

11. Gubenko S.I. *Mezhpfaznie granitsi vkluchenie-matritsa I svoisrva stalej* [Interphase boundaries inclusion-matrix and properties of steels]. Germany–Mauritius, Palmarium academic publishing, 2017, 506 p. (in Russian).

12. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M. and Peleshenko B.G. *Rozpodil tempetaruti odnovimirnogo zrazka v umovah mistsevoi termoobrobki* [Temperature distribution of the one-dimensional sample in terms of local heat treatment]. *Fizika i himija tverdogo tila* [Physics and Chemistry of Solid State]. 2008, vol. 9, no. 1, pp. 181–184 (in Ukrainian).

Поступила в редакцію 11.04.2018

Принята в печать 17.04.2018

УДК 519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240418.32.264

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

ДУБРОВ Ю. И. *, *д. т. н., проф.*

* Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

Аннотация. Постановка проблемы. При моделировании многопараметрических технологий большое, а иногда и непредсказуемое влияние на функцию цели оказывают факторы, которые мы часто относим к случайным. Учёт «случайности» в создаваемых математических моделях, как правило, задаётся совокупностью случайных факторов, при этом учитывается конечномерное их распределение. Такой подход к учету случайности трудно осуществим. Ранее многими авторами проведены многочисленные исследования, которые показали, что моделирование случайности может производиться за счет подключения к процессу идентификации генератора случайных чисел. **Результаты и их обсуждение.** В работе показано, что генератор случайных чисел часто реализуется Природой, и этим самым Природа включает влияние на идентифицируемый процесс случайных факторов. Для того чтобы показать закономерности появления случайных факторов, приводится их геометрическая интерпретация. Рассмотрен механизм работы генератора, реализуемый при моделировании многопараметрической технологии. В статье отмечается, что каждой многопараметрической технологии присуща естественная неполнота формальной аксиоматики. **Выводы.** На реальном примере показано, как в уменьшенном масштабе времени применение способа идентификации приводит к повышению вероятности выявления рациональных управлений многопараметрической технологией.

Ключевые слова: генератор случайных чисел; сложная система; математическая модель; случайный поиск; гиперсфера; функция цели

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ДУБРОВ Ю. І. *, *д. т. н., проф.*

* Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

Анотація. Постановка проблеми. У моделюванні багатопараметричних технологій великий, а іноді й непередбачуваний вплив на функцію мети становлять фактори, які ми часто відносимо до випадкових. Урахування «випадковості» у створюваних математичних моделях, як правило, задається сукупністю випадкових факторів, при цьому враховується скінченновимірний їх розподіл. Такий підхід до обліку випадковості важко здійснити. Раніше багато авторів провели численні дослідження, які показали, що моделювання випадковості може проводитися за рахунок підключення до процесу ідентифікації генератора випадкових чисел. **Результати та їх обговорення.** У статті показано, що генератор випадкових чисел часто реалізується Природою, і цим самим Природа включає вплив на ідентифікований процес випадкових факторів. Для того щоб показати закономірності появи випадкових факторів, наводиться їх геометрична інтерпретація. Розглянуто механізм роботи генератора, що реалізується під час моделювання багатопараметричної технології. Наголошується, що кожній багатопараметричній технології властива природна неповнота формальної аксиоматики. **Висновки.** На реальному прикладі показано, як у зменшеному масштабі часу застосування способу ідентифікації зумовлює підвищення ймовірності виявлення раціональних управлінь багатопараметричною технологією.

Ключові слова: генератор випадкових чисел; складна система; математична модель; випадковий пошук; гіперсфера; функція мети

SIMULATION MODELING OF MULTI-PARAMETER TECHNOLOGIES

DUBROV Yu.I. *, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

* Department of materials science and materials processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

Abstract. Formulation of the problem. When modeling multiparametric technologies, a large and sometimes unpredictable influence on the goal function is exerted by factors that we often attribute to random ones. The calculation of "randomness" in the created mathematical models, as a rule, is given by a set of random factors, taking into account their finite-dimensional distribution. This approach to the calculation of randomness is difficult to implement. Many authors have conducted numerous studies, which showed that randomness modeling can be performed by connecting to the process of identifying a random number generator. **Results and discussion.** The paper shows that the random number generator is often realized by Nature, and thus Nature includes the influence on the identified process of random factors. In order to show the regularities of the appearance of random factors, their geometrical interpretation is given. The mechanism of the generator, realized in the modeling of multiparameter technology, is considered. The article notes that each multi-parametric technology inherent in the natural incompleteness of formal axiomatics. **Conclusions.** The real example shows how, on a reduced time scale, the application of the identification method leads to an increase in the probability of identifying rational controls by multiparameter technology.

Keywords: Random number generator; complex system; mathematical model; random search; hypersphere; goal function

Постановка задачи

При синтезе математических моделей многопараметрических технологий [1–5] точность их идентификации зависит как от факторов, которые практически стабильные, так и факторов, которые мы вынужденно относим к случайным [6–10].

При этом часто произносимая постановщиком задачи идентификации фраза «решение задачи производится с учетом влияния случайных факторов», звучит несколько парадоксально, поскольку если это случайность, то можно ли ее учесть? Да, оказывается, учесть случайность можно, если действие каждого элемента многопараметрической технологии, представляемой в качестве сложной системы¹, задавать как некоторую совокупность случайных величин $\{Y_t\}_t \in T$, где каждая случайная величина Y_t может быть задана законом распределения вероятностей. Однако для того, чтобы задать совокупность $\{Y_t\}_t \in T$, недостаточно задать распределение F_t для каждой из величин Y_t , $t \in T$, поскольку в общем случае эти величины зависимые.

Для того чтобы задать случайную величину, необходимо задать всю совокупность так называемых конечномерных распределений. Таким образом, для каждого конечного набора величин необходимо задать $P \{ Y_t \in B_1, \dots, Y_t \in B_k \}$, $B_i \subset V$, $i=1, \dots, k$.

Такой подход к учету случайности трудно осуществим. В этой связи часто при моделировании

многопараметрических технологий, закон распределения вероятностей тех или иных величин зачастую не устанавливается экспериментально, а часто задается на основании статистического или экспертного анализа.

Результаты и их обсуждение

Следуя идеям, изложенным в работах [11; 12], моделирование случайности может происходить за счет подключения к процессу идентификации генератора случайных чисел, изменяющего систему аксиом и правил вывода. Например, в биологической эволюции подобный генератор нередко реализуется жестким излучением, действующим на гены организма, вызывающие мутации [13]. Подобный способ используется Природой при реализации соединения многих миллионов рецепторных и эффекторных нейронов с теми специфическими пунктами в головном мозге человека, которые предназначены для их связи с огромным множеством входных и выходных устройств. При этом растущие кончики аксонов, в ходе эмбрионального развития, блуждают более или менее случайным образом, что дает им шансы приблизиться к любому нейрону, с которым должна быть установлена связь [14].

Например, если генератор случайных чисел будет генерировать в заданном диапазоне случайные приращения коэффициентам математической модели, в частности, например модели функции цели, то при этом есть вероятность того, что через определенное количество итераций, путём ряда вычислений, будет получено численное значение функции, допустимо сходящееся с ее заданным значением. Если при этом будет получено численное значение функции, «уводящее» модель из области

¹ Сложной системой будем называть систему с относительно большим числом переменных, часть из которых изменяется непредсказуемым образом.

сходимости, снова подключается механизм настройки модели. Подобный способ «движения» модели напоминает полет фототропного насекомого. Непреодолимо привлекаемое пламенем свечи, это насекомое на первый взгляд двигается беспорядочно, однако его случайные направления содержат постоянную составляющую, направленную к источнику света: «...как бабочка я на костер лечу и огненность целую...» (С. Есенин).

Схожий механизм так называемого случайного поиска (СП) применим при идентификации функций любого вида, что делает удобным его применение при имитационном моделировании.

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования показали, что

применение СП позволяет достигать быстрой сходимости в задачах большой размерности, по сравнению с итерационными, релаксационными и другими методами (см., например, [1; 2]).

Обычно СП производится:

a – с постоянным по величине и случайным по направлению шагом;

b – со случайным по величине, ограниченным шагом.

Естественно предположить, что для пункта a вектор $D = I$, имитирующий шаг поиска, метит точки пространства в пределе представляющего кривую поверхность сферы (рис. 1).

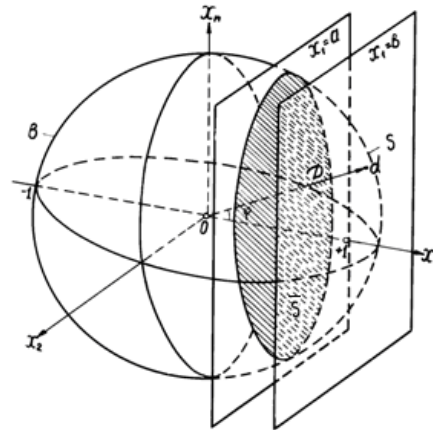


Рис. 1. Геометрическая интерпретация метода СП при $n = 3$ /
Fig. 1. Geometric interpretation of the SP method with $n = 3$

Вероятность попадания вектора $D = I$ из точки O на кривую поверхность сегмента \bar{S} , для случая a , может интерпретироваться как вероятность выхода броуновской частицы из сферы B через отверстие радиуса R (на рисунке 1 заштрихованная область). Принимаем, что при большом числе испытаний эта вероятность пропорциональна отношению площади \bar{S} шаровой поверхности сегмента к площади S всей поверхности сферы B .

«Натянем» на сферу B сетку с равными ячейками. Допустим, что кривая поверхность сферы B , ограниченная одной ячейкой, равна кривой поверхности сегмента – \bar{S} . Вероятность попадания вектора D на кривую поверхность сферы B , ограниченную одной ячейкой сетки (при использовании случайного механизма выбора

направления), будет – N^{-l} , где N – число ячеек, перекрывающих кривую поверхность всей сферы B .

Аналогично рассуждая, можно показать, что вероятность попадания вектора D в произвольно заданный объем шара определится как отношение объема заданной части шара к полному его объему.

Для того чтобы показать характер изменения этой вероятности как функции числа измерений, выведем соответствующие уравнения и исследуем их. Для этого обозначим через \bar{S}_n площадь кривой поверхности части n -мерной сферы, которой представлена целевая область, заключенная между плоскостями $x_1 = a, x_2 = b$.

Принимаем площадь кривой поверхности всей n -мерной сферы – $R = 1$. При $n \geq 3$, для четных n , т. е. $n = 2l$ при $l = \{1, 2, \dots\}$.

$$\bar{S}_n = 2 \int_{x_1^2 + \dots + x_{n-1}^2 \leq 1} \dots \int \sqrt{1 + \left(\frac{\partial x_n}{\partial x_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial x_n}{\partial x_{n-1}}\right)^2} dx_1, \dots, dx_{n-1}, \quad (1)$$

$$S_{n=2l} = \frac{2\pi^l}{l-1}. \quad (2)$$

язык более высокого уровня. В качестве подобного языка описания в настоящее время успешно используется язык фрактальной геометрии [19–21]. Например, его применяют при идентификации сложных систем [22], моделировании структуры и свойств металла [23; 24], прогнозировании качества целевого продукта [25; 26].

В этой связи, для получения положительного результата, при указанной идентификации, необходимо создавать вспомогательную функцию, которая должна быть положительно определена, и иметь минимум в точках, в которых рассогласования в условиях задачи равны нулю. Функция должна иметь непрерывную производную по рассогласованиям во всей области изменения искомого переменных.

В качестве демонстрации приведем следующий пример. Зададим вид искомой функции произвольно, например, как:

$$\varphi = \varphi_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{1,2} x_1 x_2, \quad (5)$$

где $b_1, b_2, b_{1,2}$ – числовые коэффициенты.

Пусть $P_1, P_2, P_{1,2}$ – фиксированные натуральные числа. Мы будем интересоваться количеством приближенных решений уравнения (5), удовлетворяющих следующим неравенствам:

$$\begin{aligned} 0 \leq \varphi_0 \leq P_0 \\ 0 \leq b_1 x_1 \leq P_1 & \quad \varphi_{i1} \leq \varphi \leq \varphi_{i2} \\ 0 \leq b_2 x_2 \leq P_2 & \quad i = 1, 2, \dots, n \\ 0 \leq b_{1,2} x_1 x_2 \leq P_{1,2} \end{aligned} \quad (6)$$

Генератором случайных чисел будем продуцировать последовательность независимых случайных чисел с заданным дискретом D_x , изменяющихся в пределах $\xi_{\min} \leq \xi_{ij} \leq \xi_{\max}$.

Определим вероятность того, что прибавление этих величин к каждому из коэффициентов полинома (5) при фиксированных значениях переменных (x_1, x_2) приведет к тому, что при его решении получится число φ , удовлетворяющее заданным ограничениям (6).

Общее число возможных решений уравнения (5) определим как $4(n+1) \frac{(\varphi_{\max} - \varphi_{\min})}{D\varphi}$.

Число благоприятных исходов ограничено отрезками $\frac{(\varphi_{i2} - \varphi_{i1})}{D\varphi}$, откуда следует, что вероятность благоприятного исхода находится в границах:

$$Prob(\varphi \in [\varphi_{i1}, \varphi_{i2}]) \leq \min(1, \frac{D\varphi \prod_{i=1}^n (\varphi_{i2} - \varphi_{i1})}{4(D\varphi)^n (n+1)(\varphi_{\max} - \varphi_{\min})}). \quad (7)$$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография / [Ю. Дубров, В. Большаков, В. Волчук]. – Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 236 с. – Режим доступа : <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
2. Большаков В. И. Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металлознавство та термічна обробка металів. – 2013. – № 4. – С. 5–11.

Предоставляется возможность получения конечного числа уравнений, из которых можно выбрать наилучшее в том смысле, что из всего множества полученных уравнений оно даст минимальное отклонение от всех точек *предыстории* $\min \sum_{i=1}^S \left| \varphi - \frac{i}{i} r_i^l \right|$, где $\varphi_1^l, \varphi_2^l, \dots, \varphi_s^l$ – точки предыстории, $\varphi_1^r, \varphi_2^r, \dots, \varphi_s^r$ – числовые значения функции, полученные подстановкой в уравнение (5) значений переменных – точек предыстории [27].

Таким образом, в качестве меры близости математического описания к реальности может быть выбрано расстояние по Хеммингу [28]. В программном обеспечении всех компьютеров существует программа, генерирующая случайные числа.

В этой связи изложенный в статье материал реализуем при идентификации большинства многопараметрических технологий. (5)

Неожиданным является тот факт, что выбор произвольно взятого уравнения с включением обсуждаемого механизма поиска его приемлемого вида, приводит к положительному результату. При этом полученная описанным выше способом модель нередко может оказаться нелогичной с точки зрения анализа идентифицируемой технологии и в то же время она может являться приемлемой моделью для прогнозирования. (Как мы это уже отмечали, такую модель можно рассматривать как «*модель мутанта*», поскольку ее нелогичность, с точки зрения здравого смысла, не согласуется с ее «прогнозно-способностью». Для снижения вероятности возникновения «*модели мутанта*», т. е. такой модели, которая, будучи адекватной исследуемому явлению, не отражает, например, его физические закономерности, в нее необходимо включить блок обучения, отсеивающий нежелательные ее варианты.)

Выводы

Таким образом, экспериментально, в уменьшенном масштабе времени, существует возможность выявления различных управлений с тем, чтобы выбрать наилучшее, что согласуется с утверждением: «Успех сопутствует тому, чье мышление не сковано традиционными методами решения проблем, т. е. тому, чье мышление не предубеждено».

3. Большаков В. И. Этапы идентификации багатопараметричних технологій та шляхи їх реалізації / В. И. Большаков, В. М. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник НАН України. – 2013. – № 8. – С. 66–72. – Режим доступу : <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/67873>
4. Большаков В. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2014. – № 11. – С. 77–81. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
5. Volchuk V. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism / V. Volchuk, I. Klymenko, S. Kroviakov, M. Orešković // Tehnički glasnik – Technical Journal. – 2018. – Vol. 12. – № 2. – Pp. 93–97. – Режим доступу : <https://hrcak.srce.hr/202359>
6. Основы организации фрактального моделирования : монография / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров]. – Киев : Академперіодика НАН України, 2017. – 170 с.
7. Bolshakov V. I. Regularization of One Conditionally Ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy / V. I. Bolshakov, V. M. Volchuk, Yu. I. Dubrov // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2018. – Vol. 40. – № 9. – Pp. 1165–1171. – Режим доступу : <https://DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165>
8. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // Металлофизика и новейшие технологии. – 2017. – Т. 39. – № 7. – С. 949–957. – Режим доступу : <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>
9. Fractals and properties of materials : monograph / [V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov]. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p. – Режим доступу : <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
10. Пути применения теории фракталов : монография / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров]. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2016. – 146 с. – Режим доступу : <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
11. Растрингин Л. А. Случайный поиск в задачах оптимизации многопараметрических систем / [Л. А. Растрингин]. – Рига : Зинатне, 1965. – 212 с.
12. Строгалев В. П., Толкачева И. О. Имитационное моделирование : монография / [В. П. Строгалев, И. О. Толкачева]. – Москва : МГТУ им. Баумана, 2008. – 288 с.
13. Wooldridge D. E. The machinery of the brain / D. E. Wooldridge. – New York : McGraw-Hill, 1963. – 252 p.
14. Zeeman E. C. A catastrophe machine / E. C. Zeeman. – Edinburg : Edinburg University Press. 1978. – Vol. 4. – P. 276.
15. Poston T. Catastrophe the oryandits applications / [T. Poston, I. Stewart]. – London : Reprintofthe Pitman Publishing, 1978. – 512 p.
16. Большаков Вад. И. Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу / Вад. И. Большаков В. И. Большаков, В. М. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник НАН України. – 2014. – № 12. – С. 45–48. – Режим доступу : <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/73434>
17. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения частичной компенсации неполноты формальной аксиоматики / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – № 5. – С. 10–16. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/47385/43497>
18. Бир С. Кибернетика и управление производством / [С. Бир]. – Москва : Наука, 1963. – 276 с.
19. Capitanelli R. Asymptotics for mixed Dirichlet–Robin problems in irregular domains / R. Capitanelli // Journal of Mathematical Analysis and Applications. – 2010. – Vol. 362. – № 2. – P. 450–459. – Режим доступу : <https://doi:10.1016/j.jmaa.2009.09.042>
20. Capitanelli R. Nonlinear energy forms on certain fractal curves / R. Capitanelli // Journal of Nonlinear and Convex Analysis. – 2002. – Vol. 3. – № 1. – P. 67–80.
21. Большаков В. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2008. – № 11. – С. 99–107. – Режим доступу : <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2008-11/08-11-17.pdf>
22. Большаков В. И. Фрактальный подход при идентификации сложных систем / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2017. – № 6. – С. 46–50. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.06.00>
23. Большаков В. И. Применение фрактального моделирования при оценке структуры и свойств металлов / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2018. – № 1. – С. 50–55. – Режим доступу : <https://DOI:10.30838/J.PMNTM.2413.240418.50.105>
24. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств малоуглеродистой стали / В. И. Большаков, В. Н. Волчук // Металлофизика и новейшие технологии. – 2011. – Т. 33. – № 3. – С. 347–360.
25. Большаков В. И. Организация фрактального моделирования / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2018. – № 6. – С. 67–72. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.06.067>
26. Большаков В. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2017. – № 4. – С. 42–48. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.04.00>
27. Паск Г. Принципы самоорганизации / Г. Паск // Модель эволюции : сб. докл. – Москва : Мир, 1966. – С. 284–314.
28. Hamming R. W. Error-detecting and error-correcting codes / R. W. Hamming // Bell System Technical Journal. – 1950. – Vol. 29. – № 2. – P. 147.

REFERENCES

1. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. (in Russian).
2. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Identifikatsiya mnogoparametricheskikh, mnogokriterial'nykh tekhnologiy i puti ikh prakticheskoy realizatsii* [Multiparameter identification, multicriteria techniques and ways of their implementation]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no. 4, pp. 5–11. (in Russian).
3. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Etapy identyfikatsiyi bahatoparametrychnykh tekhnolohiy ta shlyakhy yikh realizatsiyi* [Stages multiparameter identification technologies and ways of their implementation]. *Visnyk Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2013, no. 8, pp. 66–72. (in Ukrainian).
4. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O prognozirovanii kachestva tselevogo produkta v periodicheskikh tekhnologiyakh* [Predicting the quality of a desired product in periodic technologies]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 11, pp. 77–81. (in Russian).
5. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S. and Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik - Technical Journal*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 93–97.
6. Bol'shakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Osnovy organizacii fraktal'nogo modelirovaniya* [Fundamentals of fractal modeling]. Kyiv, Ukraine : PH "Akademperiodyka" National Academy of Sciences of Ukraine, 2017, 170 p. (in Russian).
7. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. Regularization of One Conditionally Ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2018, vol. 40, no. 9, pp. 1165–1171.
8. Volchuk V.M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovanii kriteriyev kachestva mnogoparametricheskikh tekhnologiy* [On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies]. *Metallofizika i noveyshie tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no. 3, pp. 949–957. (in Russian).
9. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
10. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Puti primeneniya teorii fraktalov* [Ways of applying the theory of fractals]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2016, 146 p. (in Russian).
11. Rastrigin L.A. *Sluchaynyy poisk v zadachakh optimizatsii mnogoparametricheskikh sistem* [Random search in optimization problems of multiparameter systems]. Riga : Zinatne, 1965, 212 p. (in Russian).
12. Strogalev V.P. and Tolkacheva I.O. *Imitatsionnoye modelirovaniye* [Imitation modeling]. Moscow : MG TU named Bauman, 2008, 288 p. (in Russian).
13. Wooldridge D.E. *The machinery of the brain*. New York : McGraw-Hill, 1963. 252 p.
14. Zeeman E.C. *A catastrophe machine*. Edinburg : Edinburg University Press, 1978, vol. 4, p. 276.
15. Poston T. and Stewart I. *Catastrophe the oryndits applications*. London : Reprintofthe Pitman Publishing, 1978, 512 p.
16. Bol'shakov Vad.I., Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Chastkova kompensatsiya nepovnoty formal'noyi aksiomatyky pry identyfikatsiyi struktury metalu* [The partial compensation of incompleteness of formal axiomatics in the identification of the metal structure]. *Visnyk akademiyi nauk Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 12, pp. 45–48. (in Ukrainian).
17. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Materialovedcheskiye aspekty primeneniya chastichnoy kompensatsii nepolnoty formal'noy aksiomatiki* [Material aspects of use of partial compensation of incompleteness of formal axiomatics]. *Visnyk Prydniprovs'koy derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 5, pp. 10–16. (in Russian).
18. Beer S. *Kibernetika i upravleniye proizvodstvom* [Cybernetics and production management]. Moscow : Science, 1963, 276 p. (in Russian).
19. Capitanelli R. Asymptotics for mixed Dirichlet–Robin problems in irregular domains. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2010, vol. 362, no. 2, pp. 450–459.
20. Capitanelli R. Nonlinear energy forms on certain fractal curves. *Journal of Nonlinear and Convex Analysis*, 2002, vol. 3, no. 1, pp. 67–80.
21. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Osobennosti primeneniya mul'tifraktal'nogo formalizma v materialovedenii* [Features of the multifractal formalism in materials]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2008, no. 11, pp. 99–107. (in Russian).
22. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Fraktal'nyy podkhod pri identifikatsii slozhnykh sistem* [Fractal approach to the identification of complex systems]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 6, pp. 46–50. (in Russian).
23. Bol'shakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Primeneniye fraktal'nogo modelirovaniya pri otsenke struktury i svoystv metallov* [Application of fractal modelling at the estimation of the structure and properties of metals]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2018, no. 1, pp. 50–55. (in Russian).
24. Bolshakov V.I. and Volchuk V.N. *Materialovedcheskiye aspekty primeneniya veyvletno-mul'tifraktal'nogo podkhoda dlya otsenki struktury i svoystv malouglerodistoy stali* [Material science aspects of the use of wavelet and multifractal approach for assessing of the structure and properties of low-carbon steel]. *Metallofizika i noveyshie tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2011, vol. 33, no. 3, pp. 347–360. (in Russian).
25. Bol'shakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Organizatsiya fraktal'nogo modelirovaniya* [Organization of fractal modeling]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2018, no. 6, pp. 67–72. (in Russian).
26. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Topologicheskkiye i fraktal'nyye invarianty struktury dlya otsenki kachestva metalla* [Topological and fractal invariants of a structure to assess the quality of a metal]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 4, pp. 42–48. (in Russian).

27. Pask G. *Principy samoorganizacii* [The principles of self-organization]. *Model' `evolyucii : sb. dokl.* [Model of evolution : coll. of rep.]. Moscow : Mir, 1966, pp. 284–314. (in Russian).
28. Hamming R.W. Error-detecting and error-correcting codes. *Bell System Technical Journal*, 1950, vol. 29, no. 2, p. 147.

Поступила в редакцію 13.04.2018

Принята в печать 15.04.2018

УДК 519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240418.39.265

ПРОГНОЗ МЕХАНИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ Ст6сп

ФОРТИГІН А. А. *, *аспір.*

* Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: fortigin13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

Анотація. Постановка проблеми. Для оцінювання механічних властивостей часто використовуються методи неруйнівного контролю. Перспективним напрямком у галузі прогнозу характеристик якості металу стало застосування математичних методів прогнозу, зокрема, планування експериментів. **Матеріал і методи.** Досліджувався прокат зі сталі Ст6сп у стані заводської поставки. За допомогою методики оптичної мікроскопії встановлено, що структура сталі феритно-перлітна. Вміст перліту в металі був у межах 50...60 %. **Результати та їх обговорення.** Застосовано методику планування експериментів для прогнозу механічних властивостей сталі Ст6сп в робочій області параметрів. Досліджувався вплив хімічного складу прокату зі сталі Ст6сп у стані заводської поставки на її механічні властивості в межах ГОСТ 535-2005. За результатами аналізу матриці планування отримано математичну модель прогнозу межі міцності, межі текучості, твердості та відносного подовження. Модель адекватна згідно з критеріями Фішера та Кохрена. Побудовано гістограму впливу елементів хімічного складу сталі Ст6сп на її механічні властивості. **Висновки.** Запропоновано методику прогнозу механічних властивостей сталі Ст6сп в робочій області її параметрів згідно з нормативними документами.

Ключові слова: механічні властивості; математична модель; матриця планування; хімічний склад; структура

ПРОГНОЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ Ст6сп

ФОРТЫГИН А. А. *, *аспір.*

* Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: fortigin13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9838-5911

Аннотация. Постановка проблемы. Для оценки механических свойств часто используются методы неразрушающего контроля. Перспективным направлением в области прогноза характеристик качества металла является применение математических методов прогноза, в частности, планирование экспериментов. **Материал и методики.** Исследовался прокат из стали Ст6сп в состоянии заводской поставки. С помощью методики оптической микроскопии установлено, что структура стали является ферритно-перлитной. Содержание перлита в металле находилось в пределах 50...60 %. **Результаты и их обсуждение.** В работе использовалась методика планирования экспериментов для прогноза механических свойств стали Ст6сп в рабочей области параметров. Исследовалось влияние химического состава проката из стали Ст6сп в состоянии заводской поставки на ее механические свойства в пределах ГОСТ 535-2005. По результатам анализа матрицы планирования получена математическая модель прогноза предела прочности, предела текучести, твердости и относительного удлинения. Модель адекватна согласно критериям Фишера и Кохрена. Построена гистограмма влияния элементов химического состава стали Ст6сп на ее механические свойства. **Выводы.** Предложена методика прогноза механических свойств стали Ст6сп в рабочей области ее параметров согласно нормативным документам.

Ключевые слова: механические свойства; математическая модель; матрица планирования; химический состав; структура

FORECAST OF MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL Ст6сп

FORTIHIN A.A. *, *Postgraduate student*

* Department of materials science and materials processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: fortigin13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9838-5911