

## Разработка диагностической модели системы мониторинга сварочного производства корпусного оборудования АЭС

*М. Е. Жидков*

*Волгодонский филиал Акционерного общества «Инжиниринговая компания «АЭМ-технологии»*

**Аннотация:** В работе приведены результаты исследований по синтезу математической модели процесса сварки ответственных конструкций энергетического машиностроения. Для количественной оценки состояния компонент сварочного производства предложен энтропийный подход, позволяющий проводить исследование объектов с учетом стохастического характера происходящих в нем процессов. В качестве средства получения информации предложена информационно-аналитическая система обеспечивающая возможность проведения измерительных процедур в реальных производственных условиях. Измерениям подлежат электрические сигналы тока и напряжения сварки. На первом этапе сигналы преобразуются во временные ряды и подвергаются энтропийной параметризации. Далее осуществляется мониторинг состояния на основе векторной энтропийной модели. В основу построения модели заложена процедура сравнения векторных энтропий характеризующих состояния компонент предыдущего и текущего процессов сварки.

**Ключевые слова:** мониторинг, информация, энтропия, сварочное производство, моделирование сложных систем.

Выбор эффективного метода моделирования сложных систем определяется необходимостью учёта взаимодействия её элементов и общесистемных закономерностей. Серьезной проблемой при синтезе математических моделей является установление необходимого уровня детализации. В работе [1] утверждается, что математическое моделирование объектов производства возможно лишь при ослаблении требований к адекватному описанию исследуемого объекта. В теории системного анализа [2] содержатся рекомендации по использованию принципа структуризации связанной с формализацией частных задач, а адекватность частных моделей доказывается по мере их формирования.

Практические подходы с использованием методов моделирования сложных систем предложены А.Н. Тырсиным применительно к проблемам моделирования сложных диагностических систем. Предполагается, что

«диагностическая модель не должна обеспечивать адекватности исследуемого объекта в целом. Она предназначена для описания степени отклонения технического состояния от нормы» [3]. Диагностические модели могут быть использованы для следующих целей:

- упорядочение данных в организационных процессах;
- улучшение понимания организационных проблем;
- интерпретация статистических данных;
- разработка управленческих решений.

В качестве основной идеи моделирования сложных систем стохастической природы предложено использовать энтропийное моделирование.

Информационная энтропия К. Шеннона, играющая главную роль в теории информации в качестве количественной меры неопределённости процессов протекающих в исследуемом объекте, может быть использована для параметризации экспериментальных зависимостей. При аналого-цифровом преобразовании сигналы обычно представляется временными рядами. Временной ряд представляет собой упорядоченную последовательность пар измеряемых величин, одна из которых является временем [4]. Идентификация процесса по данным измерений, означает построение математической модели физического процесса протекающего в объекте. Такие задачи решаются в сварочных лабораториях при отладке технологии сварки.

Сигналы о параметрах процесса сварки значительно зашумлены высокочастотными помехами. Подавление высокочастотной составляющей в информационно-аналитической системе осуществляется с использованием цифровых фильтров Баттерворта. На рис. 1 представлены фрагменты записи сигналов тока и напряжения процесса сварки под флюсом до фильтрации и после прохождения процедуры фильтрации. Как видно из рисунка

---

использование фильтра Баттерворта с частотой среза 100 Гц позволяет очистить сигнал от высокочастотной составляющей, что дает возможность проведения анализа низкочастотного спектра соответствующей диапозону измерения сигналов определяющих состояние процесса сварки [5, 6].

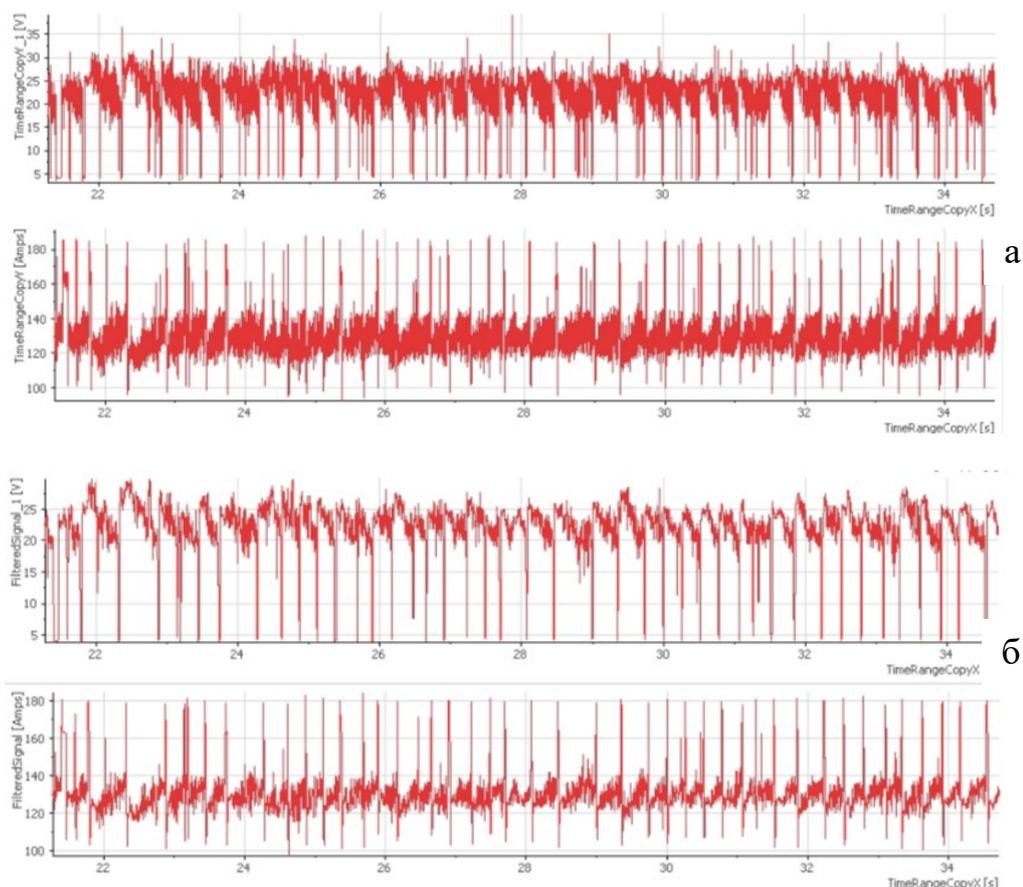


Рис. 1. – Фрагменты записи сигналов тока и напряжения дуги до (а) и после (б) процедуры фильтрации

Разумеется, анализ энтропийных показателей не может полностью заменить иные методы характеризующие состояние сложных физических процессов при сварке. Как показывает практика, при исследовании сварочных технологий успешно используются и другие методы. К наиболее распространённым можно отнести спектральные и статистические методы.

Спектральные методы обработки сигналов о процессе сварки используются для выявления временных диапазонов протекания физических

процессов. В работах [7-9] приведена оценка динамики процессов в элементах сварочного контура:

- быстроедействие сварочного источника питания – 0,001 с;
- гидродинамические явления в сварочной ванне – 0,01с;
- кристаллизация и плавления основного металла – 10с;
- плавления электрода – 0,01-0,0001 с;
- тепловые процессы – 1,0с.

Представление сигналов являющихся функциями времени в спектральные размерности позволяет корректно обосновывать процессы фильтрации и объемы выборок. Для спектральной обработки используется быстрое преобразование Фурье.

Сложность, а в некоторых случаях принципиальная невозможность построения строго детерминированных моделей, приводит к необходимости использования методов теории вероятности и математической статистики. Поэтому в алгоритмах разработанной информационно-аналитической системы заложена возможность применения как спектральной, так и статистической обработки сигналов.

Таким образом, алгоритм предлагаемой модели должен содержать блоки предварительной обработки содержащие процедуры: измерения, фильтрации, оценки степени стационарности и эргодичности, а также выявления закона распределения плотности вероятностей (рис. 2). Предполагается, что алгоритм предварительной обработки измеряемых сигналов будет использоваться в информационно аналитической системе при исследовании и оценке сварочно-технологических свойств компонент технологического процесса сварки.

Естественно, что таким фундаментальным статистическим характеристикам сигналов, как стационарность и эргодичность должны соответствовать сигналы при установившемся процессе сварки. В противном

---

случае, требуется изучение условий препятствующих его нормальному функционированию. Исследование закона распределения плотности вероятности требуется для реализации диагностической модели. Использование энтропийных показателей соответствующих временных рядов позволяет проводить предварительную оценку состояние процесса сварки, например, сварочно-технологических свойств электродов являющихся компонентами поставок предприятий не входящих в исследуемую производственную среду.

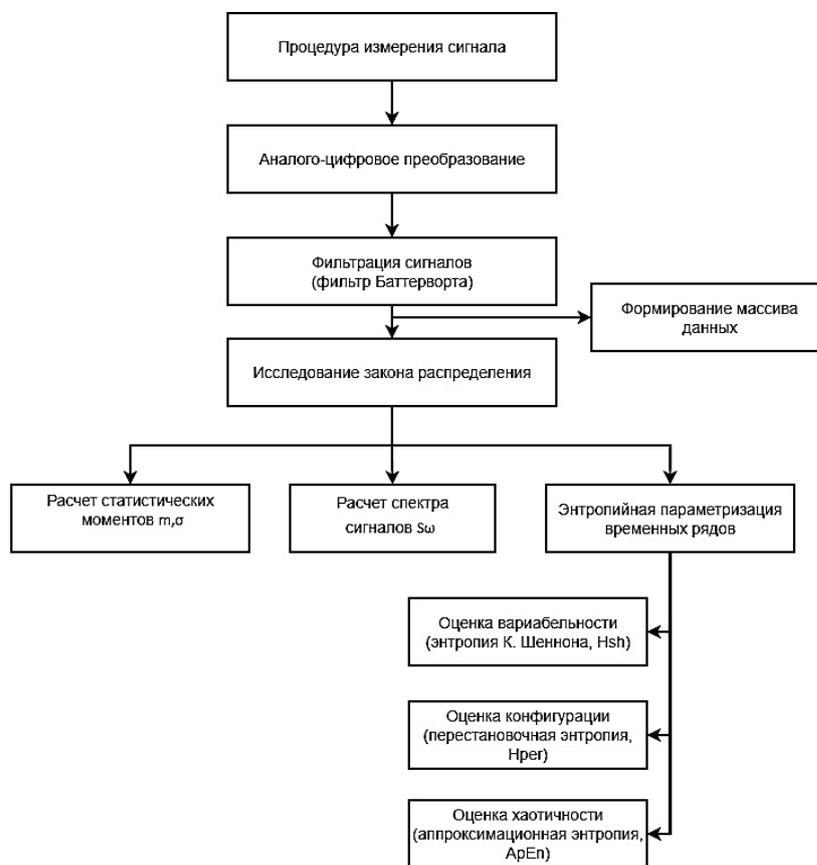


Рис. 2. – Алгоритм предварительной обработки сигналов при исследовании сварочно-технологических свойств компонент процесса сварки

В качестве примера рассмотрим результаты исследований по оценке сварочно-технологических свойств электродов для ручной дуговой сварки электродами УОНИ 13/55 Ø4мм  $I_{св} = 120A$ . Были получены расчётные значения энтропийных показателей:

–  $H_{sh} = -\sum_{i=1}^N p_i \log p_i$  – энтропия Шеннона, где  $N$  – число возможных состояний процесса,  $p_i$  – вероятность нахождения процесса в  $i$ -м состоянии;

–  $H_{per} = -\sum_{i=1}^{n!} p_i \log p_i$  – перестановочная энтропия, где  $n!$  – число всевозможных перестановок порядка  $n$ , определяемых отношениями  $n$  последовательных значений временного ряда,  $p_i$  – вероятность нахождения во временном ряду определённой перестановки;

–  $ApEn = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} \ln \frac{C_r^m}{C_r^{m+1}}$  – аппроксимационная энтропия, где  $N$  – длина временного ряда,  $r$  – величина допуска, являющегося параметром фильтра шумов,  $m$  – длина вектора,  $C_r^m$  – мера описывающая сходство между векторами.

В таблице 1 представлен процент изменения энтропийного показателя  $\varepsilon$ .

Предварительно была проведена экспертная оценка электродов и установлено, что электроды партии 1 (хороший) были достаточно прокалены, а электроды партии 2 (плохой) были недостаточно прокалены. Прокалка применяется для удаления влаги из покрытия электрода. В эксперименте были записаны сигналы тока и напряжения.

Таблица № 1

Чувствительность энтропийных показателей значений тока и напряжения

Сигнал тока			
Состояние электродов	Hsh	Hper	ApEn
Хорошее	0,6948	0,406	0,0273
Плохое	0,8017	0,4053	0,0039
$\varepsilon$	15%	11%	86%
Сигнал напряжения			
Хороший	0,6409	0,3789	0,0361
Плохой	0,7822	0,5102	0,0019
$\varepsilon$	18%	25%	94%

Совпадение экспертных и количественных энтропийных оценок по сигналам тока и напряжение составляет: от 11% до 94% по различным энтропийным показателям. Наиболее чувствительной является аппроксимационная энтропия характеризующая хаотичность процесса сварки.

Рассмотрим синтез диагностической модели стохастической системы на основе векторного представления энтропии. Энтропия случайного вектора  $Y$  может быть вычислена по формуле (1) полученной в работе [3]:

$$H(Y) = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Y_i} + \sum_{i=1}^m \kappa_i + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln (1 - R_{Y_k/Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2) \quad (1)$$

где  $\sigma_{Y_i}$  – среднеквадратические отклонения параметров  $Y_i$ ;  $\kappa_i = H(Y_i/\sigma_{Y_i})$  – энтропийный показатель закона распределения случайной величины;  $R_{Y_k/Y_1 Y_2 \dots Y_{k-1}}^2$  – индекс детерминации регрессионных зависимостей между компонентами случайного вектора  $Y$ ,  $k = 2, 3, \dots, m$ .

Если компоненты случайного вектора  $Y$  распределены по нормальному (гауссовскому) закону распределения можно воспользоваться упрощенной формулой расчёта векторной энтропии (2):

$$H(Y) = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Y_i} + m \ln \sqrt{2\pi e} + \frac{1}{2} \ln |R|, \quad (2)$$

где  $\sigma_{Y_i}$  – среднеквадратические отклонения параметров  $Y_i$ ,  $|R|$  – корреляционная матрица случайного вектора  $Y$ .

Существуют две причины изменения энтропии: изменение степени рассеивания компонент вектора и изменение корреляционных связей между ними. В работе [10] предложено рассматривать изменения энтропии в векторной форме. Компоненты энтропии хаотичности  $H(Y)_V$  и энтропии самоорганизации  $H(Y)_R$  рассматривать, как самостоятельные величины.

Предположим, что два случайных вектора  $Y^{(0)}$  и  $Y^{(1)}$  соответствуют предыдущему и текущему (диагностируемому) состояниям стохастической системы. Разность энтропий  $\Delta H(Y)$  будет равна:

$$\Delta H(Y) = H(Y^{(1)}) - H(Y^{(0)}).$$

Изменения энтропии хаотичности  $H(Y)_V$  и энтропии самоорганизации  $H(Y)_R$  рассчитываются по формулам:

$$\Delta(H)_V = \ln \frac{\sigma_{Y^{(0)}}}{\sigma_{Y^{(1)}}} + \ln \sqrt{2\pi e}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{Y^{(0)}}$ ,  $\sigma_{Y^{(1)}}$  – средние квадратические отклонения гауссовских векторов  $Y^{(1)}$ ,  $Y^{(0)}$ .

$$\Delta(H)_R = \frac{1}{2} \ln \frac{|R_{Y^{(1)}}|}{|R_{Y^{(0)}}|}, \quad (4)$$

где  $R_{Y^{(1)}}$ ,  $R_{Y^{(0)}}$  – корреляционные матрицы гауссовских векторов  $Y^{(1)}$ ,  $Y^{(0)}$ .

Формулы (3, 4) позволяют осуществлять контроль стохастической системы. Рассчитывая величину энтропии  $\Delta H(Y)$  и её составляющих, можно сделать обоснованный вывод о состоянии системы и принять управленческое решение в соответствии с алгоритмом (рис. 3).

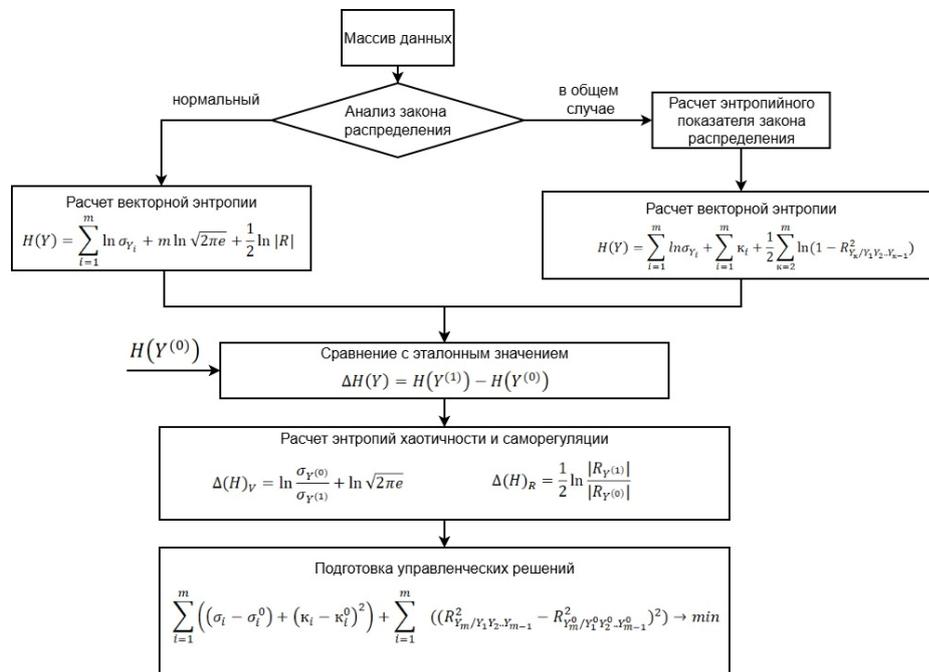


Рис. 3. – Алгоритм диагностической модели

В качестве примера использования векторной диагностической модели в лабораторных условиях было проведено исследование процесса сварки под флюсом на источнике питания ВДУ506СЭ сварочной проволокой диаметром

4мм. Результаты расчета векторной энтропии сигналов (рис. 4, 5) представлены в таблице 2.

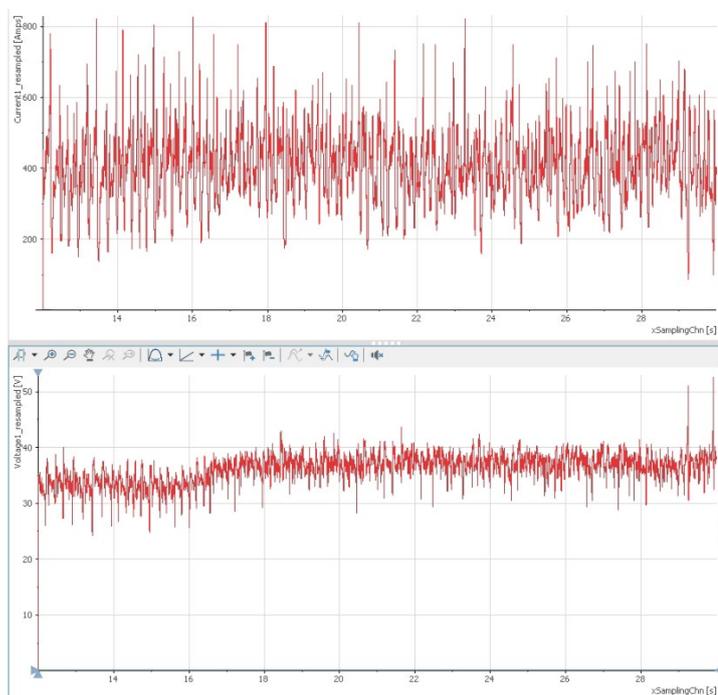


Рис. 4. – Сигналы тока и напряжения при сварке с хорошим формированием сварного соединения

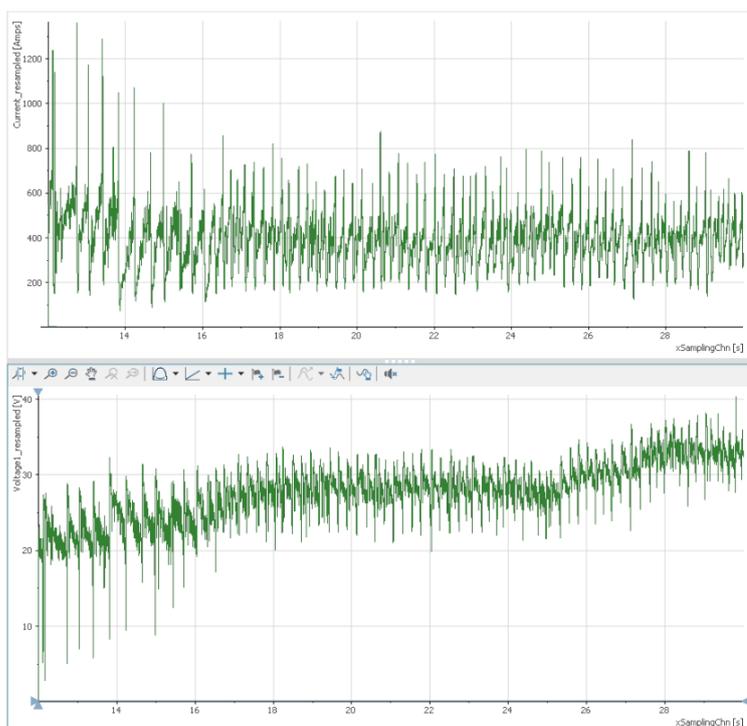


Рис. 5. – Сигналы тока и напряжения при сварке с неудовлетворительным формированием сварного соединения

Таблица № 2

Результаты вычисления векторной энтропии

Состояние шва	Векторная энтропия, $H(Y)$	Энтропии хаотичности, $H(Y)V$	Энтропии самоорганизации, $H(Y)R$
Удовлетворительное формирование шва	8,209	8,332	-0,123
Неудовлетворительное формирование шва	8,901	9,016	-0,115

Таким образом, результаты расчёта векторной энтропии показывают возрастание значения  $\Delta H(Y)=0,569$ . Причём значение энтропии хаотичности увеличилось на 8%, что характеризует рост значений дисперсии и коэффициента вариации сигналов.

### Литература

1. Налимов, В. В. Теория эксперимента. Москва: Наука, 1971. – 208 с.
2. Волкова, В. Н. Теория систем и системный анализ в управлении организации: учебное пособие. – Москва : Финансы и статистика, 2009. – 848 с.
3. Тырсин, А. Н. Энтропийное моделирование многомерных стохастических систем : монография. Воронеж: Научная книга, 2016. – 156 с.
4. Чумак, О. В. Энтропии и фракталы в анализе данных. Изд. 2-е, испр. и доп. – Москва; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» ; Институт компьютерных исследований, 2012. – 168 с.
5. Чернов А.В. Обработка информации в системах контроля и управление сварочным производством: монография / Новочерк. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: НГТУ, 1995.–180с.
6. Сас А.В., Чернов А.В. Информационно-измерительные системы в управлении сварочным производством: монография/ Юж.-Рос. гос. техн.ун-т – Новочеркасск: Изд-во журн. “Изв. вузов. Электромеханика”, 2008. – 148с.

7. Сурин В.И., Щербань А.С., Щербаков А.А., Жидков М.Е., Томилин С.А., Иваний М.Б.. "Обоснование применимости метода сканирующей контактной потенциометрии для контроля оборудования АЭС при его изготовлении" Глобальная ядерная безопасность, №. 1 (46), 2023, С. 36-53.

8. Жидков М.Е., Киричек А.В., Лебедев В.А., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А., Баринов С.В. Перспективы применения волнового деформационного упрочнения сварных швов корпусов ядерных реакторов // Транспортное машиностроение, №11, 2024, С.24-30.

9. Алекин Л.Е. Полная структурная схема дугового автомата типа АРДС//Труды МВТУ. – 1970. – №136. С.67-117

10. Геворгян Г.Г., Тырсин А.Н. Энтропийное системное моделирование развития городов / Системное моделирование социально-экономических процессов : труды 40-й междунар. научн. школы-семинара имени академика С. С. Шаталина, г. Воронеж, 1–7 октября 2017 г. – Воронеж: Истоки, 2017. – С. 136–140.

### References

1. Nalimov, V. V. Teoriya eksperimenta [Theory of experiment]. Moskva: Nauka. 1971. P. 208.

2. Volkova, V. N. Teoriya sistem i sistemnyy analiz v upravlenii organizatsii: uchebnoye posobiye [Systems Theory and Systems Analysis in Organization Management: A Tutorial]. Moskva : Finansy i statistika, 2009. 848 p.

3. Tyrsin, A. N. Entropiynoye modelirovaniye mnogomernykh stokhasticheskikh sistem: monografiya [Systems Theory and Systems Analysis in Organization Management: A Tutorial]. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2016. 156 p.

4. Chumak, O. V. Entropii i fraktaly v analize dannykh [Entropy and fractals in data analysis]. Izd. 2-e, ispr. i dop. Moskva; Izhevsk: NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika»; Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2012. 168 p.



5. Chernov A.V. Obrabotka informatsii v sistemakh kontrolya i upravleniye svarochnym proizvodstvom: monografiya [Information processing in control systems and management of welding production: monograph]. Novocherk. gos. tekhn. un-t. Novocherkassk: NGTU, 1995. 180 p.

6. Sas A.V., Chernov A.V. Informatsionno-izmeritel'nyye sistemy v upravlenii svarochnym proizvodstvom: monografiya [Information and measuring systems in welding production management: monograph]. Yuzh. Ros. gos. tekhn.un-t Novocherkassk: Izd-vo zhurn. "Izv. vuzov. Elektromekhanika", 2008. 148 p.

7. Surin V.I., Shcherban A.S., Shcherbakov A.A., Zhidkov M.E., Tomilin S.A., Ivaniy M.B Globalnaya yadernaya bezopasnost. 2023. №. 1(46). Pp. 36-53.

8. Zhidkov M.E., Kirichek A.V., Lebedev V.A., Solovyev D.L., Silantyev S.A., Barinov S.V. Transportnoye mashinostroyeniye, 2024. №11. Pp. 24-30.

9. Alekin L.E. Trudy MVTU. 1970. №136. pp. 67-117

10. Gevorgyan G.G., Tyrsin A.N. Sistemnoye modelirovaniye sotsial'no-ekonomicheskikh protsessov: trudy 40-y mezhdunar. nauchn. shkoly-seminara imeni akademika S. S. Shatalina, g. Voronezh, 1–7 oktyabrya 2017 g. Voronezh: Istoki, 2017. pp. 136–140.

**Автор согласен на обработку и хранение персональных данных.**

**Дата поступления: 17.12.2025**

**Дата публикации: 28.02.2026**