государственного электротехнического университета), серия “Информатика, управление и компьютерные технологии”. 2012. № 8. С. 30 – 36.

10. Копыльцов А.А. Алгоритм коррекции связей между фрагментами слабо формализованной информации и генерация новой информации // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2014. № 3. С.28-34.

11. Копыльцов А.А., Копыльцов А.В. Обработка слабо формализованной информации, поступающей от технических систем // Вестник Нижневартовского государственного гуманитарного университета. 2013. № 1. С. 32-36.

12. Копыльцов А.А., Копыльцов А.В. Обобщенный алгоритм обработки слабо формализованной информации и его применение // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2014. № 35. С. 35-44.

13. Копыльцов, А.А. Обработка слабо формализованной информации в живых и технических системах // Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, магистров, аспирантов «Современное программирование» (16—17 апреля 2014 г.). Нижневартовск: Издательство Нижневартовского государственного университета. 2014. С. 117-121.

14. Berge P., Pomeau Y., Vidal C. L'Ordre dans le Chaos. Paris: Hermann, 1985, 240 p.

### References

1. Sinyavskaya E.D. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2014. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2462](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2462)

2. Cherpakov A.V., Soloviev A.N., Gricenko V.V., Mohanty S.C., Parshin D.Y., Butenko U.I., Bocharova O.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2014. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2785](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2785)

3. Rutkowski L. Metody i techniki sztucznej inteligencji [Methods and technologies of an artificial intelligence]. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2005, 520 p.

4. Moon F.C. Chaotic Vibrations. New York: A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, 1990, 312 p.

5. Feder J. Fractals. New York: Plenum Press, 1991, 260 p.

6. Murray J.D. Lectures on Nonlinear-Differential-Equations Models in Biology. Oxford: Clarendon Press, 1977, 398 p.

---



7. Kandel E.R. In Search of Memory. New York: A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, 2006, 736 p.
8. Kopyltsov A.A. Journal of Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI». 2013. № 6. pp. 134-139.
9. Kopyltsov A.A., Kopyltsov A.V. Journal of Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI». 2012. № 8. pp. 30 – 36.
10. Kopyltsov A.A. Journal of Nizhnevartovsk State University. 2014. № 3. pp. 28-34.
11. Kopyltsov A.A., Kopyltsov A.V. Journal of Nizhnevartovsk State University. 2013. № 1. pp. 32-36.
12. Kopyltsov A.A., Kopyltsov A.V. Journal of Nizhnevartovsk State University. 2014. № 35. pp. 35-44.
13. Kopyltsov A.A. Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, magistrrov, aspirantov «Sovremennoe programmirovaniye» [Materials of the All-Russian scientific and practical conference of students, masters, graduate students "Modern programming"] (April 16 — 17, 2014). Nizhnevartovsk: Nizhnevartovsk State University. 2014. pp. 117-121.
14. Berge P., Pomeau Y., Vidal C. L'Ordre dans le Chaos [Order in chaos]. Paris: Hermann, 1985, 240 p.