

**МЕТОДОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ПРИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ПРОИЗВОДСТВА
ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

Д. С. Соловьев✉

*Кафедра математического моделирования и информационных технологий,
solovjevdenis@mail.ru; ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет
имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: интеллектуальная система управления; методология; неопределенность; система поддержки принятия решений; технологические системы производства гальванических покрытий; человеческий фактор.

Аннотация: Приведено описание причин неопределенности, обуславливающей снижение эффективности функционирования технологических систем производства гальванических покрытий. Рассмотрена и проанализирована методология создания проблемно-ориентированных систем поддержки принятия решений и интеллектуального управления в условиях неопределенности для повышения эффективности функционирования технологических систем производства гальванических покрытий. Приведена взаимосвязь принципов системного подхода, методов и алгоритмов, формирующих предлагаемую методологию. Продемонстрирована архитектура и дано описание алгоритмического обеспечения систем.

Введение

Гальванические покрытия являются ключевыми операциями для защиты деталей от коррозии, улучшения механических свойств и придания декоративных качеств. В условиях растущих требований к технологическим системам производства гальванических покрытий (ТСПГП) повышение эффективности их функционирования становится важной задачей для многих отраслей промышленного производства. Многочисленные исследования в данной предметной области направлены на оптимизацию технологических систем через разработку оборудования и настройку параметров управления [1 – 5]. Эффективность функционирования ТСПГП существенно зависит от качества принимаемых решений и сформированных управлений. Однако неопределенность, вызванная сложностью их влияния на состояние объекта (ТСПГП) и субъективностью выбора методов для решения данных задач лицом, принимающим решение (ЛПР), приводит к снижению прогнозируемости и, как следствие, эффективности функционирования ТСПГП. Сложность оценки влияния принятых решений и сформированных управлений обусловлена многообразием факторов, оказывающих нелинейный характер влияния на объект, при наличии нескольких альтернатив и многокритериальности задачи. Субъективность выбора методов решения задачи связана

с индивидуальными опытом, знаниями и предпочтениями ЛПР. Отсутствие единого подхода для выбора методов приводит к разным результатам при одинаковых начальных данных, что создает мультивариантность, которая затрудняет повышение эффективности функционирования ТСПП. В свою очередь, отклонение реальных значений входных переменных от значений, используемых при принятии решений и формировании управляющих воздействий, также может негативно сказаться на эффективности функционирования ТСПП. Существующие меры по повышению эффективности ТСПП, такие как стандартизация принятых решений и формируемых управлений и переобучение, часто оказываются недостаточными. Поэтому актуальна необходимость использования проблемно-ориентированных систем поддержки принятия решений (СППР) и интеллектуального управления (ИСУ), которые помогут ЛПР обосновать принятые решения и сформированные управления для повышения функционирования ТСПП. Для создания таких систем требуется разработка соответствующей методологии.

Цель работы – создание методологии поддержки принятия решений при интеллектуальном управлении ТСПП для повышения эффективности их функционирования.

Постановка задачи для методологии.

Взаимосвязь формирующих ее принципов, методов и алгоритмов

Сформулируем задачу принятия решений и формирования управлений, в рамках разрабатываемой методологии: для заданных входных переменных X (конфигурация детали) необходимо подобрать такие управляющие воздействия U (оборудование и режим его работы), соответствующие возможным альтернативам A (вариантам оснастки гальванической ванны), которые обеспечивают для выходной переменной Y (толщина гальванического покрытия на поверхности детали) экстремальные значения критериев эффективности K . Решение задачи усложняется субъективным выбором методов нормализации разнородных данных f , расчета весовых коэффициентов Φ и принятия решений F , а также типа ИСУ (на базе ассоциативной памяти или нечеткого логического вывода) для формирования управления и ее настройки. На рисунке 1 отображена связь между принципами, методами и алгоритмами, которые составляют методологию поддержки принятия решений при интеллектуальном управлении ТСПП. В основе принципов системного подхода при реализации СППР и ИСУ используются: информативность П1; эффективность П2; модульность П3; неопределенность П4; эквивиальность П5; интеллектуальность П6; быстроедействие П7. Методы (М) и алгоритмы (А), лежащие в основе функционирования проблемно-ориентированной СППР и ИСУ: выбор метода нормализации данных (М1, А1) [6]; агрегация значений весовых коэффициентов значимости критериев (М2, А2) [7]; расчет коэффициентов компетентности участников голосования (М3, А3.1, А3.2) [8]; формирование знаний в ассоциативной памяти (М4, А4) [9]; расчет весовых коэффициентов значимости входных переменных из ассоциативной памяти (М5, А5); поиск содержимого ассоциативной памяти (М6, А6); определение параметров функций принадлежности термов лингвистических переменных (М7, А7); формирование стабилизирующего управления процессом (М8, А8) [10]; выбор типа ИСУ (М9, А9). Количественная оценка минимизации человеческого фактора по методам М1 – М9, реализованных с помощью алгоритмов А1 – А9, осуществляется посредством анализа сокращения пространства допустимых решений с точки зрения уменьшения числа вариантов для выбора методов нормализации данных f , вычисления весовых коэффициентов Φ и принятия решений F , а также параметров настройки нечеткого вывода. Кроме того, оценивается расхождение результатов кластеризации ассоциативной памяти, полученных с учетом значимости входных переменных и без учета их значимости.

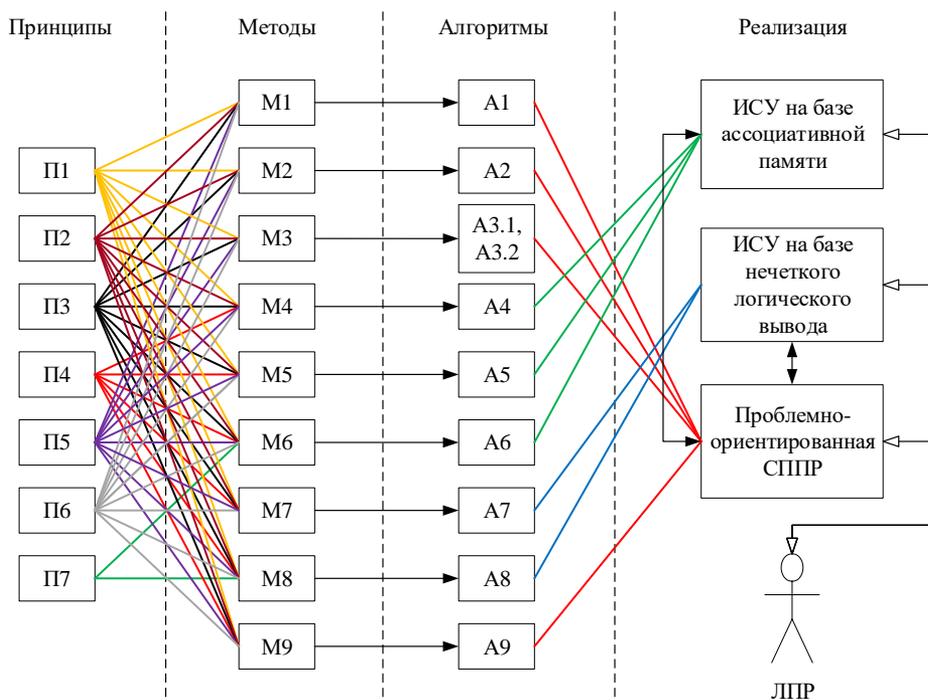


Рис. 1. Методология поддержки принятия решений при интеллектуальном управлении ТСПГ

Архитектура и алгоритмическое обеспечение СППР

Архитектура проблемно-ориентированной СППР, которая состоит из нескольких взаимодействующих подсистем, показана на рис. 2.

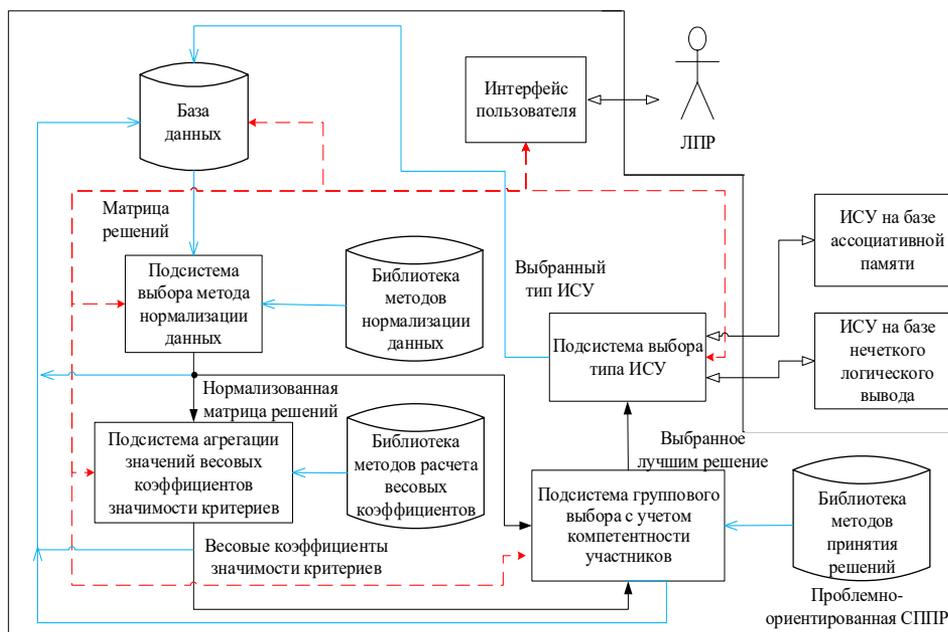


Рис. 2. Архитектура проблемно-ориентированной СППР

Алгоритмическое обеспечение проблемно-ориентированной СППР включает: ввод исходных данных (матрица решений для вариантов нанесения гальванического покрытия), нормализацию матрицы решений, агрегацию весов критериев в ней, определение оптимального решения (оборудования) путем группового голосования и формирование планов экспериментов по расчету параметров управления (рис. 3). Если результаты не удовлетворяют требуемой значимости по статистическому критерию χ^2 , то процесс расчета повторяется, иначе выводятся полученные результаты (выбранное оборудование и параметры управления) для ТСПП.

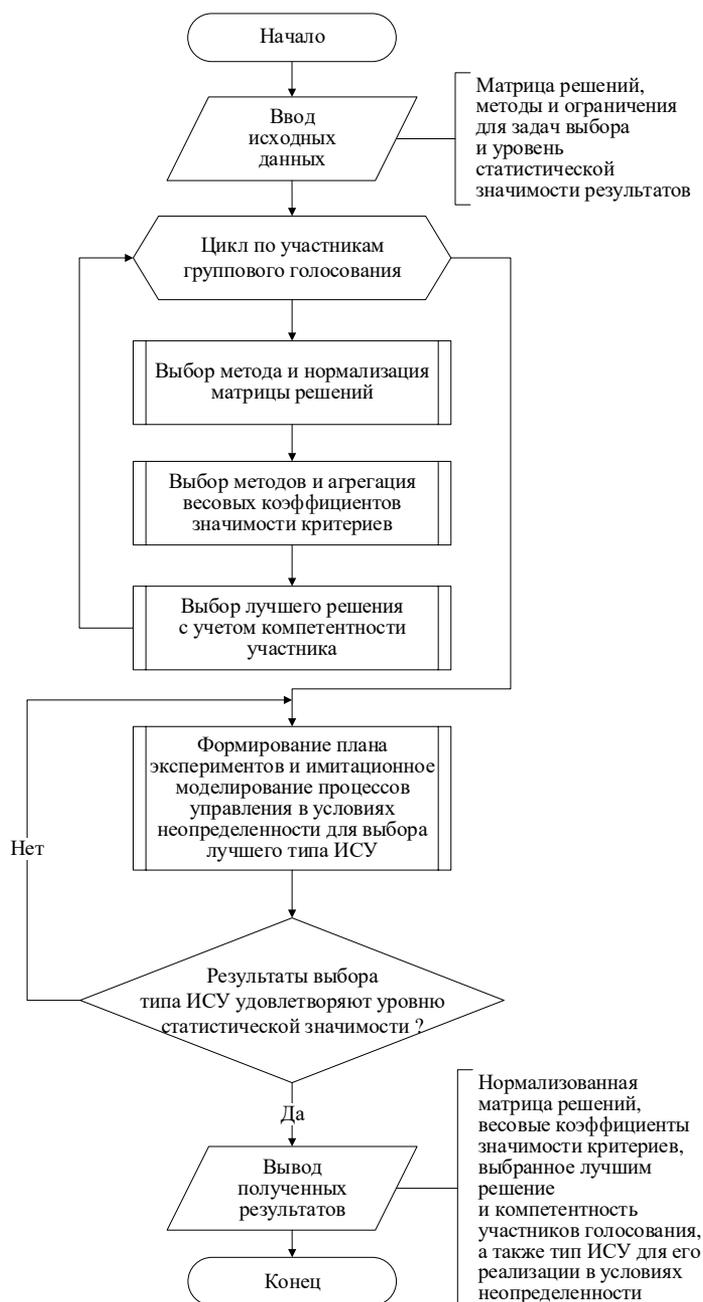


Рис. 3. Алгоритмическое обеспечение проблемно-ориентированной СППР

Вычислительный эксперимент

Функционирование разработанных систем проанализировано на примере выбора типа ИСУ, основанной на ассоциативной памяти (АП) или нечетком логическом выводе (НЛВ) для ТСПГП, при этом акцент сделан на условиях неопределенности значений таких факторов, как длительность процесса электролиза, площадь обрабатываемой детали, температура и кислотность электролита.

Эффективность функционирования ТСПГП оценивается с точки зрения минимизации взвешенных относительных расхождений между ожидаемыми оптимальными критериями: равномерностью покрытий, производительностью процесса, расходом ресурсов и стоимостью выполнения работ, и фактическими значениями, полученными в условиях неопределенности. Для количественной оценки этих критериев использованы заранее определенные веса, которые составляют: для равномерности покрытий – 0,112; производительности процесса – 0,248; расхода ресурсов – 0,342; стоимости выполнения работ – 0,298. В целях обоснования выбора типа ИСУ проведена серия из 20 экспериментов. Данное количество экспериментов является достаточным для применения критерия χ^2 , так как ожидаемая частота для каждой категории, соответствующей выбору типа ИСУ, составляет 10. Это значение превышает минимально допустимый порог в 5, что позволяет обеспечить статистическую значимость полученных результатов и повысить надежность выводов о предпочтительности того или иного типа ИСУ режимом ТСПГП.

Анализ полученных результатов и их обсуждение

На рисунке 4 представлены результаты выбора типа ИСУ, которые настроены как с участием ЛПП, так и без него, в рамках проведенных экспериментов по двум категориям: 1 – АП; 2 – НЛВ.

Анализ результатов выбора типа ИСУ показывает наличие различий в 45 % случаев, которые распределяются следующим образом: АП выбрана 17 и 12 раз соответственно для настроек без и с участием ЛПП, в то время как НЛВ была выбрана 3 и 8 раз в тех же условиях. Для интеллектуальных систем управления, настроенных без участия ЛПП, вычисленное значение критерия χ^2 составляет 9,8, тогда как для ИСУ, настроенных с участием ЛПП, это значение равно 0,8.

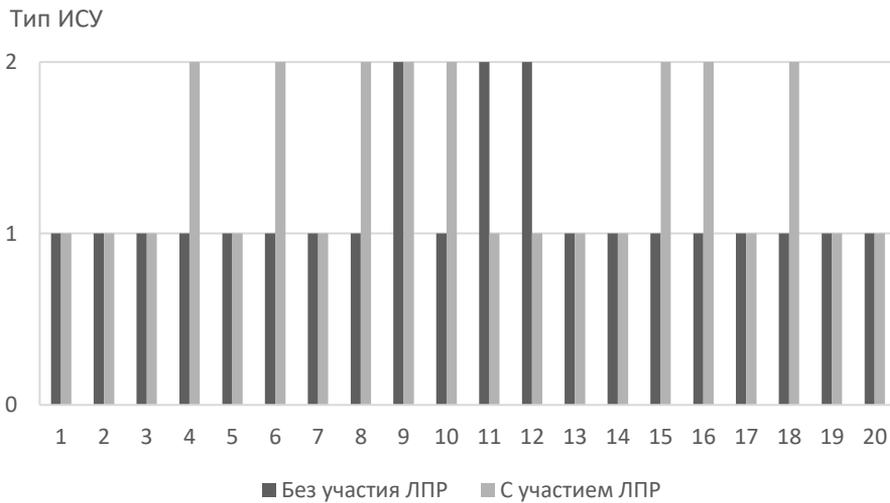


Рис. 4. Результаты выбора типа ИСУ по экспериментам

При установленном уровне значимости 0,05 критическое значение χ^2 составляет 3,84. Таким образом, выбор ИСУ с АП, настроенной без участия ЛПР, демонстрирует статистическую значимость по сравнению с выбором ИСУ с НЛВ. В то же время, между выбором типов ИСУ, настроенных с участием ЛПР, статистически значимых различий не обнаруживается. Следовательно, использование ИСУ, настроенных с участием ЛПР, способствует увеличению эффективности функционирования ТСПГП на 29,5 и 24 % при использовании АП и НЛВ соответственно. При отсутствии участия ЛПР эффективность возрастает до 49 и 46 % для тех же типов ИСУ.

Заключение

Для процессов производства гальванических покрытий, ключевыми факторами, способствующими повышению эффективности технологических систем, становятся процессы поддержки принятия решений и формирования управлений для ЛПР. Предложена методология, направленная на решение указанной проблемы через разработку проблемно-ориентированной СППР и ИСУ, а также их интеграцию в контур ТСПГП. Внедрение данных систем обеспечивает не только автоматизацию процессов, но и улучшение технико-экономических показателей функционирования ТСПГП, что достигается за счет реализации процессов принятия решений и формирования управлений при помощи методов и алгоритмов разработанной методологии, используемой при настройке систем. Таким образом, предложенная методология способствует созданию более устойчивой и предсказуемой среды для управления производственными системами, что в свою очередь ведет к оптимизации ресурсов и повышению конкурентоспособности предприятия.

Список литературы

1. Ishizuka, N. Topology optimization for unifying deposit thickness in electroplating process / N. Ishizuka, T. Yamada, K. Izui, S. Nishiwaki // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2020. – Vol. 62. – P. 1767 – 1785. doi: 10.1007/s00158-020-02574-8
2. Numerical optimization of electrodeposition thickness uniformity with respect to the layout of anode and cathode / G. Yang, D. Deng, Y. Zhang, Q. Zhu, J. Cai // Electrocatalysis. – 2021. – Vol. 12. – P. 478 – 488. doi: 10.1007/s12678-021-00668-5
3. Разработка конструкции установки химического никелирования, функционирующей в составе гальванической линии / А. Б. Борисенко, В. В. Храмцов, В. А. Немтинов, А. В. Крылов, М. А. Матрохин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 275 – 284. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.275-284
4. Пчелинцева, И. Ю. Система распределенной обработки информации для решения задачи снижения неравномерности гальванических покрытий / И. Ю. Пчелинцева // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 398 – 411. doi: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.398-411
5. Санников, С. А. Системный анализ процесса проектирования линий для электрохимической и химической обработки деталей / С. А. Санников, В. Г. Мокрозуб, М. С. Калистратов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 6 – 16. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.006-016
6. Соловьев, Д. С. Формализация задачи и разработка алгоритма выбора метода нормализации данных для принятия решений / Д. С. Соловьев // Вестн. Тамб.

гос. техн. ун-та. – 2024. – Т. 30, № 1. – С. 17 – 27. doi: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.017-027

7. Соловьев, Д. С. Метод объективизации значений весовых коэффициентов для принятия решений в многокритериальных задачах / Д. С. Соловьев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 161 – 168. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-161-168

8. Соловьев, Д. С. Метод расчета коэффициентов компетентности участников группового принятия решений для выбора наилучшей альтернативы при мультивариантности результата / Д. С. Соловьев // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23, № 1. – С. 169 – 193. doi: 10.15622/ia.23.1.6

9. Соловьев, Д. С. Разработка и анализ интеллектуальной системы управления гальваническим процессом на базе ассоциативной памяти в условиях предсказуемой неопределенности / Д. С. Соловьев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 24, № 11. – С. 573 – 582. doi: 10.17587/mau.24.573-582

10. Соловьев, Д. С. Разработка интеллектуальной системы с нечеткой стабилизацией управления в условиях неопределенности входных воздействий / Д. С. Соловьев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2024. – № 1. – С. 38 – 45. doi: 10.24143/2072-9502-2024-1-38-45

Methodology of Decision-Making Support in Intelligent Control of Industrial Systems for Galvanic Coatings Production

D. S. Solovjev✉

*Department of Mathematical Modeling and Information Technologies,
solovjevdenis@mail.ru; Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia*

Keywords: intelligent control system; methodology; uncertainty; decision support system; technological systems for the production of galvanic coatings; human factor.

Abstract: The article describes the reasons for uncertainty causing a decrease in the efficiency of industrial systems for galvanic coatings production. The proposed methodology is used to create problem-oriented systems for decision-making support and intelligent control under uncertainty to improve the efficiency of industrial systems for the galvanic coatings production. The relationship between the principles of the system approach, methods and algorithms that form the proposed methodology is given. The architecture is demonstrated, and the algorithmic support of the systems is described.

References

1. Ishizuka N., Yamada T., Izui K., Nishiwaki S. Topology optimization for unifying deposit thickness in electroplating process, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, vol. 62, pp. 1767-1785. doi: 10.1007/s00158-020-02574-8

2. Yang G., Deng D., Zhang Y., Zhu Q., Cai J. Numerical optimization of electrodeposition thickness uniformity with respect to the layout of anode and cathode, *Electrocatalysis*, 2021, vol. 12, pp. 478-488. doi: 10.1007/s12678-021-00668-5

3. Borisenko A.B., Khramtsov V.V., Nemtinov V.A., Krylov A.V., Matrokhin M.A. [Designing a chemical nickel plating unit operating as part of a galvanic line], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 275-284. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.275-284 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Pchelintseva I.Yu. [A distributed information processing system to solve the problem of reducing electroplating unevenness], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 3, pp. 391-411. doi: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.398-411 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Sannikov S.A., Mokrozub V.G., Kalistratov M.S. [System analysis of the design process of lines for electrochemical and chemical processing of parts], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 6-16. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.006-016 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Solovjev D.S. [Formalization of the problem and development of an algorithm for selecting a data normalization method for decision making support], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 1, pp. 17-27. doi: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.017-027 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Solovjev D.S. [The objectification method of the weight coefficients for decision-making in multicriteria problems], *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2023, vol. 23, no. 1, pp. 161-168. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-161-168 (In Russ., abstract in Eng.)
8. Solovjev D. [Competence coefficients calculation method of participants in group decision-making for selecting the best alternative with the multivariate of the result], *Informatika i avtomatizaciya. [Informatics and Automation]*, 2024, vol. 23, no. 1, pp. 169-193. doi: 10.15622/ia.23.1.6 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Solovjev D.S. [Development and analysis of an intelligent electroplating control system based on associative memory under conditions of predictable uncertainty], *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie]*, 2023, vol. 24, no. 11. pp. 573-582. doi: 10.17587/mau.24.573-582 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Solovjev D.S. [Development of a fuzzy stabilization control intelligent system under conditions of input influences uncertainty], *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. [Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: management, computer science and informatics]*, 2024, no. 1, pp. 38-45. doi: 10.24143/2072-9502-2024-1-38-45 (In Russ., abstract in Eng.)

Methodik zur Entscheidungsunterstützung für die intelligente Steuerung der technologischen Systeme der galvanischen Beschichtungsproduktion

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung der Gründe für die Unsicherheit gegeben, die zu einer Verschlechterung der Funktionseffizienz technologischer Systeme zur Herstellung galvanischer Beschichtungen führt. Betrachtet und analysiert ist die Methodik zur Schaffung problemorientierter Entscheidungsunterstützungssysteme und intelligenter Steuerung unter Unsicherheitsbedingungen zur Verbesserung der Funktionseffizienz technologischer Systeme zur Herstellung galvanischer Beschichtungen. Die Beziehung zwischen den Prinzipien des Systemansatzes, den Methoden und Algorithmen, die die vorgeschlagene Methodik bilden, ist dargestellt.

Die Architektur wird demonstriert und die algorithmische Unterstützung der Systeme ist beschrieben.

Méthodologie d'aide à la décision dans la gestion intelligente des systèmes technologiques des revêtements de galvanoplastie

Résumé: Est donnée une description des raisons de l'incertitude qui entraîne une diminution de l'efficacité des systèmes technologiques de production des revêtements de galvanoplastie. Est examinée et analysée la méthodologie pour la création des systèmes d'aide à la décision et de contrôle intelligent axés sur les problèmes dans des conditions d'incertitude afin d'améliorer l'efficacité des systèmes technologiques de la production des revêtements de galvanoplastie. Est présentée la relation entre les principes de l'approche systémique, les méthodes et les algorithmes qui forment la méthodologie proposée. Est démontrée l'architecture et sont décrits les systèmes algorithmiques.

Автор: *Соловьев Денис Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия.