

УДК 681.518.9; 621.384.3

С. С. Анцыферов, А. С. Сигов, К. Н. Фазилова

МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия  
119454, Россия, г. Москва, пр. Вернадского, 78

## МЕТОДОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НЕРАВНОВЕСНО-УСТОЙЧИВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

S. S. Antsyferov, A. S. Sigov, K. N. Fazilova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia  
Russia, 119454, Moscow, Vernadsky ave., 78

## METHODOLOGY FOR MONITORING OF NONEQUILIBRIUM-STABLE TECHNICAL SYSTEMS FUNCTIONING

Разработан алгоритм контроля функционирования неравновесных систем, в основу которого положены такие операции, как установление диапазона допустимых значений вероятностей эффективности функционирования структурных элементов, установление допустимых значений числа структурных элементов, построение зависимости энтропии системы от числа структурных элементов и вероятности их эффективности, построение фазового пространства функционирования системы и определение границ областей неравновесной устойчивости. Практическая апробация разработанного алгоритма контроля функционирования неравновесных систем показала, что данный алгоритм может быть использован для решения целого ряда практических задач, связанных с контролем функционирования и прогнозирования состояния широкого класса неравновесных систем.

**Ключевые слова:** неравновесная система, когнитивная система, область неравновесной устойчивости, контроль функционирования, фазовое пространство функционирования.

Algorithm for controlling the systems functioning in nonequilibrium stability mode, which is based on operations such as establishing an acceptable range of probabilities of structural elements efficiency functioning, the establishment of valid values number of structural elements, construction of the dependence of the system entropy from a number of structural elements and the likelihood of their effectiveness, the construction of the phase space of the system and define the boundaries of regions of non-equilibrium stability is developed.

**Keywords:** nonequilibrium system, cognitive system, area of nonequilibrium stability, control of functioning, phase space of functioning.

## Введение

Существует широкий класс систем, отличающихся сложным структурным построением и связанных с восприятием и обработкой интенсивных изменяющихся информационных потоков. Сюда можно отнести сложные технические системы, научно-производственные и образовательные процессы, рабочие группы, выполняющие ответственные научно-исследовательские работы. Такие системы относятся, как правило, к разряду неравновесных систем. Для обеспечения высокой эффективности функционирования данных систем следует осуществлять непрерывный контроль их состояния, чтобы в случае необходимости принять соответствующие меры, которые могут быть связаны, например, с трансформацией структурного построения той или иной системы. Одним из эффективных способов контроля может служить представление неравновесной системы в виде когнитивной, функционирование которой описывается с помощью нелинейного дифференциального уравнения. Вопросам исследования такого рода систем был посвящен ряд работ [1–15], в частности связанных с разработкой методологии оценки неравновесной устойчивости когнитивных систем.

**Цель данной работы** – разработка и моделирование алгоритма контроля функционирования неравновесных систем.

## Алгоритм контроля функционирования неравновесных систем

Контроль функционирования неравновесных систем связан, согласно ранее разработанной методологии [15], с выполнением таких операций, как:

1. Установление диапазона допустимых значений вероятностей эффективности функционирования структурных элементов (СЭ)  $\Delta P = P_{max} - P_{min}$ ;
2. Установление допустимых значений числа СЭ ( $N$ );
3. Построение зависимости энтропии системы от числа СЭ и вероятности их эффективности  $H(N, P)$ ;
4. Построение фазовой диаграммы  $H=f(H)$  функционирования системы для ситуации, когда  $\Delta I > 0$ ,  $\Delta J > 0$ .

Выполнение данных операций позволяет определить фазовые пространства функционирования неравновесной системы.

Для определения границ области неравновесной устойчивости необходимо, используя полученные зависимости  $H(N, P)$ ,  $H=f(H)$ , определить  $\Delta H(N)$ ,  $\Delta \dot{H}(N)$ ,  $\Delta L(N)$  (рис. 1).

Рисунки 2 и 3 иллюстрируют действие данного алгоритма для  $P=0,7, 0,9$ ;  $N=5,7,10$ .

Реальная ситуация моделируется путем случайного задания значений  $P$ ,  $N$ , определением для них значений энтропии  $H$ , значений  $\dot{H}$  и значений  $L$ . По положению точек в фазовом пространстве может осуществляться контроль функционирования системы (рис. 4). В случае «выхода» той или иной точки за пределы установленной области поступает сигнал на координирующий блок и, в случае необходимости, осуществляется трансформация структуры системы.

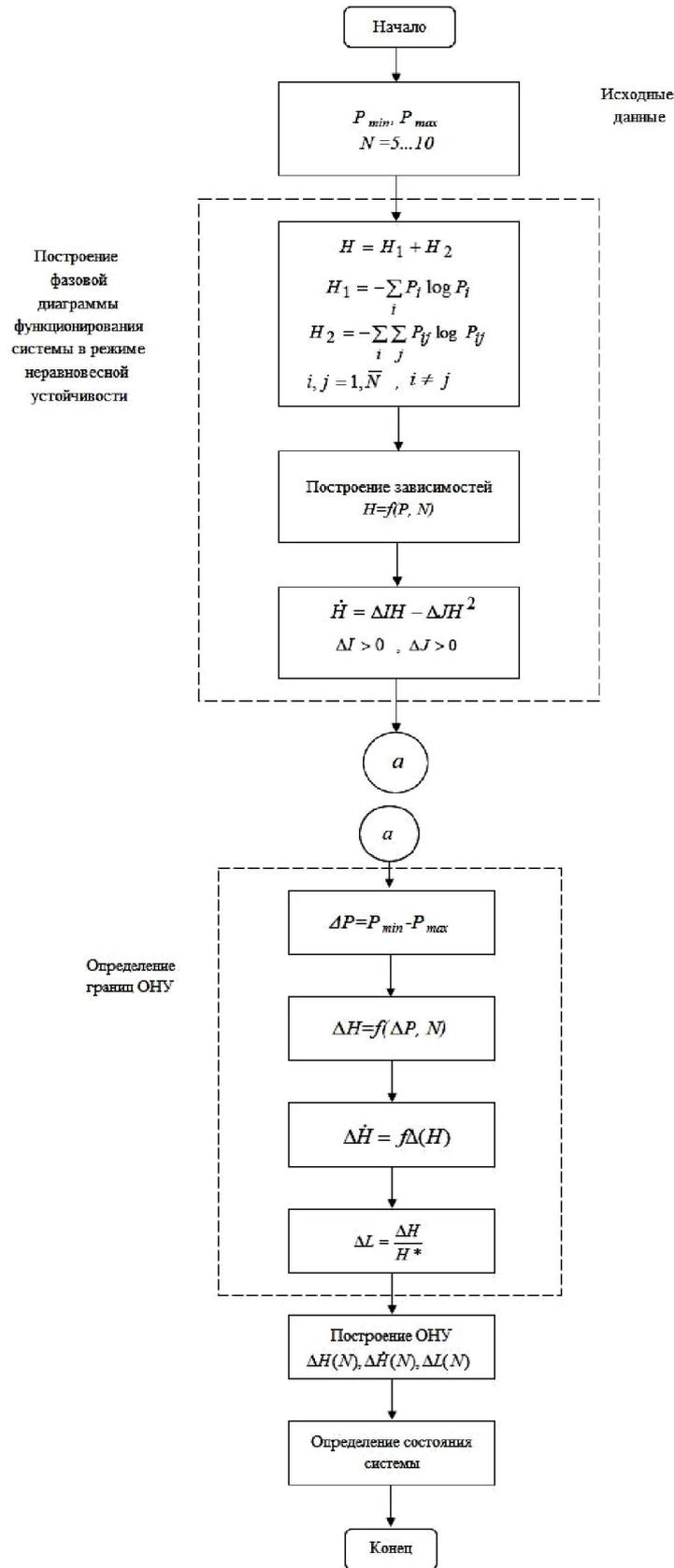


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма формирования фазового пространства функционирования неравновесной системы

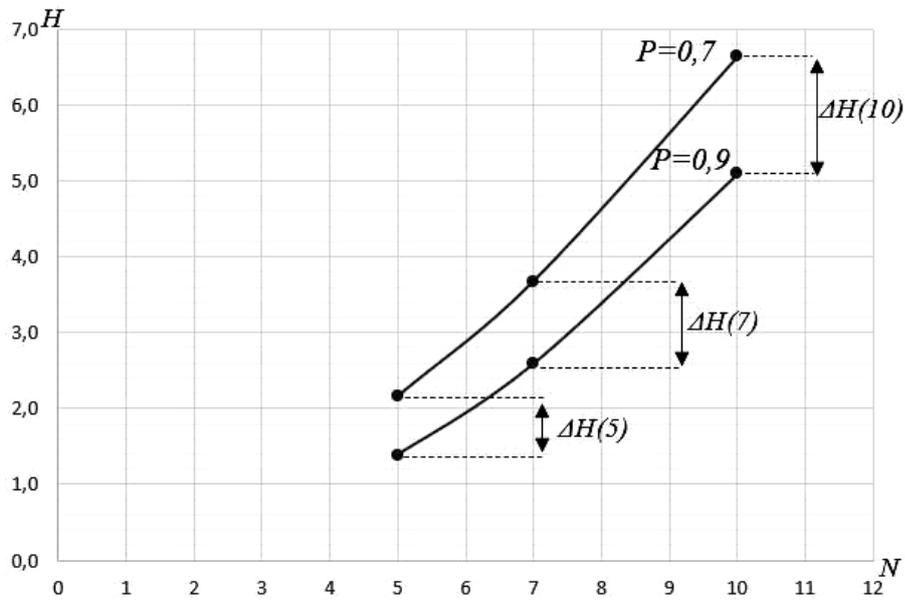


Рисунок 2 – Зависимость  $H$  от  $P$  и  $N$

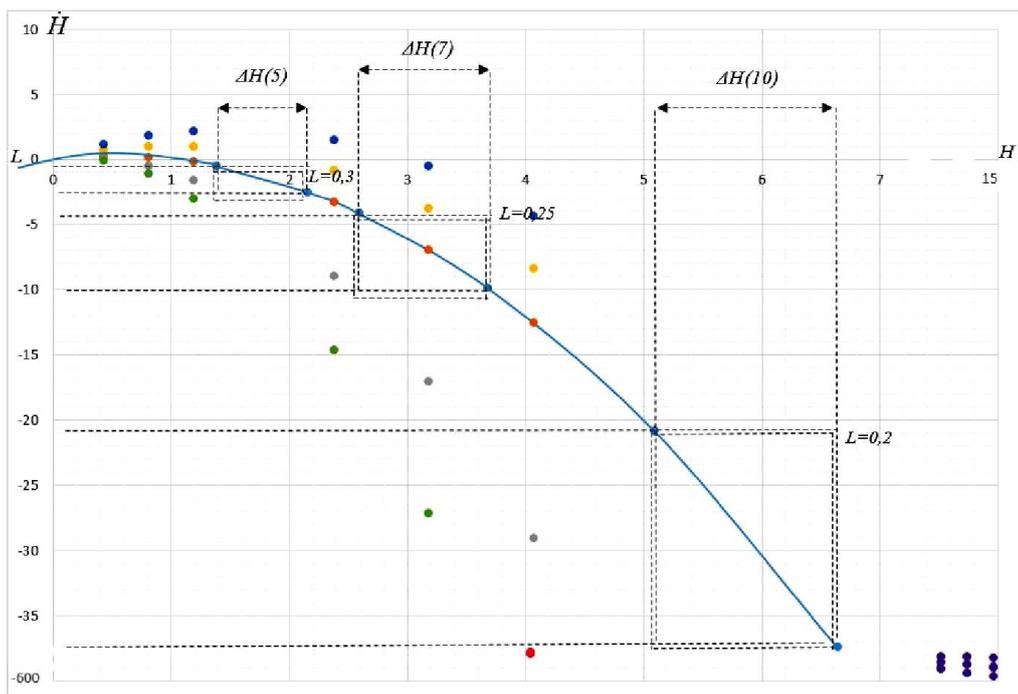


Рисунок 3 – Положение областей неравновесной устойчивости в фазовом пространстве

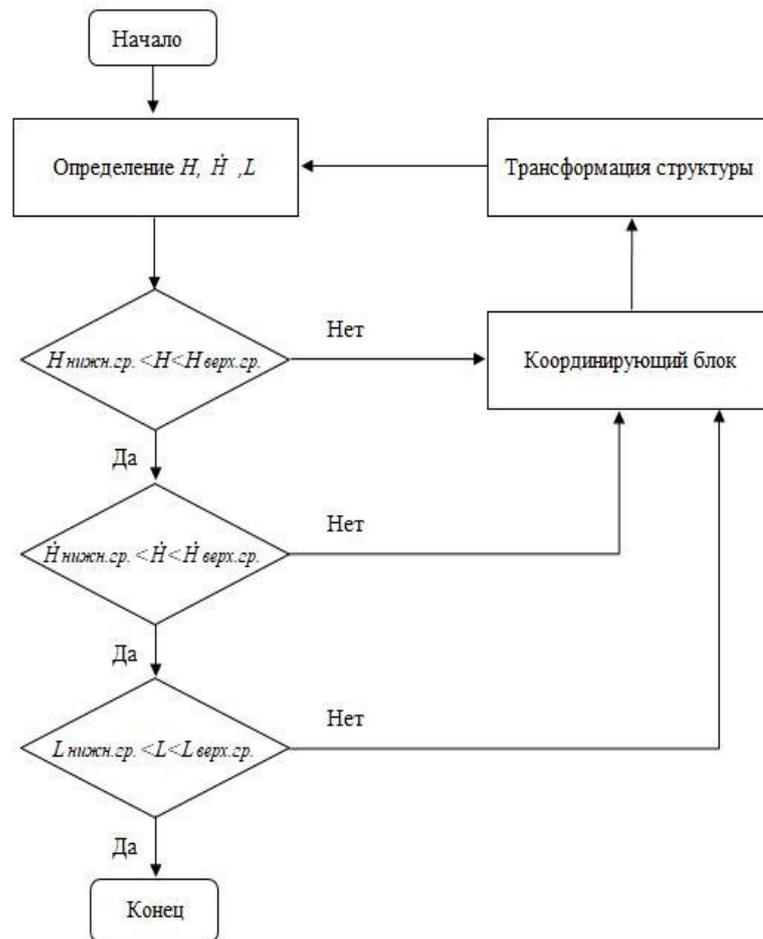


Рисунок 4 – Структурная схема алгоритма контроля текущего состояния системы

Разработанная методология прошла практическую апробацию при контроле функционирования одной из университетских образовательных программ и научно-производственного подразделения одного из московских предприятий.

Например, при контроле функционирования действующей магистерской программы, состоящей из 17 дисциплин. В качестве показателей эффективности СЭ были использованы: степень соответствия дисциплины направлению подготовки, степень соответствия дисциплины магистерской программе, степень соответствия дисциплины уровню и темпам развития наукоемких технологий. Диапазон допустимых значений вероятностей эффективности функционирования СЭ был принят равным  $P=0,7-0,9$ . Для установленного диапазона вероятностей были определены допустимые границы области неравновесной устойчивости  $\Delta H(N)=14,1-16,8$ ;  $\Delta \dot{H}(N)=-185,7-264,5$ ,  $\Delta L(N)=0,08-0,23$ . В соответствии с алгоритмом контроля текущего состояния системы (рис. 4) было определено положение данной программы в фазовом пространстве ее функционирования и было установлено, что она находится в установленной области неравновесной устойчивости ( $H=16,3$ ,  $\dot{H}=-248,7$ ,  $L=0,11$ ). Точность оценки вероятностных показателей  $\bar{\Delta}=0,095$ , в связи с этим были рассмотрены две крайние ситуации, когда  $P_s=P+\bar{\Delta}$ ,  $P_s=P-\bar{\Delta}$ . Для данных  $P_s=P-\bar{\Delta}$  были найдены значения  $H=17,3$ ,  $\dot{H}=-280,3$ ,  $L=0,06$  (точка 2, рис. 5). Для данных  $P_s=P+\bar{\Delta}$  были найдены значения  $H=15,1$ ,  $\dot{H}=-212,6$ ,  $L=0,18$  (точка 3, рис. 5).

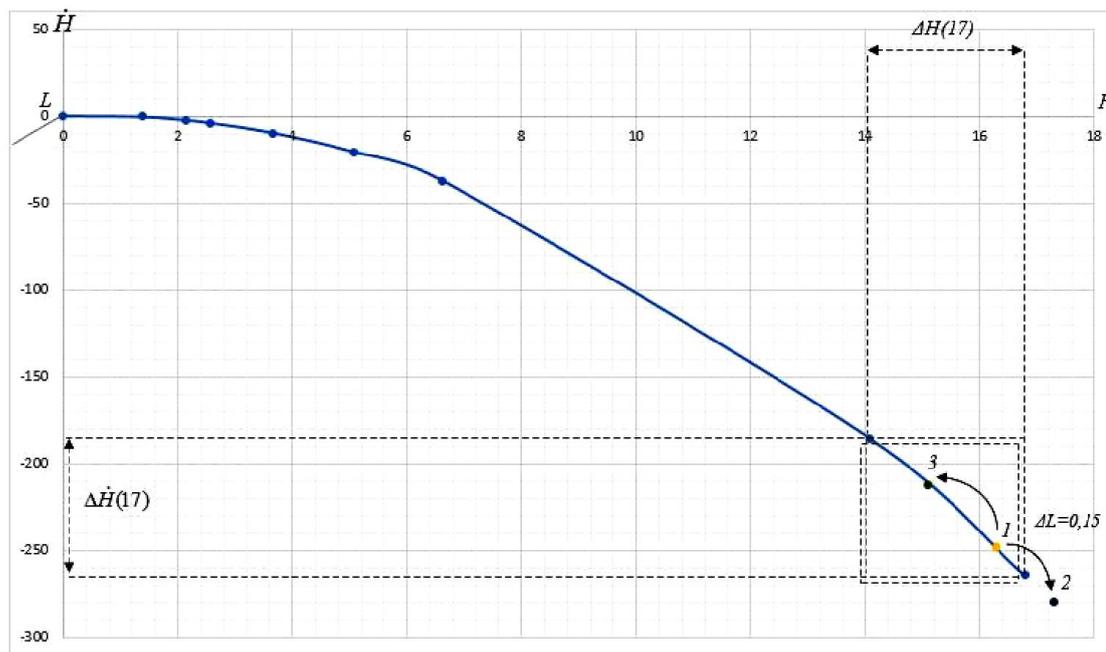


Рисунок 5 – Положение точек в фазовом пространстве

Согласно проведенным расчетам магистерская программа находится в установленной области неравновесной устойчивости, однако, близко к границе данной области. Это означает, что при незначительных флуктуациях вероятностных параметров этой программы, она может оказаться за пределами области неравновесной устойчивости, что подтверждает положение точки 2, полученной при снижении вероятностных показателей СЭ на величину погрешности. Для предотвращения такой ситуации исходные значения желательно увеличить на величину погрешности, что подтверждает положение точки 3, полученное в результате увеличения вероятностей на величину погрешности.

## Выводы

Результаты апробации предлагаемой методологии подтвердили правильность выдвинутых теоретических положений и указали на целесообразность ее использования для контроля функционирования широкого класса неравновесных технических систем, аппроксимируемых когнитивной моделью.

## Список литературы

1. Анцыферов С. С. Общие принципы построения и закономерности функционирования интеллектуальных систем [Текст] / С. С. Анцыферов // Искусственный интеллект. – 2011. – № 3. – С. 6–15.
2. Анцыферов С. С. Вопросы метрологического обеспечения интеллектуальных систем [Текст] / С. С. Анцыферов // Мир измерений. – 2012. – № 5. – С. 46–51.
3. Анцыферов С.С. Стандартизация показателей качества продукции когнитивных технологий [Текст] / С. С. Анцыферов // Научные технологии. – 2014. – Т. 15, № 7. – С. 7–13.
4. Метрологическое обеспечение наукоемких технологий [Текст] / С. С. Анцыферов, М. С. Афанасьев, А. С. Сигов. – М. : Изд. ИКАР, 2016. – 224 с.
5. Анцыферов С. С. Показатели неравновесной устойчивости когнитивных систем [Текст] / С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова, К. Е. Русанов // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – 2016. – № 2 (3). – С. 4–11.

6. Анцыферов С. С. Стандартизация показателей неравновесной устойчивости когнитивных систем [Текст] / С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова, К. Е. Русанов // Научные технологии. – 2017. – № 5. – С. 15–20.
7. Анцыферов С. С. Имитационная динамическая модель когнитивных систем [Текст] / С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова, К. Е. Русанов // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – 2017. – № 2 (5). – С. 32–39.
8. Анцыферов С. С. построения и функционирования интеллектуальных систем обработки информации пространственно-временных полей [Текст] / С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова, К. Е. Русанов // Научные технологии. – 2018. – № 2. – С. 36–45.
9. Antsyferov S. S. Evaluation algorithm of cognitive systems non-equilibrium stability [Text] / S. S. Antsyferov, K. N. Fazilova, K. E. Rusanov // International peer-reviewed scientific and theoretical journal "Problems of Artificial Intelligence. – 2018. – № 3 (10). – P. 57–65.
10. Анцыферов С. С. Оценка неравновесной устойчивости когнитивных систем [Текст] / С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова, К. Е. Русанов // Научные технологии. – 2018. – № 11. – С. 14–19
11. Анцыферов С. С. Алгоритм контроля неравновесной устойчивости когнитивных систем [Текст] / С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова, К. Е. Русанов // Российская научно-техническая конференция с международным участием. Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике : Сборник докладов конференции. – Москва, 2019. – С. 344–350.
12. Antsyferov S. S. Evaluation of cognitive systems structural elements effectiveness [Text] / S. S. Antsyferov, K. N. Fazilova // International peer-reviewed scientific and theoretical journal "Problems of Artificial Intelligence. – 2019. – № 3 (14). – P. 40–46.
13. Анцыферов С. С. Моделирование неравновесной устойчивости когнитивных систем [Текст] / С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова, К. Е. Русанов // Моделирование неравновесных систем: Материалы XXI Всероссийского семинара, 4–6 октября 2019 г. – Красноярск : Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, 2019. – С. 3–8.
14. Анцыферов С. С. Методика оценки эффективности структурных элементов когнитивных систем в реальном масштабе времени [Текст] / С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова // Нелинейный мир. – 2020. – № 3. – С. 33–41
15. Анцыферов С. С. Методология оценки состояний когнитивных систем [Текст] / С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – 2020. – № 3 (18). – С. 19–28.

## References

1. Antsyferov S. S. Obshchiye printsipy postroyeniya i zakonomernosti funktsionirovaniya intellektual'nykh sistem [General principles of construction and patterns of functioning of intelligent systems]. *Iskusstvennyy intellekt* [Artificial Intelligence], 2011, No. 3, pp. 6-15.
2. Antsyferov S. S. Voprosy metrologicheskogo obespecheniya intellektual'nykh sistem [Issues of metrological support of intelligent systems]. *Mir izmereniy* [World of measurements], 2012, No. 5, pp. 46-51.
3. Antsyferov S. S. Standartizatsiya pokazateley kachestva produktsii kognitivnykh tekhnologiy [Standardization of indicators of product quality of cognitive technologies]. *Naukoyemkiye tekhnologii* [High technology], 2014, T. 15, No. 7, pp. 7-13.
4. *Metrologicheskoye obespecheniye naukoyemkikh tekhnologiy* [Metrological support of high technology] / S. S. Antsyferov, M. S. Afanas'yev, A. S. Sigov, M., Izd. IKAR, 2016, 224 p.
5. Antsyferov S. S., Fazilova K. N., Rusanov K. Ye. Pokazateli neravnovesnoy ustoychivosti kognitivnykh sistem [Indicators of nonequilibrium stability of cognitive systems]. *Mezhdunarodnyy retsenziruyemyy nauchno-teoreticheskiy zhurnal «Problemy iskusstvennogo intellekta»* [International peer-reviewed scientific and theoretical journal "Problems of Artificial Intelligence], 2016, No. 2 (3), pp. 4-11.
6. Antsyferov S.S., Fazilova K.N., Rusanov K.Ye. Standartizatsiya pokazateley neravnovesnoy ustoychivosti kognitivnykh sistem [Standardization of indicators of nonequilibrium stability of cognitive systems]. *Naukoyemkiye tekhnologii* [High technology], 2017, No. 5, pp. 15-20.
7. Antsyferov S. S., Fazilova K. N., Rusanov K. Ye. Imitatsionnaya dinamicheskaya model' kognitivnykh sistem [A simulation dynamic model of cognitive systems]. *Mezhdunarodnyy retsenziruyemyy nauchno-teoreticheskiy zhurnal «Problemy iskusstvennogo intellekta»* [International peer-reviewed scientific and theoretical journal "Problems of Artificial Intelligence], 2017, No. 2 (5), pp. 32-39.
8. Antsyferov S. S., Fazilova K. N., Rusanov K. Ye. Printsipy postroyeniya i funktsionirovaniya intellektual'nykh sistem obrabotki informatsii prostranstvenno-vremennykh poley [The principles of construction and functioning of intelligent systems for processing information of spatio-temporal fields] *Naukoyemkiye tekhnologii* [High technology], 2018, No. 2, pp. 36-45.

9. Antsyferov S. S., Fazilova K. N., Rusanov K. E. Evaluation algorithm of cognitive systems non-equilibrium stability. *International peer-reviewed scientific and theoretical journal "Problems of Artificial Intelligence"*, 2018, No. 3 (10), pp. 57-65.
10. Antsyferov S. S., Fazilova K. N., Rusanov K. Ye. Otsenka neravnovesnoy ustoychivosti kognitivnykh sistem [Assessment of the nonequilibrium stability of cognitive systems] *Naukoyemkiye tekhnologii* [High technology], 2018, No. 11, pp. 14-19.
11. Antsyferov S. S., Rusanov K. Ye., Fazilova K. N. Algoritm kontrolya neravnovesnoy ustoychivosti kognitivnykh sistem [Algorithm for monitoring the nonequilibrium stability of cognitive systems]. *Rossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem. Informatika i tekhnologii. Innovatsionnyye tekhnologii v promyshlennosti i informatike Sbornik dokladov konferentsii* [Russian scientific and technical conference with international participation. Computer science and technology. Innovative technologies in industry and computer science Conference proceedings], Moskva, 2019, pp. 344-350.
12. Antsyferov S. S., Fazilova K. N. Evaluation of cognitive systems structural elements effectiveness. *International peer-reviewed scientific and theoretical journal "Problems of Artificial Intelligence"*, 2019, No. 3 (14), pp. 40-46.
13. Antsyferov S.S., Fazilova K.N., Rusanov K.Ye. Modelirovaniye neravnovesnoy ustoychivosti kognitivnykh sistem [Modeling of nonequilibrium stability of cognitive systems] *Modelirovaniye neravnovesnykh sistem: Materialy XXI Vserossiyskogo seminar, 4-6 oktyabrya 2019 g.* [Modeling of nonequilibrium systems: Materials of the XXI All-Russian Seminar, October 4-6, 2019], Krasnoyarsk: Institut vychislitel'nogo modelirovaniya Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk, 2019, pp. 3-8.
14. Antsyferov S. S., Fazilova K.N. Metodika otsenki effektivnosti strukturnykh elementov kognitivnykh sistem v real'nom masshtabe vremeni [Methodology for assessing the effectiveness of structural elements of cognitive systems in real time]. *Nelineyny mir.*, 2020, No. 3, pp. 33-41
15. Antsyferov S. S., Fazilova K. N. Metodologiya otsenki sostoyaniy kognitivnykh sistem [Methodology for assessing the states of cognitive systems. *Mezhdunarodnyy retsenziruyemyy nauchno-teoreticheskiy zhurnal «Problemy iskusstvennogo intellekta»* [International peer-reviewed scientific and theoretical journal "Problems of Artificial Intelligence"], 2020, No. 3 (18), pp. 19-28.

## RESUME

**S. S. Antsyferov, A. S. Sigov, K. N. Fazilova**

### ***Methodology for monitoring of nonequilibrium -stable technical systems functioning***

There is a wide class of systems that are characterized by complex structural construction and are associated with the perception and processing of intense changing information flows. This includes complex technical systems, research and production and educational processes, working groups that perform responsible research work. Such systems are usually classified as nonequilibrium systems. To ensure the high efficiency of the functioning of these systems, continuous monitoring of their condition should be carried out in order to take appropriate measures, if necessary, which may be associated, for example, with the transformation of the structural structure of a particular system. One of the most effective methods of control can be the representation of a nonequilibrium system in the form of a cognitive one, the functioning of which is described using a nonlinear differential equation. A number of works have been devoted to the study of such systems, in particular those related to the development of a methodology for assessing the non-equilibrium stability of cognitive systems.

Method of pairwise preferences is proposed for structural elements effectiveness evaluation.

The developed methodology was tested in practice when monitoring the functioning of one of the university educational programs and the research and production department of one of the Moscow enterprises.

The results of testing the proposed methodology confirmed the correctness of the theoretical propositions put forward and indicated the feasibility of using it to control the functioning of a wide class of nonequilibrium technical systems approximated by the cognitive model.

## РЕЗЮМЕ

*С. С. Анцыферов, А.С. Сигов, К. Н. Фазилова  
Методология контроля функционирования  
неравновесно-устойчивых технических систем*

Существует широкий класс систем, отличающихся сложным структурным построением и связанных с восприятием и обработкой интенсивных изменяющихся информационных потоков. Сюда можно отнести сложные технические системы, научно-производственные и образовательные процессы, рабочие группы, выполняющие ответственные научно-исследовательские работы. Такие системы относятся, как правило, к разряду неравновесных систем. Для обеспечения высокой эффективности функционирования данных систем следует осуществлять непрерывный контроль их состояния, чтобы в случае необходимости принять соответствующие меры, которые могут быть связаны, например, с трансформацией структурного построения той или иной системы. Одним из эффективных способов контроля может служить представление неравновесной системы в виде когнитивной, функционирование которой описывается с помощью нелинейного дифференциального уравнения. Вопросам исследования такого рода систем был посвящен ряд работ, в частности связанных с разработкой методологии оценки неравновесной устойчивости когнитивных систем.

Для оценки эффективности структурных элементов предложено использовать метод попарных предпочтений.

Разработанная методология прошла практическую апробацию при контроле функционирования одной из университетских образовательных программ и научно-производственного подразделения одного из московских предприятий.

Результаты апробации предлагаемой методологии подтвердили правильность выдвинутых теоретических положений и указали на целесообразность ее использования для контроля функционирования широкого класса неравновесных технических систем, аппроксимируемых когнитивной моделью.

Статья поступила в редакцию 15.01.2021.