

УДК 681.5.03:519.24

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_3_44

МЕТОД И АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ В МНОГОУРОВНЕВЫХ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ НЕУСТРАНИМОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИРИХЛЕ

А.А. Хлыбов

ORCID: 0000-0002-6559-7819 e-mail: hlybov_52@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.Н. Богатиков**

ORSID: 0000-0002-5760-9728 e-mail: vnbgtk@mail.ru

Тверской государственной технической университет
*Тверь, Россия***В.И. Ерофеев**

ORCID: 0000-0002-6637-5564 e-mail: erof.vi@yandex.ru

Институт проблем машиностроения РАН
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Иляхинский**

ORCID: 0000-0002-7677-8455 e-mail: ilyahinsky-aleks@bk.ru

Институт проблем машиностроения РАН
Нижний Новгород, Россия

Представлен новый подход управления в многоуровневых и распределенных системах, опирающийся на принципы неравновесной термодинамики. Предлагается статистическая модель в виде функции плотности вероятностей; исследуемый объект представлен в виде процессов, характеризующих однозначное состояние. Показано, что энтропия многомерного распределения Дирихле обладает совокупностью свойств, которые позволяют использовать его для количественной интегральной оценки состояний сложных многоуровневых иерархически организованных систем. В качестве меры оценки состояний сложных многоуровневых иерархически организованных систем предлагается использовать параметр самоорганизации состояния процесса. Множественные значения состояний объекта при таком подходе отображаются одномерной шкалой. Показано, что для управления состояниями объекта можно использовать оптимизирующий функционал – критерий качества.

Ключевые слова: временные ряды, статистическая модель, функция плотности вероятностей, распределение Дирихле, энтропия, самоорганизация.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Хлыбов, А.А. Метод и алгоритм анализа процессов управления в многоуровневых и распределенных системах в условиях неустрашимой неопределенности на основе статистической модели распределения Дирихле / А.А. Хлыбов, В.Н. Богатиков, В.И. Ерофеев, А.В. Иляхинский // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 44-53. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_3_44

METHOD AND ALGORITHM FOR ANALYSIS OF PROCESSES OF CONTROL IN MULTILEVEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS UNDER CONDITIONS OF UNRECOVERABLE UNCERTAINTY BASED ON DIRICHLET DISTRIBUTION STATISTICAL MODEL

A.A. Khlybov

ORCID: **0000-0002-6559-7819** e-mail: **hlybov_52@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.N. Bogatikov

ORCID: **0000-0002-5760-9728** e-mail: **vnbgtk@mail.ru**
Tver State Technical University
Tver, Russia

V.I. Erofeev

ORCID: **0000-0002-6637-5564** e-mail: **erof.vi@yandex.ru**
Institute of Mechanical Engineering Problems RAS
Nizhny Novgorod, Russia

A. V. Ilyakhinskii

ORCID: **0000-0002-9137-6390** e-mail: **ilyahinsky-aleks@bk.ru**
Institute of Mechanical Engineering Problems RAS
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. New approach of control in multilevel and distributed systems using the principles of nonequilibrium dynamics, is proposed. Statistical model is used in the form of a probability density function, the object under study is represented in the form of processes characterizing an unambiguous state. It is shown that the entropy of multidimensional Dirichlet distribution has a set of properties that allow to use the Dirichlet distribution for a quantitative integral assessment of the states of complex multilevel hierarchically organized systems. As a quantitative measure of assessing the states of complex multilevel hierarchically organized systems, it is proposed to use the parameter of self-organization of the process state. With this approach, multiple status values of an object are depicted into a one-dimensional scale. It is shown that an optimizing functional, a quality criterion, can be used to control the states of an object.

Key words: time series, statistical model, probability density function, Dirichlet distribution, entropy, self-organization.

FOR CITATION: A.A. Khlybov, V.N. Bogatikov, V.I. Erofeev, A.V. Ilyakhinskii. Method and algorithm for analysis of processes of control in multilevel and distributed systems under conditions of unrecoverable uncertainty based on Dirichlet distribution statistical model. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 3. Pp. 44-53.
DOI: 10.46960/1816-210X_2022_3_44

Современные сложные системы представляют собой комплексы подсистем, которые связаны между собой процессами обмена энергией, веществом и информацией; в них протекают сложные процессы и возникают критические хаотические режимы. Введение в их структуру автоматических регуляторов с соответствующими информационными компонентами приближает созданные человеком искусственные агрегаты к биологическим системам, в которых могут протекать процессы самоорганизации. Проблемы управления самоорганизующимися объектами привели к постановке вопроса создания агрегированных регуляторов [1-5]. Решение задачи о регуляторе можно найти в работах В.В. Солодовникова, Б.Н. Петрова, Т. Честната, А.А. Федьдбаума и др., оно опирается на выбор структуры регулирующих устройств, основанных на базе частотных и корневых методов. Теория аналитического конструирования оптимальных регуляторов нашла применение в работах А.М. Летова [6-9] и Р. Калмана [10]. В дальнейшем такой подход получил развитие в работах А.А. Красовского [11], М.М. Атанса и П. Фалба [12]. В них показана процедура управления состоянием объекта. В основу положено требование минимума некоторого оптимизирующего функционала (критерия качества). Разработки методов количественной оценки состояний на сегодняшний

день не завершены; задача получает возможность дальнейшего развития с использованием современных информационных технологий.

Два подхода к анализу состояний

При экспериментальных исследованиях сложных систем часто реализуется подход, основанный на анализе временных рядов, в рамках которого изучается внутренняя динамика объектов и их взаимные связи. При этом учитываются связи во времени и их изменчивость [13]. Процедура анализа изменений закономерностей наблюдаемого временного ряда относится к обратным задачам. Решение обратных задач зависит от множества факторов. В частности, необходимо учитывать качество и количество полученной информации. Важную роль играет выбор параметров модели исследуемого объекта. С учетом погрешности получаемых результатов, предложенная модель может описывать поведение реально существующего объекта.

Решение дифференциальных уравнений, описывающих поведение изучаемого объекта, позволяет решить обратную задачу. В ряде случаев при моделировании процесса сложно написать полную систему дифференциальных уравнений. Значительные трудности возникают при решении предложенных уравнений. На практике для предложенной модели уменьшают количество параметров, влияющих на свойства изучаемого объекта, что приводит к значительным отклонениям реальных объектов от их модельного представления.

Для получения эмпирического распределения используется также статистический подход для решения обратных задач. Он предусматривает использование результатов экспериментальных измерений [14-20]. Статистические параметры (среднее, коэффициент вариации, центральные моменты и т. д.) обеспечивают единое количественное описание наиболее общих закономерностей и свойств. При таком подходе моделируемый объект может иметь различную физическую природу. Также следует отметить, что в статистических методах обработки информации, в частности, при обработке параметров временных рядов, достаточно редко используются модели, основанные на гипотезах о структуре и процессах моделируемой системы.

Для выбранной модели исследуемого объекта используемое статистическое распределение, должно быть информационно эквивалентно. Это выполняется при выборе ряда условий [21, 22]:

- статистическое распределение определено на ограниченном интервале;
- энтропия распределения должна состоять из производства и потока;
- распределения, заданные на одномерных симплексах, должны допускать переход к многомерному симплекс распределению.

Нормальное распределение физических свойств исследуемого объекта, рассматриваемое на неограниченном интервале, предполагает наличие параметров значения которых могут иметь как неограниченно большое, так и малое значение.

Распределение Дирихле – статистическая модель состояния сложных многомерных и многосвязанных систем

Используем статистическую модель многомерного распределения Дирихле на ограниченном конечном интервале для анализа сигналов акустической эмиссии [23,24]. Акустическая эмиссия (АЭ) возникает при динамической перестройке структуры материалов. Сигналы АЭ носят случайный характер. Рассматривая акустическую эмиссию, считаем, что в материале протекает $n-1$ независимых процессов x_j , с различными скоростями (интенсивностями) v_j . Для такого процесса можно использовать распределение Дирихле, которое задается соотношением:

$$D(x_1, \dots, x_k) = \frac{\Gamma(a_n)}{\prod_{i=1}^k \Gamma(v_i)} \prod_{i=1}^k x_i^{v_i-1} \times (1 - \sum_{i=1}^k x_i)^{v_n-1} \quad (1)$$

$$0 \leq \sum x_i \leq 1; v_i \geq 0, \dots, v_n \geq 0; \sum_{i=1}^n v_i = a_n; n = k + 1$$

Соответственно, энтропию запишем в виде:

$$H = - \int_x \varphi(x) \log_{\alpha} \varphi(x) dx \quad (2)$$

Энтропию распределения (1) запишем в виде ряда:

$$H(v_1, \dots, v_n) = \ln \prod_{i=1}^n \Gamma(v_i) - \ln \Gamma(a_n) + (a_n - n)\psi(a_n) - \sum_{i=1}^n (v_i - 1)\psi(v_i) \quad (3)$$

Энтропия в виде суммы запишется

$$H(D) = H_i(v_1, \dots, v_n) + H_e(a_n) \quad (4)$$

Считаем, что:

$$H_i(v_1, \dots, v_n) = \ln \prod_{i=1}^n \Gamma(v_i) - \sum_{i=1}^n (v_i - 1)\psi(v_i) \quad (5)$$

отвечает второму закону термодинамики.

Из (5) следует:

$$H_e(a_n) = - \ln \Gamma(a_n) + (a_n - n)\psi(a_n) \quad (6)$$

Уравнение (6) определяет поток энтропии, описывающий процессы взаимодействия с внешней средой. Выражения (1)–(6) – не что иное, как: $\Gamma(x)$ – гамма-функция, а

$\psi(x) = \frac{d}{dx} \ln \Gamma(x)$ – логарифмическая производная гамма функции (пси-функция Эйлера).

При неограниченном росте числа процессов, протекающих с одинаковыми скоростями ($v_1 = \dots = v_n = v_\gamma$), распределение Дирихле может быть приближенно заменено гамма-распределением с плотностью

$$\gamma(x) = \frac{x^{v_\gamma-1}}{\Gamma(v_\gamma)} \exp(-x), x \geq 0, v_\gamma \geq 0 \quad (7)$$

и энтропией

$$H_\gamma = v_\gamma + \ln \Gamma(v_\gamma) - (v_\gamma - 1)\psi(v_\gamma) \quad (8)$$

Для $v_\gamma = 1$ уравнение (7) переходит в экспоненциальное распределение, не что иное, как модель радиоактивного распада. Для дискретного процесса в случае, когда число процессов велико, гамма-распределение может рассматриваться как распределение Пуассона.

$$f_p = \frac{v^x}{x!} \exp(-v); v > 0; x = 1, 2, \dots \quad (9)$$

с энтропией [24] принимает следующий вид:

$$H_p = v(1 - \ln v) + \ln \Gamma(1 + v) + \frac{v}{2} \psi'(1 + v) \quad (10)$$

Полученное выражение гамма-распределения для энтропии, (распределения Пуассона) не позволяет выделить какую-либо его часть. Такие модели характерны для изолированной системы. На основании вышесказанного утверждаем, что распределение Дирихле обладает гибкостью и реализмом. Это выгодно отличает его от статистических моделей процессов, построенных на основе определенного на неограниченном интервале нормального распределения, гамма-распределения, экспоненциального распределения и распределения Пуассона. Именно энтропия многомерного распределения Дирихле обладает совокупностью свойств (4-6), которые позволяют использовать ее в качестве количественной меры интегральной оценки статистической неопределенности в микросостояниях сложных систем. Так как распределение Дирихле (1) задается скоростями независимых процессов v_i , соответствующая статистическая модель инвариантна не только к виду состояния, но и типу процессов, определяющих это состояние. При $n \geq 3$ поток энтропии (8) может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Изменение знака внешней энтропии позволяет рассматривать в терминах модели распределения Дирихле условие $H_e(a_n) < 0$ как одно из условий самоорганизации и свидетельствовать о процессах возникновения упорядоченных пространственно-временных образованиях (*диссипативных структур* по терминологии И. Пригожина), описываемых в рамках неравновесной термодинамики [25-30].

Статистический критерий оценки состояния процесса полимеризации стирола

Известно, что процесс полимеризации стирола зависит от многих факторов, в частности от режима нагрев-выдержка во времени, частоты вращения мешалки. Сам процесс полимеризации характеризуется сложным поведением, а также нелинейной зависимостью скорости реакции от таких параметров, как температура, концентрация реагентов. Управляя этими процессами, удастся получить из исходного материала (мономера) полимер с требуемыми свойствами.

На рис. 1 показано изменение значения тока мешалки за период наблюдения 20.12.2012 и 21.12.2012. Соответственно, средние значения тока составляют 18.01 и 18.07 А. При этом данные средние значения могут принадлежать различным генеральным совокупностям.

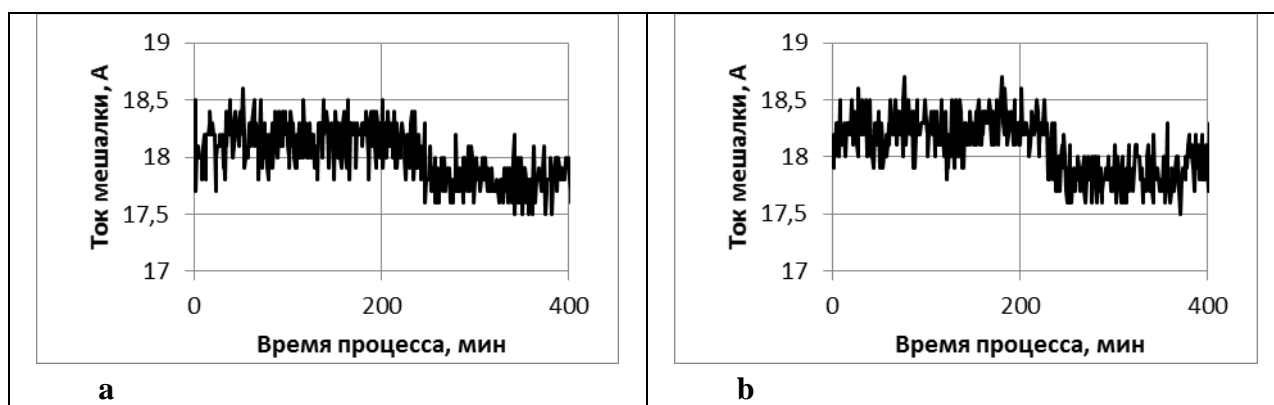


Рис. 1. Изменение во времени тока мешалки: а – 20.12.2010 и б – 21.12.2010

Fig. 1. Agitator current time variation: a – 20.12.2010 и б – 21.12.2010

Используем параметр самоорганизации в виде [31] для количественной меры оценки состояния процесса регуляции током мешалки:

$$P_c = \frac{\sum iQ_{D-}^i}{\sum iQ_{D-}^i + \sum iQ_{D+}^i} 100\% \quad (7)$$

В (7) $\sum iQ_{D-}^i$ – суммарно взвешенное количество Q выявленных в анализируемом числовом ряде зарегистрированного сигнала моделей Дирихле i -ой размерности, имеющих отрицательное значение внешней (потока) энтропии, а $\sum iQ_{D+}^i$ – суммарное взвешенное количество моделей Дирихле, имеющих положительное значение внешней энтропии.

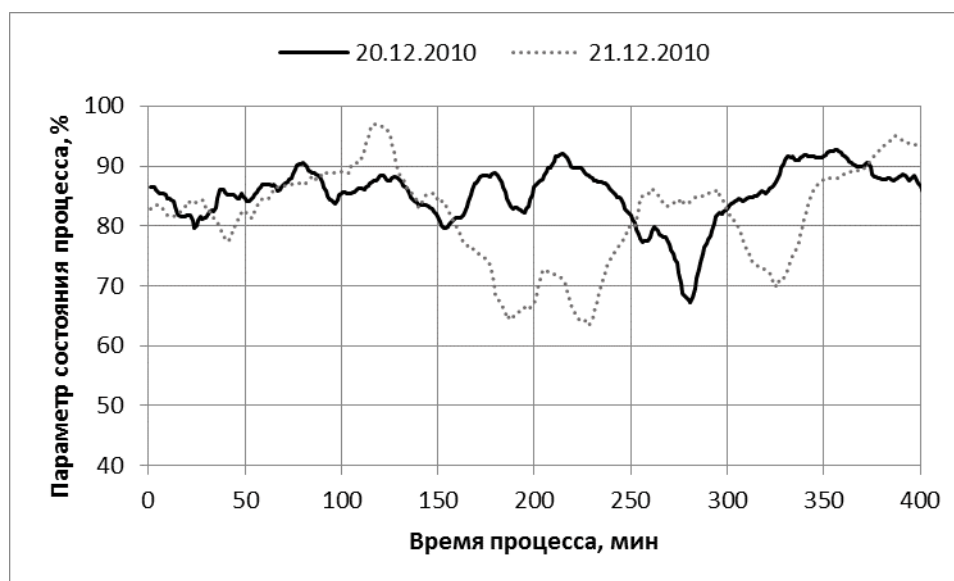


Рис. 2. Изменение во времени параметра состояния процесса регуляции тока мешалки

Fig. 2. Variation in time of the state parameter of agitator current regulation process

Средние значения параметра самоорганизации состояния процесса регуляции током мешалки (рис. 2) для периода наблюдения 20.12.2012 и 21.12.2012 составляют 85 и 82 % соответственно. Значения ТтестаExcel для указанных выборок равно 1.15326E-8. Последнее позволяет сделать вывод, что процесс управления током мешалки за период наблюдения 20.12.2012, обладая в среднем лучшей самоорганизацией, обладает лучшим качеством управления (регуляции).

Статистический критерий оценки эффективности управления системами здравоохранения в условиях коронавирусной инфекции COVID-19

В качестве меры, характеризующей состояние анализируемых систем здравоохранения в условиях постоянно изменяющихся внешних и внутренних факторов в отличие от (7) был использован информационно-статистический показатель самоорганизации модифицированный для случая многопараметрических данных. Методически результат вычисления диагностического показателя самоорганизации состояния систем здравоохранения достигался тем, что временные ряды объема N значений, представленные совокупностью данных числа ежедневных выявленных заражений и числа выздоровлений, методом минимаксной нормализации приводились к одному диапазону изменения $\{0-1\}$. Полученные временные ряды N_{inf} и N_{rec} путем разбиения непрерывно скользящим методом на одно значение выборки объема m разбивались на последовательность выборок m_j , где $j=1...N-m$, каждая из которых

представлялась бета-распределением Be_j . В соответствии с правилами информационно-статистической теории в рамках методики [7,8] проводили свертку бета-распределений выборок одного индекса j рядов N_{inf} и N_{rec} к последовательности двумерных распределений Дирихле с вычислением значения внешней энтропии (6) при значении $n = 3$. Оценку значения показателя самоорганизации проводили по количеству Q распределений Дирихле в анализируемой выборке имеющих положительное Q_{D+} и отрицательное Q_{D-} значение внешней энтропии как

$$S_c = \frac{Q_{D-}}{Q_{D+} + Q_{D-}} * 100\% \quad (8)$$

Исследование динамики показателя самоорганизации проводили непрерывно-скользящим методом базовой выборки объема $n = 100$ с анализом каждой из таких выборок как независимой при шаге смещения, равном единице.

Изменения исходных данных по числу ежедневных выявленных заражений (infection) и числу выздоровлений (recovery) за период с 20.06.2020 по 22.10.2020 представлен на рис. 3.

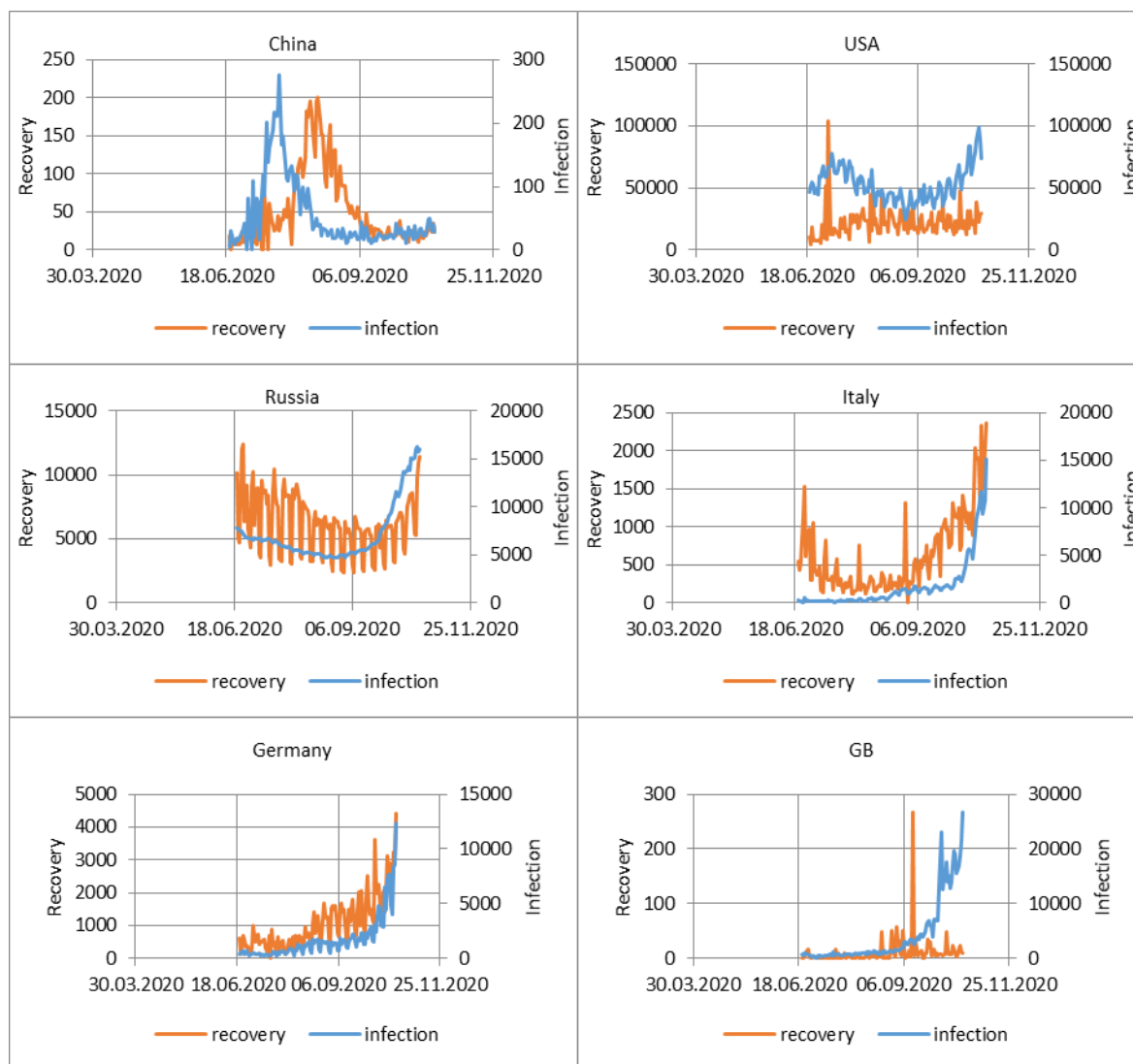


Рис. 3. Характер изменения исходных данных по числу ежедневных выявленных заражений (infection) и числу выздоровлений (recovery) за период с 20.06.2020 по 22.10.2020

Fig. 3. Nature of change in the source data as per the number of daily detected infections (infection) and the number of recoveries (recovery) for the period from 20.06.2020 to 22.10.2020

Характер изменения числа ежедневных выявленных заражений (infection) и числа выздоровлений (recovery) на периоде наблюдения имеет сложный вид. Этот факт является отражением различия в эффективности функционирования системы здравоохранения анализируемых стран что является следствием отличия в их организационных структурах. Результаты анализа временных рядов данных числа ежедневных выявленных заражений (infection) и числа выздоровлений (recovery) с 20.06.2020 по 22.10.2020 представлены на рис. 4-5, где в процентах по оси ординат показано значение показателя самоорганизации P_c .

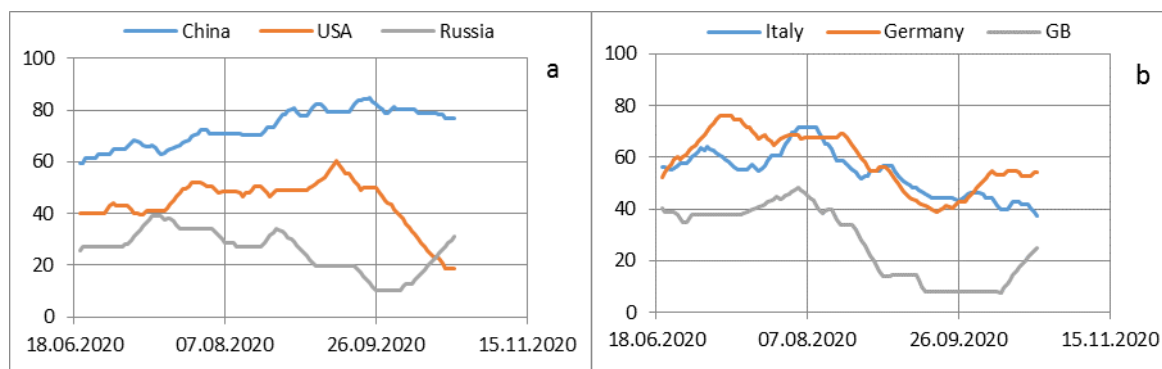


Рис. 4. Динамика показателя самоорганизации P_c а – Китая, Соединенных Штатов Америки и России; б - Италии, Германии и Великобритании в период с 20.06.2020 по 22.10.2020

Fig. 4. Dynamics of self-organization indicator P_c а – China, the United States of America and Russia; б - Italy, Germany and the United Kingdom, for the period from 20.06.2020 to 22.10.2020

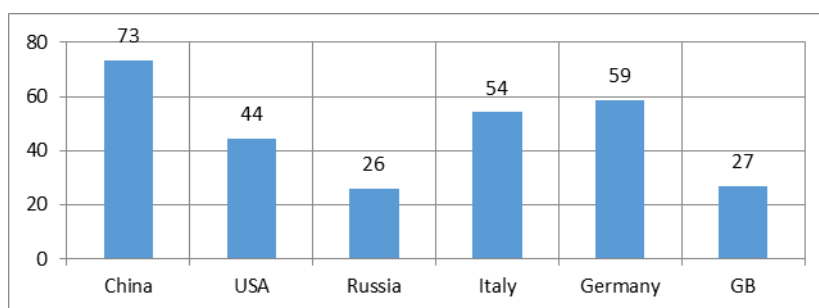


Рис. 5. Средние значения показателей самоорганизации P_c Китая, Соединенных Штатов Америки, России, Италии, Германии и Великобритании за период с 20.06.2020 по 22.10.2020

Fig. 5. Average values of self-organization indicators of P_c China, the United States of America, Russia, Italy, Germany and the United Kingdom for the period from 20.06.2020 to 22.10.2020

Графическое представление в виде временных рядов (рис. 4, 5) числа ежедневных выявленных заражений (infection) и числа выздоровлений (recovery) может служить интегральным показателем самоорганизации P_c . Такой подход в одномерной шкале позволяет сравнивать между собой системы здравоохранения Китая, США, России, Германии, Италии и Великобритании.

Заключение

1. Распределение Дирихле может быть использовано для изучения процессов управления в многоуровневых и распределенных системах, основанных на критериях неравновесной термодинамики.
2. Предложенные интегральные критерии и алгоритмы оценки состояния процессов отображают эти значения в одномерную шкалу, тем самым обеспечивается единство оценочного алгоритма для различных систем и целевых состояний.
3. Значения интегральных параметров самоорганизации могут быть использованы в качестве оптимизирующих функционалов – критериев качества управления состояниями процесса P_c или системы S_c .

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021-2023 гг. по теме № 0030-2021-0025 и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-07-00914).

Библиографический список

1. **Колесников, А.А.** Синергетическая теория управления [Текст] / А.А. Колесников. – Таганрог: ТРПК, М.: Энергоатомиздат, 1994. – 334 с.
2. **Колесников, А.А.** Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза [Текст] / А.А. Колесников. – М.: Едиторал УРСС, 2005. – 228 с.
3. **Сахаров, Д.Е.** Принцип самоорганизации как основа построения «идеальной» системы управления [Текст] / Д.Е. Сахаров // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2011. № 8. С. 60-62.
4. **Куприянов, М.С.** Принципы построения технических самоорганизующихся систем [Текст] / М.С. Куприянов, А.В. Кочетков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 8. С. 28-32.
5. **Летов, А.М.** Аналитическое конструирование регуляторов I [Текст] / А.М. Летов // Автоматика и телемеханика. 1960. Т. 21. № 4. С. 436-441.
6. **Летов, А.М.** Аналитическое конструирование регуляторов II [Текст] / А.М. Летов // Автоматика и телемеханика. 1960. Т. 21. № 5. С. 561-568.
7. **Летов, А.М.** Аналитическое конструирование регуляторов III [Текст] / А.М. Летов // Автоматика и телемеханика. 1960. Т. 21. № 6. С. 661-665.
8. **Летов, А.М.** Аналитическое конструирование регуляторов IV [Текст] / А.М. Летов // Автоматика и телемеханика. 1961. Т. 22. № 4. С. 425-435.
9. **Летов, А.М.** Аналитическое конструирование регуляторов. Дальнейшее развитие проблемы. V / Автоматика и телемеханика. 1962. Т. 23. № 11. С. 1405-1413.
10. **Kalman, R. E.** Contributions to the theory of optimal control [Text] / R. E. Kalman // Boletin de la Sociedad Matematica Mexicana. 1960. № 5. P. 102-119.
11. **Красовский, Н.Н.** Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование [Текст] / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1973. – 560 с.
12. **Атанс, М.М.** Оптимальное управление [Текст] / М.М. Атанс, П. Фабл. – М.: Машиностроение, 1968. – 764 с.
13. **Соколова, Э.С.** Анализ временных рядов технических параметров промышленных объектов / Э.С. Соколова, Д.А. Ляхманов // Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева 2013 №2 (99), с.88-95
14. **Воронов, И. В.** Применение универсального семейства распределений Пирсона для аппроксимации распределения значений вектора псевдоградиента при совмещении изображений [Текст] / И.В. Воронов // Радиоэлектронная техника. 2015. № 2(8). С. 123-127.
15. **Карпов, И. Г.** Модернизация распределений Пирсона для аппроксимации экспериментальных распределений радиолокационных сигналов [Текст] / И. Г. Карпов, Е. А. Галкин // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2004. Т. 47, № 11. С. 5261.
16. **Лебедев, С. А.** Оценка рыночных рисков ценных бумаг на основе универсальных семейств распределений [Текст] / С.А. Лебедев // Сибирская финансовая школа. 2008. № 2 (67). С. 87-90.
17. **Игнатенко, В.И.** Применение распределений Джонсона и Пирсона в задачах технической экс-

- плуатации автомобилей [Текст] / В.И. Игнатенко // Сборник научных трудов конференции «Проблемы современной науки». – Липецк: Издательство ЛГТУ, 2016. С. 63-66.
18. **Mateus, A.** Fitting Johnson's SB Distribution to Forest Tree Diameter / A. Mateus, M. Tome // *Advances in Regression, Survival Analysis, Extreme Values, Markov Processes and Other Statistical Applications. Studies in Theoretical and Applied Statistics.* – Berlin: Springer-Verlag, 2013. Pp. 289-296.
 19. **Заикин, П.В.** Аппроксимация эмпирических функций полиномами высших порядков [Текст] / П.В. Заикин, М.А. Погореловский, В.С. Микшина // *Вестник кибернетики.* 2015. № 4. С. 129-134.
 20. **Губарев, В.В.** Идентификация эмпирических распределений [Текст] / В.В. Губарев // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета.* 2011. № 6(30). С. 205-215.
 21. **Серета, Ю. С.** Проблемы информационно-статистической теории [Текст] / Ю. С. Серета. – Н. Новгород: ООО Типография «Поволжье», 2007. – 356 с.
 22. **Шеннон, Р.** Имитационное моделирование – искусство и наука [Текст] / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 424 с.
 23. **Иляхинский, А.В.** Статистические модели в задачах зондирования [Текст] / А.В. Иляхинский, Ю.С. Серета // *Известия ВУЗов. Радиофизика.* 1989, Т. 32. № 12. С. 1502-1505.
 24. **Иляхинский, А.В.** О статистических моделях процессов, сопровождаемых сигналами акустической эмиссии [Текст] / А.В. Иляхинский, Ю.С. Серета // *Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций.* – Киев: Наукова думка, 1987. Вып. 5. С. 36-39.
 25. **Панин, В.Е.** Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система [Текст] / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин // *Физическая мезомеханика.* 2011. Т. 14. № 3. С. 7-26.
 26. **Пригожин, И.** Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур [Текст] / И. Пригожин, Д. Кондепуди. Пер. с англ. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
 27. **Еу, В.С.** Generalized Thermodynamics: The Thermodynamics of Irreversible Processes and Generalized Hydrodynamics. // *Fundamental Theories of Physics.* Vol. 124. N. Y. e. a.: Kluwer Academic Publishers, 2004.
 28. **Николис Г.** Самоорганизация в неравновесных системах [Текст] / Г. Никорлис, И. Пригожин. – М.: Мир, 1979. 512 с.
 29. **Полак, Л.С.** Самоорганизация в неравновесных физико-химических процессах [Текст] / Л.С. Полак, А.С. Михайлов. – М.: Наука, 1975. – 351 с.
 30. **Пригожин, И.** Время, структура и флуктуации [Текст] / И. Пригожин // *Успехи физических наук.* 1980. Т. 131. Вып. 2. С. 185-207.
 31. **Ерофеев, В.И.** Распределение Дирихле как статистическая модель трибосистемы [Текст] / В.И. Ерофеев, А.В. Иляхинский, А.А. Хлыбов // *Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева.* 2018. № 2 (99). С. 26-29.

*Дата поступления
в редакцию: 21.01.2022*