

# Робастное управление и оценка устойчивости производственных систем

Robust management and assessment of the stability of production systems



**Е. М. Ильинская,**  
д. э. н. профессор,  
Санкт-Петербургский государственный  
университет аэрокосмического  
приборостроения  
✉ [tempra\\_2001@mail.ru](mailto:tempra_2001@mail.ru)

**E. M. Ilinskaya,**  
doctor of economics, professor,  
Saint-Petersburg state university  
of aerospace instrumentation



**Л. В. Титова,**  
к. т. н., доцент, Санкт-Петербургский  
государственный университет  
промышленных технологий и дизайна  
✉ [lpcsutd@yandex.ru](mailto:lpcsutd@yandex.ru)

**L. V. Titova,**  
candidate of technical sciences, docent,  
Saint Petersburg state university  
of industrial technology and design

Актуальность проблемы робастного управления и робастных оценок производственных систем обусловлена необходимостью обеспечения конкурентоспособности производимой продукции и качества самих систем. Это, в свою очередь, требует разработку методов повышения эффективности внедрения волоконно-оптических смарт-систем на основе оценки устойчивости и робастности. Предполагается решение таких задач, как разработка параметров волоконно-оптической смарт-системы, а также методов адаптации модели робастности к оценке устойчивости систем. Решение поставленных задач предполагает использование методов, применяемых при системном анализе свойств динамических систем и новых материалов, организации производства, оценки систем на основе новых материалов с учетом волатильности и робастности. В статье уделено внимание различным режимам динамического состояния производственной системы, которые соответствуют тем или иным классификациям робастности. Дана характеристика модели волоконно-оптической смарт-системы с точки зрения формирования системной единицы. Показано значение робастного подхода для приближения сложной производственной системы к таргетированным показателям. Отдельное внимание уделено алгоритму повышения эффективности внедрения новых материалов и технологий. Представлена характеристика параметров внедрения при робастном подходе. В завершении статьи предложено использовать робастные эstimаторы для оценки устойчивости производственных систем, а также представлена последовательность их расчета.

The relevance of the problem of robust management and robust assessments of production systems is due to the need to ensure the competitiveness of manufactured products and the quality of the systems themselves. This, in turn, requires the development of methods to improve the efficiency of the implementation of fiber-optic smart systems based on the assessment of stability and robustness. It is supposed to solve such problems as the development of parameters of a fiber-optic smart system, as well as methods for adapting the robustness model to the assessment of the stability of systems. The solution of the tasks involves the use of methods used in the system analysis of the properties of dynamic systems and new materials, the organization of production, the evaluation of systems based on new materials, taking into account volatility and robustness. The article pays attention to various modes of the dynamic state of the production system, which correspond to certain classifications of robustness. The characteristic of the fiber-optic Smart system model is given from the point of view of the formation of a system unit. The importance of a robust approach for approximating a complex production system to targeted indicators is shown. Special attention is paid to the algorithm for improving the efficiency of the introduction of new materials and technologies. The characteristic of the implementation parameters with a robust approach is presented. At the end of the article, it is proposed to use robust estimators to assess the stability of production systems, and the sequence of their calculation is also presented.

**Ключевые слова:** робастная устойчивость, робастное качество, робастные подходы, волоконно-оптические системы, новые материалы и технологии, робастные эstimаторы.

**Keywords:** robust stability, robust quality, robust approaches, fiber-optic systems, new materials and technologies, robust estimators.

## Введение

Современные материалы с новыми физико-механическими свойствами в сочетании с расширением спектра их применения, а также межотраслевого взаимодействия при выпуске конечной радиоэлектронной продукции требуется внедрение адаптивных организационных структур, позволяющих ускорить внедрение инновационных изделий. Проблему устойчивости производственных систем можно оценивать с помощью робастных подходов, поскольку робастность в организации производства означает свойство системы сохранять свойства и качества в пределах заданных требований при предположении о происходящем изменении ее параметров или структуры под влиянием как внутренних, так и внешних воздействий. Для производственных систем важна возможность учета технологического разброса ее параметров, вызванных ее старением или изменением нагрузки. Если под устойчивостью понимается способность системы стремиться к некому определенному равновесию, то

робастность характеризуется с точки зрения неопределенности, включающей в себя немоделируемую динамику, структурную неопределенность и внешние воздействия [13].

На основе понятия эластичности можно определить робастность как низкую чувствительность запаса устойчивости к изменениям параметров объекта и можно вывести термин робастная устойчивость, которая отражает способность производственной системы гарантировать устойчивость в условиях неопределенности состояний и волатильности. Однако робастная устойчивость не может быть бесконечно эластичной, поэтому возникает понятие робастный предел или обоснованный таргет технологических изменений показателей производственной системы.

## Постановка проблемы

Задача повышения конкурентоспособности продукции требует обеспечения качества производственного процесса и выдвигает в научное поле разработку

рекомендаций по применению робастных подходов к достижению устойчивости производственных систем. Развитие положений робастности для организации производства следует согласовывать со сложностями возникающих организационных и производственных задач, с ростом затрат на обеспечение гибкости и волатильности производственного процесса. В рамках динамического состояния производственной системы существуют детерминированные и вероятностные режимы, которые соответствуют классификациям робастности как характеристики устойчивости с корректировкой на модель засорения, известную как модель Тьюки-Хубера.

Задача робастной устойчивости состоит в проверке устойчивости производственной системы для каждого элемента из множества неопределенности, поэтому возможны различные подходы к анализу: параметрический анализ при детерминированной робастности, нахождение вероятности устойчивости по отношению к случайной неопределенности при вероятностной робастности или нахождение вероятности при смешанной робастности.

Интеллектуальная радиоэлектроника относится к перспективным технологиям для многих областей применения, но технологические и автоматические процессы в данной сфере полностью не отработаны, что не позволяет стандартизировать процесс на стадии разработки и организации. Нет однозначных технологических требований к сборке микрокомпонентов на текстильных подложках, поэтому установление требований к качеству таких процедур является важной задачей робастного анализа.

### Результаты исследования

#### 1. Функциональная модель волоконно-оптической смарт-системы

Методологии оценки робастного качества, основанные на применении детерминированной, вероятностной или смешанной робастности позволяют создать новую единицу класса производственных систем, а именно, функциональную модель волоконно-оптической смарт-системы. Generic Standard on Printed Board Design и общий стандарт на проектирование печатных плат (IPC-2221, IPC-2221-A) устанавливают производственные допуски  $\pm 0,06$  мм, что требует точности, которую на самом очень трудно достичь при производстве волоконно-оптических изделий [5].

Для данной модели требуется волоконно-оптическая текстильно-интегрированная сенсорная сборка, в процессе которой микроэлектронные и микрооптические компоненты связаны с текстилем для формирования системной единицы. Диапазон требований к волоконно-оптической системе весьма широк и выходит за рамки простого размещения тех или иных элементов на типовых конструктивных решениях.

Синтез микроэлектроники и текстильных систем расширяет применение произведенной продукции в совершенно различных областях. Это авиастроение,

автомобилестроение, оборонная промышленность, медицина и связь [2].

Мы получаем защитный материал с текстильно-интегрированными датчиками для регистрации экологических и жизненно важных параметров, материал с функциями защиты и мониторинга. В связи с этим производственная функция должна быть обогащена детализацией данных по всем новым переменным, возникающим в производственном процессе, включая производство того или иного материала. А так же и последующие процессы, позволяющие на основе опыта нанесения клеевого материала или образования слоев создать условия, необходимые для достижения этого высокого уровня точности, вплоть до применения терморезистивных покрытий. Внедрение оптоволоконных систем актуализируют задачу декомпозиции данных, позволяющих оценить восстановление первоначальных свойств материалов, которые могут быть существенно изменены в условиях гибридных или новых технологий.

Аналогично можно оценить влияние частичных покрытий из различных полимеров, используемых для пассивации воздействий окружающей среды. Отметим, что требования к произвольно малым изменениям, возможным в робастном оценивании, демонстрируют максимальное соответствие задачам проектирования и управления волоконно-оптическими смарт-системами. Робастные оценки адекватны ситуациям в условиях отклонений от некоего статуса модели. Сейчас популярно управление по отклонениям может быть дополнено функцией влияния, позволяющей выявить контролируемые факторы сложных производственных систем [7, 8].

#### 2. Робастный подход для приближения производственной системы к таргетированным показателям

Робастный подход к оценке устойчивости производственных систем призван решить ряд сложных задач применительно к технологиям и новым материалам, включающим в себя более двух слоев, в том числе с различными компонентами вплоть до наночастиц или мантией поверхностного слоя. При этом предполагается высокий уровень цифровизации и гибкости производственных систем, что выражается в усложнении производственных функций, механизма воздействия и увеличении числа контрольных показателей. Это приводит к замене единичной позиции воздействия на множественную.

Мы получаем множество рассматриваемого объекта ( $R_{(p)}$ ), вектор управляющего воздействия ( $M_{(a)}$ ), его объем регулятора ( $P_{(p)}$ ) и контрольные параметры ( $V_{(p)}$ ). Как отмечалось выше при постановке проблемы, робастные подходы в качестве преимущества позволяют устранить возмущения выборки и избавиться от так называемого засорения измерений ( $N_{(p)}$ ). Алгоритм повышения эффективности внедрения новых материалов и технологий представлен на рисунке.

Робастность как свойство производственной системы предполагает, что она, характеризуясь динами-

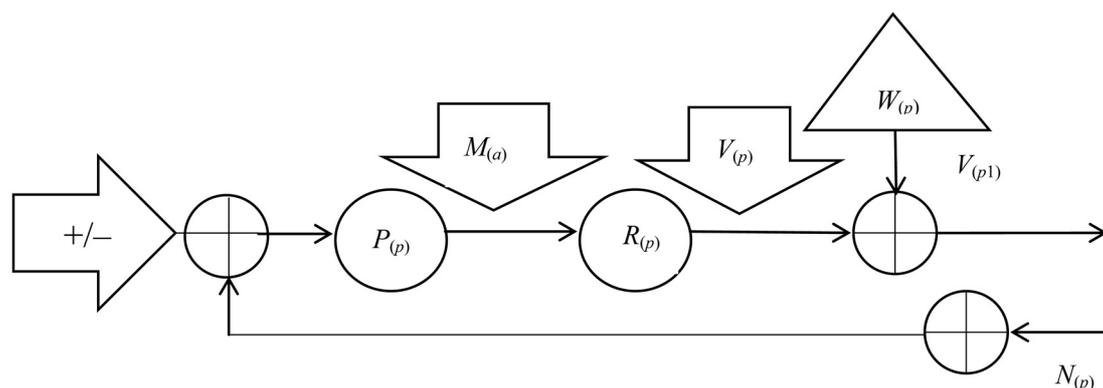


Рис. 1. Алгоритм приближения к таргетированным показателям на основе робастных подходов  
 $P_{(p)}$  — объем регулятора,  $M_{(a)}$  — управляющее воздействие,  $R_{(p)}$  — множество объекта,  
 $V_{(p)}$  — целевая величина,  $N_{(p)}$  — засорение измерений

ческими характеристиками, обладает изменчивостью по отношению к заданным параметрам и воздействиям внешней среды, но достигает устойчивости в определенном интервальном диапазоне [6].

Важно определить границы робастного качества, так как погрешность возрастает в зоне достижения границы устойчивости, четко определенная по границам устойчивость отвечает признакам робастной. Более того, расслоение характеристик возникает при изменении параметров рассматриваемого объекта в нерелевантом периоде. Именно робастность эти изменения нормирует и устанавливает необходимый диапазон. Следовательно, если возможные изменения и отклонения по любой причине не определены, система не является робастной и требует других организационных подходов, частным случаем которых являются адаптивные процедуры [3, 4, 10].

Векторно-матричная форма динамических систем может быть представлена через вектор состояния или вектор фазовых координат и управленческое воздействие. Если управленческое воздействие равно или стремится к нулю, объект характеризуется как неуправляемый.

Говоря о целях контроля параметров внедрения, следует отметить, что можно выделить четыре параметра: стабильность, производительность, внутренний контроль и наблюдаемость. При робастном подходе система стабильна для всех возмущенных состояниях объекта и неопределенности, система удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым ко всем объектам пространства, имеется конфигурация обратной связи или внутреннее управление моделью и наблюдаемость лежит в диапазоне от 50 до 100%.

Создание волоконно-оптических смарт-систем и их аналогов систем требует развития подходов к организации производства на основе проектирования параметрического множества допустимых вероятностных значений известных функций влияния, так как надежность системы контрольных показателей должна быть повышена.

Робастность в классическом подходе определяется относительно неопределенности, которая может быть параметрической или непараметрической, включающей, в свою очередь, немоделируемую динамику

( $H^\infty$ -теория, QFT), структурную неопределенность ( $M$ - $\Delta$  и  $\mu$ -анализ) и внешние воздействия. В  $H^\infty$ -методе применяются функции, определяемые на основе свойств управления, то есть контроля входа и выхода, с коэффициентами значимости [1].

Инновационная производственная система является динамической, следовательно, она характеризуется не нулевым порядком как статическая система, а астатизмом первого порядка. Ошибка засорения определяется по стандартному правилу.

Создание волоконно-оптических SmartTextiles и их аналогов систем требует развития подходов к организации производства на основе проектирования параметрического множества допустимых вероятностных значений известных функций влияния, так как надежность системы контрольных показателей должна быть повышена.

Важным методическим подходом, заложенным в семействе функций влияния, является допущение о том, что эмпирическая функции может не совпадать с заданной параметрической. Это предопределяет требования к системным характеристикам конкретного объекта и позволяет оценить свойства робастности оценок. Свойства критериев проверки гипотез позволяют установить значение некоего параметра при снятии отмеченного как  $\text{inputorder} - \text{астатизм} = 1$  противоречия. Вместе с тем для тестирования статистических гипотез может быть использована связь функции влияния и эффективностью критериев Питмена [12].

Для оценки устойчивости производственных систем можно использовать робастные эstimаторы [9].

Последовательность расчета робастного эstimатора является следующей: расчет средней величины, оценка выбросов или вбросов, расчет медианы или простого робастного эstimатора, позволяющего удостовериться устойчивость системы оценивания, расчет абсолютного отклонения от медианы, метод наименьших в качестве промежуточного действия и метод урезанных квадратов, модифицирующий оригинальный метод наименьших квадратов путем сокращения числа используемых оценок. В качестве дополнительных эstimаторов применяется метод медианных квадратов,  $Q$ -estimators или эstimаторы, основанные на не-

которой оценочной функции и различных вариациях оценки ошибок (моменты, срезающие гиперплоскости и т. д.), и эstimаторы для нелинейных регрессий [11].

### Выводы

1. Параметры новой техники и материалов характеризуются фактическими значениями в части свойств, охваченных наблюдениями. Функциональные характеристики в данном случае являются неопределенными. В ходе внедрения и освоения таких материалов и технологий весьма вероятной становится и волатильность первичных характеристик, полученных в ходе экспериментального моделирования, кроме случаев создания цифровых двойников. Для учета и анализа подобных изменений во времени необходимо применения понятия робастной устойчивости и робастного качества.
2. Робастность в организации производства означает свойство системы сохранять свойства и качества в пределах, предъявляемых или заданных требований при предположении о происходящем изменении ее параметров или структуры под влиянием как внутренних, так и внешних воздействий.
3. Термин робастная устойчивость, развивающий понятие устойчивость и формоустойчивость, и отражающий способность производственной системы, гарантировать устойчивость в условиях неопределенности состояний. Робастная устойчивость не может быть бесконечно эластичной, следовательно, возникает понятие робастный предел или обоснованный таргет технологических изменений показателей системы.
4. Эмпирическая функции может не совпадать с заданной параметрической, что предопределяет требования к системным характеристикам конкретного объекта и позволяет оценить свойства робастности оценок.

### Список использованных источников

1. А. А. Бобцов. Адаптивное и робастное управление неопределенными системами по выходу. СПб.: Наука, 2011. 174 с.
2. Волокнистые композиционные материалы/Под ред. С. З. Бокстей. М.: Мир, 1967. 13 с.
3. И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб: Наука, 2000.
4. В. О. Никифоров. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. СПб: Наука, 2003.
5. Общий стандарт на проектирование печатных плат/Пер. на русский язык, редакция №10.2008. <https://mp36c.ru/pdf/library/gost/pcb/IPC-2221A-10.pdf>.
6. Р. О. Оморов. Робастная устойчивость интервальных динамических систем. Бишкек: Илим, 2018. С. 104.
7. М. А. Сивак. Исследование применимости робастных функций потерь в нейронных сетях//Сборник научных трудов НГТУ. 2020. № 4. С. 50-58.
8. М. А. Сивак, В. С. Тимофеев. Построение робастных нейронных сетей с различными функциями потерь//Системы анализа и обработки данных. 2021. Т. 82. № 2. С. 67-83.
9. А. Л. Фрадков. Адаптивное управление в сложных системах. М.: Наука, 1990.
10. Л. В. Титова, В. В. Ильинский. Обоснование подходов к выбору показателей оценки устойчивого развития микроэкономического уровня//Актуальные проблемы экономики современной России. 2012. № 8. С. 165-168.
11. Л. В. Титова, Е. М. Ильинская, М. Н. Титова. Концепция робастности в управлении устойчивостью текстильных систем. В кн.: Устойчивое развитие интеллектуальных экосистем/Под ред. А. В. Бабкина. СПб., 2023. С. 144-175.
12. В. П. Шуленин. Робастные методы математической статистики. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 260 с.
13. J. T. Barron. A General and Adaptive Robust Loss Function. 2017. <https://arxiv.org/abs/1701.03077>.

### References

1. A. A. Bobtsov. Adaptive and robust control of undefined output systems. SPb.: Science, 2011. 174 p.
2. Fibrous composite materials/Ed. S. Z. Boxtey. Moscow: Mir, 1967. 13 p.
3. I. V. Miroshnik, V. O. Nikiforov, A. L. Fradkov. Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems. SPb: Science, 2000.
4. V. O. Nikiforov. Adaptive and robust management with perturbation compensation. SPb: Science, 2003.
5. General Standard for Design of Printed Circuit Boards/Translation into Russian, Edition 10.2008. <https://mp36c.ru/pdf/library/gost/pcb/IPC-2221A-10.pdf>.
6. R. O. Omors. Robustness of interval dynamic systems. Bishkek: Ilim, 2018. P. 104.
7. M. A. Sivak. Study of the applicability of robust loss functions in neural networks//Collection of scientific works of NGTU. 2020. № 4. P. 50-58.
8. M. A. Sivak, V. S. Timofeev. Construction of robust neural networks with various loss functions//Data analysis and processing system. 2021. Vol. 82. № 2. P. 67-83.
9. A. L. Fradkov. Adaptive control in complex systems. M.: Science, 1990.
10. L. V. Titova, V. V. Ilyinskiy. Substantiation of approaches to the choice of indicators of sustainable development of the microeconomic level//Actual problems of the economy of modern Russia. 2012. № 8. P. 165-168.
11. L. V. Titova, E. M. Ilyinskaya, M. N. Titova. Concept of robustness in the management of sustainability of textile systems. In the book: Sustainable development of intellectual ecosystems/Ed. A. V. Babkina. St. Petersburg, 2023. P. 144-175.
12. V. P. Shulenin. Robust methods of mathematical statistics. Tomsk: Izd-vo NTL, 2016. 260 p.
13. J. T. Barron. A General and Adaptive Robust Loss Function. 2017. <https://arxiv.org/abs/1701.03077>.