

**Системные технологии  
моделирования  
сложных процессов**

**Министерство образования и науки Украины  
Национальная металлургическая академия Украины**

*К 15-летию кафедры  
информационных технологий и систем  
Национальной металлургической  
академии Украины*

# **Системные технологии моделирования сложных процессов**

**Монография  
под общей редакцией  
проф. А.И. Михалёва**

**Днепр – 2016**

УДК 004.94:519.875.5

Системные технологии моделирования сложных систем / Монография под общей редакцией проф. А.И. Михалёва. – Днепр: НМетАУ-ИБК “Системные технологии”, 2016. – 608 с.

ISBN 978-966-2596-19-9

**Авторский коллектив:**

*М.В. Андреев, И.П. Атаманюк, Ю.В. Бабенко, В.Е. Белозёров, Е.В. Бодянский, Е.А. Винокурова, И.М. Гвоздева, В.В. Гнатушенко, Викт.В. Гнатушенко, А.И. Гуда, Али Данади, А.И. Деревянко, И.С. Дмитриева, О.О. Дробахин, Г.Л. Евтушенко, И.В. Жукович, В.Н. Журавлёв, А.А. Журба, В.Г. Зайцев, Р.В. Кирия, Ю.П. Кондратенко, А.А. Косолапов, В.И. Кузнецов, В.Ф. Миргород, А.И. Михалёв, П.П. Мулеса, К.Ю. Островская, Н.С. Прядко, Д.Ю. Салтыков, А.П. Сарычев, П.П. Сафьян, В.Ю. Селивёрстов, Т.В. Селивёрстова, В.В. Скалозуб, М.В. Скалозуб, Р.А. Сухомлин, **В.А. Тутык**, Т.М. Фененко, С.Ю. Цейтлин, М.С. Чердниченко.*

**Рецензенты:**

**Малайчук В.П.**, доктор технических наук, профессор Днепропетровского национального университета им. О. Гончара,

**Любчик Л.М.**, доктор технических наук, профессор Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”,

**Кветный Р.Н.**, доктор технических наук, профессор Винницкого национального технического университета.

В данной научной монографии впервые дан обобщенный итог многолетних исследований научных школ Приднепровского и других регионов Украины в области системного моделирования сложных процессов. Представлена широкая палитра подходов и методов синтеза системных технологий моделирования с применением рекуррентного анализа, гибридных нейро-нечётких сетей и фрактальных методов интеллектуальной обработки данных, методов оценивания хаотической динамики нелинейных систем и др.

Монография будет полезной как молодым исследователям (студентам старших курсов, магистрантам и аспирантам), так и сложившимся научным работникам, интересующимся вопросами моделирования сложных систем.

Рекомендовано к печати

Ученым советом Национальной металлургической академии Украины,  
протокол от 26.09.2016 г. № 9

Адрес редакции:

49600, г. Днепр, пр. Гагарина, 4,  
Национальная металлургическая академия Украины,  
кафедра Информационных технологий и систем,  
e-mail: st@nmetau.edu.ua  
+38 (056) 713 52 56

ISBN 978-966-2596-19-9

© Национальная металлургическая академия Украины,  
ИБК “Системные технологии”, 2016.

Ministry of Education and Science of Ukraine  
National Metallurgical Academy of Ukraine

*To the 15-th anniversary  
of Information Technologies and Systems  
Department of National metallurgical Academy of  
Ukraine*

# **SYSTEM TECHNOLOGIES FOR MODELING OF COMPLEX PROCESSES**

**Monograph edited by  
prof. A.I. Mikhalyov**

Dnipro – 2016

UDC 004.94:519.875.5

System technologies for modeling of complex processes / Monograph, edited by prof. A.I. Mikhalyov. – Dnipro: NMetAU-CPI “System Technologies”, 2016. – 608 p.  
ISBN 978-966-2596-19-9

**Authors:**

M.V. Andreev, I.P. Atamanyuk, I.V. Babenko, V.E. Belozyorov, E.V. Bodyanskiy, O.A. Vinokourova, I.M. Hvozdeva, V.V. Hnatushenko, Vikt.V. Hnatushenko, A.I. Guda, Ali Danladi, A.I. Derevyanko, I.S. Dmitriyeva, O.O. Drobahin, G.L. Yevtushenko, I.V. Zhukovitskiy, V.N. Zhuravlev, A.A. Zhurba, V.G. Zaitsev, R.V. Kiriya, Y.P. Kondratenko, A.A. Kosolapov, V.I. Kuznetsov, V.F. Myrhorod, A.I. Mikhalyov, P.P. Mulesa, K.Y. Ostrovskaya, N.S. Pryadko, D.Y. Saltykov, A.P. Sarychev, P.P. Sufyan, V.Y. Selivyorstov, T.V. Selivyorstova, V.V. Skalozub, M.V. Skalozub, R.A. Suhomlin, V.A. Tutyk, T.M. Fenenko, S.Yu. Ceitlin, M.S. Cherednichenko.

**Reviewers:**

**Malaychuk V.P.**, Dr. Sc. Eng., Professor of Oles Honchar Dnipropetrovsk National University.,

**Lyubchik L.M.**, Dr. Sc. Eng., Professor of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,

**Kvyetnyy R.N.**, Dr. Sc. Eng., Professor of Vinnytsia National Technical University.

In this scientific monograph for the first time we have presented a generalized result of years of Pridneprovsk and other regions of Ukraine researches of scientific schools in the field of system modeling of complex processes. It presents a broad palette of approaches and methods of system modeling technologies synthesis with using recurrent analysis of hybrid neuro-fuzzy networks and fractal data mining methods, evaluation methods of chaotic dynamics of nonlinear systems, and others.

The monograph will be useful both to young researchers (undergraduates, graduate students and postgraduates), as well as the experienced scientists who are interested in the modeling of complex systems.

The monograph was approved  
at a meeting of the NMetAU Academic Council  
26.09.2016, the protocol № 9.

**Editorial address:**

49006, Dnipro, Gagarina av., 4,  
National Metallurgical Academy of Ukraine  
department of Information Technologies and Systems,  
e-mail: st@nmetau.edu.ua  
+38 (056) 713 52 56

ISBN 978-966-2596-19-9

© National Metallurgical Academy of Ukraine,  
CPI “System Technologies”, 2016.

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                   |   |
|-------------------|---|
| Предисловие ..... | 8 |
|-------------------|---|

*Андреев М.В., Дробахин О.О., Салтыков Д.Ю.*

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Применение дробно-рациональной аппроксимации для исследования резонансных явлений ..... | 11 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|

*Атаманюк И.П., Кондратенко Ю.П.*

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Методы моделирования, распознавания и экстраполяции случайных последовательностей на основе нелинейного канонического разложения ..... | 32 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

*Бабенко Ю.В.*

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Моделювання та еволюційна оптимізація роботи систем підземного конвеєрного транспорту з бункерами ..... | 51 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

*Белозеров В.Е., Зайцев В.Г.*

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Влияние порога рекуррентности и параметра запаздывания временного ряда на информативность его рекуррентной диаграммы (на примерах хаотических аттракторов) ..... | 67 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

*Бодянский С.В., Винокурова О.А., Мулеса П.П.*

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Гібридні нейро-фазні мережі для аналізу потоків даних медико-біологічної природи ..... | 91 |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|

*Гвоздева И.М.*

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Моделирование процессов формирования и пространственно-временной обработки акустических когерентных изображений ..... | 119 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

*Гнатушенко Вікт.В., Михальов О.І., Данладі Алі, Фененко Т.М.*

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Моделі і методи передачі трафіка у бездротових мережах та оцінка їх продуктивності ..... | 156 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

*Гнатушенко В.В.*

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Синергетична обробка багатоканальних аерокосмічних зображень високого просторового розрізнення ..... | 178 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

---

Гуда А.И., Михалёв А.И.

Оценивание эффективности применения интегральных критериев  
в задачах параметрической идентификации хаотических систем .... 200

Дервянко А.И., Михалёв А.И.

Методы хаотической динамики в задачах моделирования процессов  
парафазного осаждения ..... 230

Дмитрієва І.С.

Геометричні моделі формоутворення та корекції фотограмметрич-  
них даних цифрової стереозйомки ..... 250

Жуковицкий И.В., Косолапов А.А.

Моделирование в процессе проектирования информационных си-  
стем на железнодорожном транспорте ..... 268

Журавлёв В.Н.

Модель вихревого процесса переноса энергии со скоростью звука в  
газовых средах ..... 287

Журба А.О., Михальов О.І.

Фрактальні характеристики зображень металоструктур та особли-  
вості їх обчислення ..... 299

Кирия Р.В., Михалев А.И.

Математическое моделирование процессов функционирования си-  
стем конвейерного транспорта самоподобной структуры ..... 328

Кузнецов В.І., Євтушенко Г.Л.

Системне моделювання складних об'єктів на базі методів багато-  
критеріального аналізу ..... 349

Миргород В.Ф.

Аппроксимационные преобразования нелинейных математиче-  
ских моделей пространства состояний ..... 374

---

*Островська К.Ю.*

Математичне моделювання процесів металургійного виробництва  
з використанням методів нечіткого виводу ..... 408

*Прядко Н.С.*

Информационные технологии для оптимизации тонкого измельче-  
ния материалов ..... 427

*Сарычев А.П.*

Моделирование в классе систем авторегрессионных уравнений со  
случайными коэффициентами в условиях структурной неопреде-  
ленности ..... 463

*Сафьян П.П., Тутьк В.А., Селиверстова Т.В., Гуда А.И.*

Моделирование процесса термического воздействия пароплазмен-  
ного разряда на поверхность коррозионностойких труб аустенитно-  
го класса ..... 500

*Селиверстов В.Ю., Селиверстова Т.В.*

Использование компьютерного моделирования для анализа эффек-  
тивности технологии газодинамического воздействия при литье  
слитков из углеродистой стали ..... 531

*Скалозуб В.В., Цейтлин С.Ю., Чередниченко М.С.*

Интеллектуальные информационные технологии и системы желез-  
нодорожного транспорта ..... 560

*Сухомлин Р.О.*

Математичне та інформаційне забезпечення процесів визначення  
розладнань в технічних системах ..... 590

---

*“Когда очевидно, что цель  
недостижима, не изменяйте  
цель — изменяйте свой план  
действий”  
(Конфуций)*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы термины “математическое, имитационное, компьютерное моделирование”, “моделирование процессов, систем”, являются едва ли ни наиболее часто встречающимися в научной литературе, как в зарубежной так и в отечественной. Интенсивно разрабатываются модели практически во всех областях человеческой деятельности: в технике, в экономике, в управлении развивающимися процессами и проектами, в биологии, медицине и других областях.

В свою очередь, такой термин как “системные технологии” (СТ) стал настолько популярным, что, к сожалению, применяется даже там, где он принципиально не применим. В этой связи, отметим, что в широком смысле под системной технологией следует понимать технологию интеллектуальной обработки информации, основанную на научных принципах системных исследований поведения реальных объектов окружающего мира. При этом одним из важнейших научных направлений развития СТ является направление, связанное с синтезом системных технологий моделирования процессов, технологий (в том числе и информационных (ИТ)), в основе которых лежит циклическая триада: {*Модель* → *Алгоритм* → *Программа* → *Модель*} (М-А-П-М), где главенствующая роль принадлежит именно Модели, обладающей свойством системности и построенной на системных принципах критериального взвешивания эффективности альтернативных моделей в условиях структурной и параметрической неопределённости.

---

В этой связи, системные технологии моделирования следует рассматривать как научный инструмент моделирования именно сложных процессов — многомерных систем, которым свойственна функциональная избыточность в силу наличия в их структуре взаимодействующих подсистем.

Под данное определение, как видно, подпадает достаточно широкий класс процессов — объектов моделирования, что, в свою очередь, предопределяет многообразие их моделей: от натуральных и кратномасштабных — до математических, во всём их операторном разнообразии: от алгебраических, дифференциальных, интегральных, информационно-энтропийных и фрактальных, нейронных и нейро-нечётких — до нелинейных моделей динамического хаоса и их различных комбинаций.

Анализируя поведение реальных физических систем, таких как, например, рассмотренные в данной монографии горнотранспортные системы или системы тонкого измельчения природных ископаемых, процессы парофазного осаждения при формировании функциональных покрытий или процессы вихревого переноса энергии, а также процессы в беспроводных сенсорных компьютерных сетях или процессы обработки потоков данных медико-биологической природы в гибридных нейрофаззи сетях, можно сделать вывод о том, что вопросы управления и прогнозирования состояния такого класса сложных, в большинстве случаев, пространственно-временных нестационарных систем, требуют необходимости учёта их нелинейности, диссипативных свойств и возможной неравновесности и, как следствие — создания эффективных системных технологий их моделирования.

В данной коллективной монографии представлены результаты научных исследований учёных из разных научных школ Украины, которых объединяет общее научное направление, связанное с решением задач в области СТ моделирования сложных систем. Представлена широкая палитра подходов и методов синтеза СТ моделирования: от канонических до таких ультрасовременных как методы рекуррентного анализа, гибри-

ных нейро-нечётких и мультифрактальных системных технологий интеллектуальной обработки данных, методов оценивания хаотической динамики слабоструктурированных систем в условиях априорной и текущей неопределённости.

Монография содержит 24 независимых раздела, каждый из которых посвящён решению конкретной научной проблемы на основе современных математических и информационных методов анализа и синтеза сложных систем. В монографии принят алфавитный принцип изложения материалов.

Выражаем огромную признательность научным рецензентам, докторам технических наук, профессорам: Малайчуку Валентину Павловичу, Любчику Леониду Михайловичу и Кветному Роману Наумовичу, которые нашли время проработать материал монографии и высказать свои ценные замечания, позволившие улучшить качество изложения материалов монографии.

Лауреат Государственной премии  
Украины в области науки и техники  
А.И. Михалёв,  
д.т.н., профессор.

---

**Наукове видання**

**Системні технології  
моделювання  
складних процесів**

**Монографія  
під загальною редакцією  
проф. О.І. Михальова**

**(Російською та українською мовами)**

**Технічна редакція: Т.В. Селівьорстова.**

**Комп'ютерна верстка: А.І. Гуда.**

**Здано в набір 27.06.2016.**

**Підписано до друку 27.09.2016.**

**Формат 70x100 1/16.**

**Друк – різнограф. Папір – типогр.**

**Умов. друк. арк. – 38,06. Обл.-виданн. – 35,82.**

**Тираж 100. Замовлення № 7/16.**

**Національна металургійна академія України  
49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4  
st@nmetau.edu.ua**

**Надруковано в ПП Усик Т.Л.**

**49000 м. Дніпро пр. Фестивальний, 24/85.**

**Свідоцтво про реєстрацію ВО № 163448 від 15.08.2002**