

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №8 (170). С.3-10.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №8 (170). P.3-10.

Научная статья

УДК 621.7

doi: 10.30987/2223-4608-2025-8-3-10

## **Реализация предиктивного управления прецизионной плазменной модификацией геометрически сложных поверхностей деталей**

**Борис Максович Бржозовский**<sup>1</sup>, д.т.н.

**Марина Борисовна Бровкова**<sup>2</sup>, д.т.н.

**Владимир Васильевич Мартынов**<sup>3</sup>, д.т.н.

<sup>1, 2, 3</sup> *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия*

<sup>1</sup> [bmbsar85@mail.ru](mailto:bmbsar85@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0005-8486-4467>

<sup>2</sup> [bmbsar@mail.ru](mailto:bmbsar@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0009-1863-0709>

<sup>3</sup> [v\\_martynov@mail.ru](mailto:v_martynov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4177-0963>

***Аннотация.** Представлены результаты исследований, направленных на реализацию технологических возможностей предиктивного принятия решений при интеллектуальном управлении сложными динамическими процессами прецизионной микроволновой плазменной модификации изделий машиностроения. Определены возможности повышения эффективности процесса низкотемпературной плазменной модификации поверхностного слоя металлических изделий на основе управления его ходом в реальном времени на основе предиктивных методов принятия решений. С этой целью использованы результаты ранее выполненных исследований фундаментальных свойств динамических процессов в условиях многорежимного функционирования и эволюционного изменения состояний технологических структур плазмотрона. Для формирования предиктивной технологии с целью принятия решений в реальном времени дополнительно реализована информационная система, обеспечивающая наблюдение за ходом процесса воздействия низкотемпературной плазмы на поверхность изделия по параметрам электрического и оптического сигналов. Разработана модель взаимодействия между системой формирования электромагнитного поля, плазменным облаком и поверхностным слоем изделия, с учётом электростатических процессов. Проведены численные расчёты распределения электрического поля в плазменной камере, оптимизирована конструкция коаксиального ввода энергии, определены условия устойчивого горения СВЧ-разряда на поверхности цилиндрических объектов. Предложены методы оценки стабильности процесса и выявления закономерностей его течения на основе анализа электрических и оптических сигналов, регистрируемых в режиме реального времени. Применение статистики Херста, метода последовательных разностей и критерия Фишера позволило количественно охарактеризовать стабильность технологического процесса и обосновать эффективность коррекции режимных параметров. Разработан алгоритм технологии управления взаимодействием электромагнитного и электростатического полей при низкотемпературном плазменном формировании композитных структур – блок анализа результатов обработки, интегрирующий результаты диагностики и адаптивного управления. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования интеллектуальных подходов для повышения точности и воспроизводимости плазменной модификации в условиях варьирующихся технологических режимов.*

**Ключевые слова:** оперативное оценивание, управление, интегративные критерии, плазменные технологии, методы искусственного интеллекта

**Для цитирования:** Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Бровкова М.Б. Создание и развитие высоконадёжных информационно-управляющих систем с элементами искусственного интеллекта для перспективных технологических комплексов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 8 (170). С. 3–10. doi: 10.30987/2223-4608-2025-8-3-10

## Implementation of predictive control of precision plasma modification for geometrically complicated parts surfaces

Boris M. Brzhozovsky<sup>1</sup>, D. Eng.  
Marina B. Brovkova<sup>2</sup>, D. Eng.  
Vladimir V. Martynov<sup>3</sup>, D. Eng.

<sup>1, 2, 3</sup> Blagonravov Institute of Mechanical Engineering Russian Academy of Sciences (IMASH RAS),  
Moscow, Russia

<sup>1</sup> bmbars85@mail.ru

<sup>2</sup> bmbars@mail.ru

<sup>3</sup> v\_martynov@mail.ru

**Abstract.** The results of research aimed at manufacturing capabilities implementation for predictive decision-making in the intelligent control of complex dynamic processes of precision microwave plasma modification of mechanical engineering products are presented. The possibilities of increasing the efficiency of the process of low-temperature plasma modification of metal products surface beds based on real-time control of its progress using predictive decision-making methods are determined. For this purpose, the results of earlier studies of the fundamental properties of dynamic processes under conditions of multimode operation and evolutionary changes in the states of technological structures of the plasma generator are used. To create a predictive technology for real-time decision-making, an information system has been additionally implemented that provides monitoring of the process of exposure of low-temperature plasma to the surface of the product according to the parameters of electrical and optical signals. A model of interaction of electromagnetic field generation system, the plasma cloud and the surface layer of the product has been developed, taking into account electrostatic processes. Numerical evaluations of the electric field distribution in a plasma chamber have been performed, the design of the coaxial energy input has been optimized, and the conditions for stable combustion of a microwave discharge on the surface of cylindrical objects have been determined. Stability evaluation methods and identification of process flow patterns based on the analysis of electrical and optical signals recorded in real time are proposed. The use of Hearst statistics, the method of sequential differences and the Fisher criterion made it possible to quantify the stability of processing procedure and justify the effectiveness of operating parameters correction. An algorithm has been developed for controlling the interaction of electromagnetic and electrostatic fields during low-temperature plasma formation of composite structures, i.e. a processing results analysis unit that integrates diagnostic and adaptive control results. The obtained results confirm the expediency of using intelligent approaches to improve the accuracy and reproducibility of plasma modification in conditions of varying technological modes.

**Keywords:** operational assessment, management, integrative criteria, plasma technologies, artificial intelligence methods

**For citation:** Brzhozovsky B.M., Brovkova M.B., Martynov V.V. Implementation of predictive control of precision plasma modification for geometrically complicated parts surfaces / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 8 (170). P. 3–10. doi: 10.30987/2223-4608-2025-8-3-10

### Введение

Представленный метод прецизионной микроволновой плазменной модификации поверхности изделий является новым и универсальным в применении для различных металлов и сплавов. Модификация осуществляется за счет структурной перестройки поверхностного слоя изделия непосредственно воздействием плазмы на его поверхность без нанесения дополнительных пленок и покрытий и с минимальными затратами энергии (не более 300 Вт мощности излучения магнетрона в течение 10 минут). Практически вся энергия излучения магнетрона расходуется на нагрев и плавление поверхностного слоя

обрабатываемых изделий. Это обеспечивает отсутствие тепловых деформаций изделий и проблемы адгезии покрытия с поверхностями обрабатываемых изделий, что принципиально отличает рассматриваемую технологию от применяемых в современной практике PVD и CVD технологий, вариантов ионно-плазменного напыления на основе ВЧ и СВЧ плазмы, магнетронного распыления и напыления, которые в общем случае не обеспечивают прецизионную модификацию. Основными результатами воздействия плазмы комбинированного газового разряда на поверхностный слой обрабатываемого изделия являются изменения морфологии и химического состава, способствующие улучшению физико-механических и

электрофизических свойств. Дальнейшее повышение эффективности процесса низкотемпературной плазменной модификации поверхностного слоя металлических изделий возможно на основе управления его ходом в реальном времени на основе предиктивных методов принятия решений. Реализуемость этих методов в рассматриваемой микроволновой модификации обусловлена имеющемуся научно-техническому заделу по моделированию и оптимизации формирования плазмы в реальных условиях многономенклатурного производства. Нами разработаны модели, позволяющие получать и изучать поведение сигналов, которые возникают в технологической установке при взаимодействии электромагнитного и электростатического полей, формирующих газовый разряд низкотемпературной плазмы вблизи поверхности изделия. Представлены данные, подтверждающие адекватность модели. Обоснован показатель, отображающий стабильность процесса взаимодействия плазмы с поверхностью изделия по степени отклонения формы сигнала от синусоидальной. Проведено исследование возможности управления процессом модификации. Получены и изучены зависимости показателя стабильности от значений параметров изделия как функций режимных параметров процесса: потенциала смещения или анодного тока магнетрона применения [1]. Эти и другие теоретические и экспериментальные исследования сформировали основу для принятия решений при управлении и идентификации процессов модификации.

Для исследований результатов и анализа слабо формализуемых динамических процессов плазменной модификации разработаны специальные методы и алгоритмы оценивания на основе методов искусственного интеллекта [2 – 6]. Выполнен комплекс теоретических исследований по оценке возможностей оптимизации взаимодействия электромагнитного и электростатического полей за счет внесения изменений в значения режимных параметров. Сформирована технология повышения эффективности процессов низкотемпературной плазменной обработки за счет: наблюдения за

ходом обработки по сигналу о токе смещения, регистрируемом в цепи «плазма-изделие» для определения моментов реализации управления; анализа сигнала о колебаниях анодного тока магнетрона для выбора режимного параметра, значение которого необходимо изменить; комплексного оценивания результатов обработки для принятия обоснованного решения о целесообразности ее повторного проведения.

Реализация предиктивной идентификации и управления обеспечена интеграцией методов и результатов теоретических и экспериментальных исследований при принятии обоснованных решений на основе информационной системы, позволяющие наблюдать за ходом процесса воздействия низкотемпературной плазмы на поверхность изделия по параметрам электрического и оптического сигналов в реальном времени.

#### Методы и подходы

Реализация предиктивного управления прецизионной плазменной модификацией геометрически сложных поверхностей деталей основывается на исследованиях газового разряда низкотемпературной плазмы с целью определения режима его горения, обеспечивающего максимальное улучшение свойств поверхностного слоя обрабатываемого изделия без тепловых деформации [7, 8]. Рассмотрены основные конструктивные варианты подачи энергии сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения в торцевую стенку цилиндрического резонатора. Выбраны и оптимизированы конструкции двух типов коаксиального ввода энергии, отличающиеся расположением коаксиальной линии относительно требуемого направления распространения волны. В результате расчетов определен электрические поля внутри цилиндрической камеры и в рупорных коаксиальных антеннах, определены коэффициенты стоячей волны систем. Проведено сравнение распределения электрического поля при помещении в камеру металлических объектов. Показаны области возникновения плазменного СВЧ

разряда на поверхности цилиндрического объекта [9]. Выполнена оптимизация вакуумной камеры плазматрона и обоснование

дополнительных информационных каналов с учетом особенностей формирования предиктивной технологии.

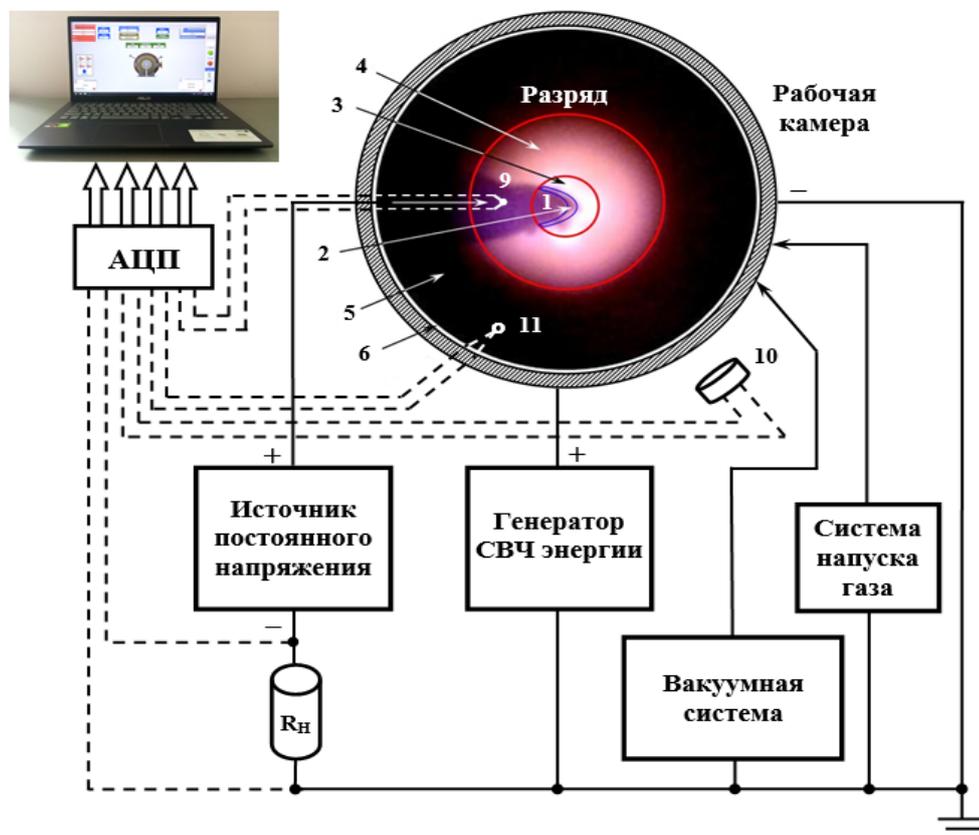


Рис. 1. Схема устройства плазменной модификации изделий для упрочнения их поверхностного слоя

Fig. 1. Diagram of the device for plasma modification of products for hardening their surface layer

Для изучения фундаментальных свойств реализуемых технологических процессов разработана модель цепи «система формирования электромагнитного поля – плазма – поверхностный слой – изделие – система формирования электростатического поля» и выполнено исследование электрических процессов, сопровождающих формирование показателей свойств поверхностного слоя изделий. Рассмотрена эффективность управления низкотемпературной плазменной модификации металлических изделий в реальном времени [1].

Выявлены основные закономерности влияния режимных параметров (анодного тока магнетрона и подаваемого на изделие потенциала), параметров изделия и характеристик его поверхностного слоя на поведение электрического сигнала. Проведена оценка возможности

управления процессом взаимодействия плазмы с поверхностью изделия при формировании композитной структуры. Рассмотрены подходы к повышению эффективности процесса низкотемпературной плазменной модификации. Установлено, что их эффективность зависит от качества сопровождающих модификацию процессов, и повышается в условиях, когда воздействие на процессы обеспечивает стабильность ее хода [7].

Результаты исследований были использованы при решении задачи, связанной с обоснованием возможностей управления процессом формирования композитных структур в поверхностном слое изделий при воздействии низкотемпературной плазмы. Реализована информационная система, позволяющие наблюдать за ходом процесса воздействия

низкотемпературной плазмы на поверхность изделия по параметрам электрического и оптического сигналов. Для количественной оценки сигналов [10] используются в первом случае статистика Херста ( $H$ ), во втором среднее значение интенсивности излучения плазменного облака ( $J$ ).

Статистика  $H$  представляет собой угол наклона построенной в логарифмических координатах линии регрессии усредненных значений нормированных на стандартное отклонение ( $S$ ) размахов сигнала ( $R$ ), представляющих собой разности между максимальными ( $X_{\max}$ ) и минимальными ( $X_{\min}$ ) накопленными на фиксированном интервале времени отклонениями сигнала от среднего значения и отображает влияние каждого усредненного показателя на направление и степень его изменений. Достоверность вычисления статистики Херста зависит от длины реализации регистрируемого электрического сигнала и частоты его дискретизации. Для идентификации причины возникновения разброса используется способ последовательных разностей.

Способ последовательных разностей заключается в вычислении двух несмещенных оценок дисперсии сигнала. Первая оценка  $c^2$  вычисляется по результатам нахождения  $m-1$  разностей  $a_i$  соседних значений сигнала  $I_a$  и последующего усреднения их квадратов по формуле:

$$c^2 = \frac{1}{2(m-1)} \sum_{i=1}^{m-1} a_i^2. \quad (1)$$

Вторая оценка  $s^2$  вычисляется по формуле обычной оценки дисперсии

$$s^2 = \frac{1}{(m-1)} \sum_{i=1}^m (I_{a,i} - \bar{I}_a)^2. \quad (2)$$

Когда центр распределения ( $\bar{I}_a$ ) изменяется при неизменной дисперсии, то это мало скажется на последовательных разностях, а следовательно, и на величине  $c^2$ , но значительно отразится на величине  $s^2$ , так как в формулу (2) входит непосредственно величина  $\bar{I}_a$ . Тогда для оценки значимости ее изменений можно воспользоваться критерием

$$\tau = \frac{c^2}{s^2}. \quad (3)$$

Критическая область для  $\tau$ , отвечающая  $q$  уровню значимости при  $m > 20$ , будет определяться неравенством

$$\tau < \tau_q, \quad (4)$$

где

$$\tau_q = 1 - \frac{t_q}{\sqrt{m+1}}. \quad (5)$$

Значение  $\tau_q$  определяется из соотношения

$$\Phi(t_q) = 0,5 - \frac{q}{100}. \quad (6)$$

Для  $q = 5\%$  значение функции Лапласа  $\Phi(t_q)$  равно 0,45; соответствующее ему  $t_q = 1,65$ . Если по результатам вычисления  $\tau$  и  $\tau_q$  условие (4) будет выполняться, то это укажет на то, что колеблемость значений анодного тока обусловлена изменениями его среднего значения тем в большей степени, чем меньше будет значение  $\tau$ . В противном случае колеблемость обусловлена разбросом значений вокруг среднего (дисперсией) с вероятностью  $P = 1 - q = 1 - 0,05 = 0,95$ .

Блок анализа результатов обработки (рис. 2), по сути, реализует методику оценки качества формирования композитных структур и состоит из двух модулей: оценки эффективности коррекции значений режимных параметров и оценки степени и направлений изменения параметров поверхностного слоя. Оценка эффективности коррекции значений режимных параметров производится по результатам вычисления критерия Фишера, позволяющего оценить степень уменьшения дисперсии оценок, во-первых, статистики Херста, во-вторых, анодного тока магнетрона. Оценка степени и направлений изменения параметров поверхностного слоя производится по результатам вычисления степени его уплотнения и определения стационарного потенциала поверхности.

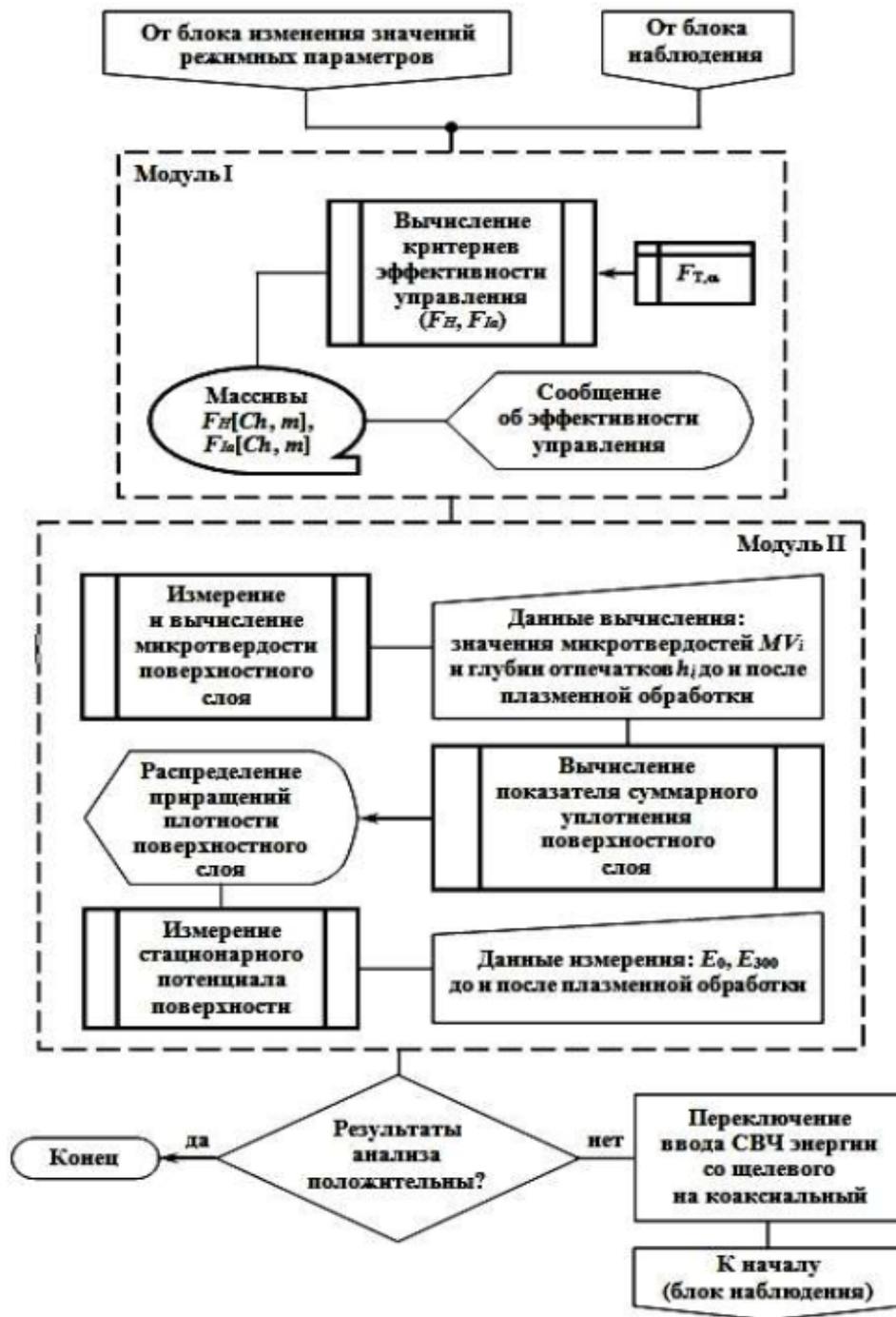


Рис. 2. Алгоритм технологии управления взаимодействием электромагнитного и электростатического полей при низкотемпературном плазменном формировании композитных структур – блок анализа результатов обработки

Fig. 2. Control technology algorithm for controlling the interaction of electromagnetic and electrostatic fields during low – temperature plasma formation of composite structures – a block for analyzing processing results

### Результаты

Результаты исследования подтвердили высокую эффективность реализации предиктивного управления в технологии

прецизионной низкотемпературной плазменной модификации геометрически сложных поверхностей. Проведённый анализ электрических и оптических сигналов позволил обоснованно оценить степень устойчивости процесса,

его адаптивность к изменениям режимных параметров, а также чувствительность к структуре поверхности обрабатываемых изделий.

Особое внимание заслуживает применение статистики Херста и метода последовательных разностей для оценки природы флуктуаций анодного тока. Этот подход обеспечивает возможность раннего диагностирования нестабильных режимов и своевременной коррекции управляющих воздействий. Установлено, что использование критерия Фишера для оценки степени коррекции параметров позволяет количественно охарактеризовать стабильность процесса формирования композитных структур.

Таким образом, совмещение высокоточной сенсорной регистрации, математической обработки сигналов и активного предиктивного управления формирует основу для создания интеллектуальной технологической платформы, обеспечивающей не только улучшение физико-химических свойств поверхности, но и воспроизводимость процессов модификации при варьирующихся внешних условиях.

### Выводы

1. Разработана и обоснована методология предиктивного управления процессом прецизионной плазменной модификации поверхностей с применением анализа электрических и оптических сигналов.

2. Предложена модель взаимодействия электромагнитного и электростатического полей в системе «магнетрон – плазма – изделие», обеспечивающая высокую степень контроля над процессом формирования композитных поверхностных слоёв.

3. Использование статистических методов анализа (статистика Херста, критерий Фишера, метод последовательных разностей) доказало свою результативность в оценке стабильности технологического процесса.

4. Экспериментально подтверждена возможность управления морфологией и электрофизическими свойствами обрабатываемых поверхностей за счёт коррекции режимных параметров в реальном времени.

5. Результаты работы могут быть использованы для создания интеллектуальных систем управления технологическими процессами в высокоточной обработке изделий машиностроения.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Martynov V.V., Brzhozovskii B.M., Zinina E.P., Sussky A.V.** Substantiation of the technology for controlling the process of low-temperature plasma modification of metal product surface layer by the electrical signal parameters // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 117, 2021, Pp. 2405–2419.

2. **Николенко С.И., Кадури А.А., Архангельская Е.В.** Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2018. 480 с

3. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: Пер. с англ. М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2016. 1104 с.

4. **Yanming Guo, Yu Liu, Ard Oerlemans, Songyang Lao, Song Wu, Michael S.** Lew Deep learning for visual understanding: A review, *Neurocomputing*, Volume 187, 2016, Pp. 27–48, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.116>.

5. **Schmidhuber J.** Deep learning in neural networks: an overview // *Neural Netw.* 61, 2015, Pp. 85–117.

6. **Ren R., Hung T., Tan K.C.** A generic deep-learning-based approach for automated surface inspection // *IEEE Trans. Cybernet.* 48 (3), 2018, Pp. 929–940, <https://doi.org/10.1109/TCYB.2017.2668395>.

7. **Brzhozovskii B., Martynov V., Zinina E., Permyakov S.** Assessment of possibilities to improve the efficiency of low-temperature plasma modification of the surface layer of metal products // VII Scientific School «Dynamics of Complex Networks and their Applications» (DCNA'2023), 2023. Pp. 56–60.

8. **Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В.** Основные результаты и направления дальнейших исследований по низкотемпературному плазменному формированию композитных структур на рабочих поверхностях геометрически сложных металлических изделий // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2022. № 8 (134). С. 20–26.

9. **Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В., Довгань А.А., Бахтеев И. Ш., Молчанов С.Ю.** Исследование распределения напряженности электрического поля в цилиндрической камере с коаксиальным вводом энергии сверхвысокочастотного излучения // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. Т. 87, № 2, 2023, С. 218–225.

10. **Солонин И.С.** Математическая статистика в технологии машиностроения / И.С. Солонин. М.: Машиностроение, 1972. 216 с.

## REFERENCES

1. Martynov V.V., Brzhozovskii B.M., Zinina E.P., Sussky A.V. Substantiation of the technology for controlling the process of low-temperature plasma modification of metal product surface layer by the electrical signal parameters // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 117, 2021, pp. 2405–2419.
2. Nikolenko S.I., Kadurin A.A., Arkhangelskaya E.V. Deep learning. St. Petersburg: Peter, 2018, 480 p.
3. Khaykin S. Neural networks: a complete course, 2nd ed.: Translated from English. Moscow: I.D. Williams LLC, 2016, 1104 p.
4. Yanming Guo, Yu Liu, Ard Oerlemans, Songyang Lao, Song Wu, Michael S. Lew Deep learning for visual understanding: A review, Neurocomputing, Volume 187, 2016, pp. 27–48, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.116>.
5. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview // Neural Netw. 61, 2015, pp. 85–117.
6. Ren R., Hung T., Tan K.C. A generic deep-learning-based approach for automated surface inspection // IEEE Trans. Cybernet. 48 (3), 2018, pp. 929–940, <https://doi.org/10.1109/TCYB.2017.2668395>.
7. Brzhozovskii B., Martynov V., Zinina E., Permyakov S. Assessment of possibilities to improve the efficiency of low-temperature plasma modification of the surface layer of metal products // VII Scientific School «Dynamics of Complex Networks and their Applications» (DCNA'2023), 2023. pp. 56–60.
8. Brzhozovsky B.M., Zinina E.P., Martynov V.V. The main results and directions of further research on low-temperature plasma formation of composite structures on functional surfaces of geometrically complicated metal products // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2022, no. 8(134), pp. 20–26.
9. Brzhozovsky B.M., Zinina E.P., Martynov V.V., Dovgan A.A., Bakhteev I. Sh., Molchanov S.Y. Study of the electric field density distribution in cylindrical chamber with coaxial feed of super high frequency radiation energy // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physical series, vol. 87, no. 2, 2023, pp. 218–225.
10. Solonin I.S. Mathematical Statistics in Mechanical Engineering Technology / I.S. Solonin. — Moscow: Mashinostroenie, 1972, p. 216.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.05.2025; одобрена после рецензирования 19.05.2025; принята к публикации 30.05.2025.

The article was submitted 15.05.2025; approved after reviewing 19.05.2025; assepted for publication 30.05.2025.