

# **ФРАКТАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ: ПИОНЕРСКИЕ КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕАЛИЗАЦИИ**

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ  
ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК  
**А. Х. ГИЛЬМУТДИНОВА**



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2020

УДК 621.372.4  
ББК 32.844/32.85  
Ф 82

Редакционная коллегия:

Гильмутдинов А. Х., Евдокимов Ю. К.,  
Караби Басвас (Karabi Biswas), Капонетто Р. (Caponetto R.),  
Лё Мэотэ А. (Le Méhauté A.), Нигматуллин Р. Р., Ушаков П. А.,  
Чэн Ю. К. (Chen Y. Q.)

**Фрактальные элементы: пионерские конструктивно-технологические реализации** / Под общей редакцией д.т.н. А.Х. Гильмутдинова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2020. — 640 с. — ISBN 978-5-9221-1898-9.

В монографии собраны ставшие библиографической редкостью пионерские публикации по аппаратной реализации нового класса элементов с фрактальным импедансом. Сюда вошли работы, изданные на английском и русском языках, в которых предлагаются новые на момент публикации конструктивно-технологические решения для реализации фрактальных импедансов. Эти реализации осуществлены на основе следующих элементов или физических принципов: 1) электрохимических систем; 2)  $RC$ -элементов с сосредоточенными параметрами ( $RC$ -ЭСП); 3)  $RC$ -элементов с распределенными параметрами ( $RC$ -ЭРП); 4) наноструктурированных материалов; 5) использования неидеальностей реальных конструктивных элементов и электрофизических свойств материалов их конструкций. Работы расположены в хронологическом порядке, что позволяет читателю наглядно проследить за эволюцией и движением научной и конструкторской мысли при создании современной фрактальной элементной базы радиоэлектроники.

Для магистрантов, аспирантов и научных работников.

*Издание монографии финансово поддержано грантом Министерства образования и науки Республики Татарстан в рамках проведения международных «Нигматуллинских чтений-2018», а также спонсорами; оно не преследует никаких коммерческих целей. Монография будет бесплатно распространяться в библиотечной сети университетов и научных учреждений и не подлежит продаже в книготорговой сети и сети аналогичных коммерческих структур.*

*Предисловие чл.-корр. РАН С.А. Никитова*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	7
<b>Часть I. 1961–1973</b>	
<b>The Non-integer Integral and Its Application to Control Systems</b> <i>S. Manabe</i> . . . . .	13
<b>Вопросы теории переходных процессов в цепи с полярнографической ячейкой</b> <i>Р. Ш. Нигматуллин</i> . . . . .	27
<b>Применение специальной полярнографической ячейки для дробного дифференцирования I–E-кривых</b> <i>Р. Ш. Нигматуллин, В. А. Белавин, А. И. Мирошников, Н. К. Луцкая</i> . . . . .	31
<b>Применение дробного дифференцирования в осциллографической полярнографии</b> <i>Р. Ш. Нигматуллин, А. И. Мирошников</i> . . . . .	35
<b>Теория электрохимического диода</b> <i>Р. Ш. Нигматуллин</i> . . . . .	39
<b>Общее уравнение и электрический аналог электролитической ячейки со сферическим стационарным микроэлектродом</b> <i>Р. Ш. Нигматуллин</i> . . . . .	47
<b>The System Design by the Use of a Model Consisting of a Saturation and Noninteger Integrals</b> <i>S. Manabe</i> . . . . .	55
<b>The Design of A Constant-Angle or Power-Law Magnitude Impedance</b> <i>Robert M. Lerner, Senior Member, Ire</i> . . . . .	65
<b>Электрический дробно-дифференцирующий и интегрирующий двухполюсник</b> <i>Р. Ш. Нигматуллин, В. А. Белавин</i> . . . . .	87
<b>Distributed and Lumped RC Realization of a Constant Argument Impedance</b> <i>Suhash C. Dutta Roy and B. A. Sheno</i> i . . . . .	97
<b>On the Realization of a Constant-Argument Immittance or Fractional Operator</b> <i>Suhash C. Dutta Roy</i> . . . . .	113
<b>Дробное дифференцирование <math>i</math>-E кривых в осциллографической полярнографии</b> <i>Р. Ш. Нигматуллин, А. И. Мирошников</i> . . . . .	139
<b>Distributed RC Impedances of Constant Phase</b> <i>Amos Nathan and Reed K. Even</i> . . . . .	149

## Часть II. 1981–1992

Fractional Order Sinusoidal Oscillators: Optimization and Their Use in Highly Linear FM Modulation <i>A. Oustaloup</i> . . . . .	159
Introduction to Transfer and Motion in Fractal Media: the Geometry of Kinetics <i>A. Le Méhauté, G. Crepy</i> . . . . .	169
Пассивные двухполюсники с постоянной фазой на основе RC-структуры с поверхностно-распределенными параметрами <i>Р. Ш. Нигматуллин, А. Х. Гильмутдинов, А. А. Гонне и др.</i> . . . . .	195
RC-элементы с поверхностно-распределенными параметрами и анализ пассивных частотно-избирательных цепей на его основе <i>А. Х. Гильмутдинов, А. А. Гонне, Р. Ш. Нигматуллин, П. А. Ушаков</i> . . . . .	199
Авторское свидетельство СССР на изобретение <i>Гильмутдинов А. Х. и др.</i> . . . . .	207
Basic Characteristics of a Fractance Device <i>Masahiro Nakagawa and Kazuyuki Sorimachi</i> . . . . .	215
Патент РФ <i>Евдокимов Ю. К. и др.</i> . . . . .	227

## Часть III. 1993–1999

Распределенные датчики для измерения физических полей: топология, устройство, теория <i>Ю. К. Евдокимов</i> . . . . .	241
Патент РФ <i>Евдокимов Ю. К. и др.</i> . . . . .	251
Распределенные измерительные среды: принципы построения, модели, алгоритмы <i>Ю. К. Евдокимов</i> . . . . .	267
Многофункциональный RC-элемент с распределенными параметрами: модель, анализ, применение <i>А. Х. Гильмутдинов, А. А. Гонне</i> . . . . .	281
Анализ комплементарных RC-элементов с распределенными параметрами и некоторые характеристики RC-фильтров на их основе <i>А. Х. Гильмутдинов, Г. А. Ушаков</i> . . . . .	291
Фрактальные резистивно-емкостные структуры на основе ковры Серпинского: Модель, анализ, применение <i>А. Х. Гильмутдинов</i> . . . . .	303
Реализация операций дробного интегрирования на основе резистивно-емкостных структур с распределенными параметрами <i>А. Х. Гильмутдинов</i> . . . . .	307
The Frequency Response of a Fractal Photolithographic Structure <i>T. Cisse Haba, G. Ablart, T. Camps</i> . . . . .	311
Патент РФ <i>Гильмутдинов А. Х. и др.</i> . . . . .	327

## Часть IV. 2000–2006

Frequency-band complex noninteger differentiator: Characterization and synthesis <i>Alain Oustaloup, François Levron, Benoît Mathieu, Florence M. Nanot</i> . . . . .	337
Analog Realization of a Fractional Control Element — Revisited October 27, 2002 <i>Gary W. Bohannon</i> . . . . .	371
Continuously Distributed Sensors for Steady-State Temperature Profile Measurements: Main Principles and Numerical Algorithm <i>Yu. K. Evdokimov, S. Martemianov</i> . . . . .	377
Пленочный базовый распределенный резистивно-емкостный элемент: выбор, модель, анализ, функциональные возможности <i>А. Х. Гильмутдинов</i> . . . . .	399
Fractance Analog Realization Using One Order Newton Method <i>Liao Ke, Yuan Xiao, Pu Yi-fei, Zhou Ji-liu</i> . . . . .	417
A Recursive Net-Grid-Type Analog Fractance Circuit for Any Order Fractional Calculus <i>Pu Yifei, Yuan Xiao, Liao Ke, Zhou Jiliu, Zhang Ni, Zeng Yi</i> . . . . .	425
Is there a geometrical/physical meaning of the fractional integral with complex exponent? <i>Raoul R. Nigmatullin, Alain Le Méhauté</i> . . . . .	439
Electrical Component with Fractional Order Impedance <i>Gary W. Bohannon, Stephanie K. Hurst, Lee Spangler</i> . . . . .	467

## Часть V. 2007–2011

Распределенные резистивно-емкостные элементы с фрактальной размерностью: конструкции, анализ, синтез и применение <i>А. Х. Гильмутдинов, В. А. Мокляков, П. А. Ушаков</i> . . . . .	497
Use of a component with fractional impedance in the realization of an analogical regulator of order 1/2 <i>T. Cisse Haba, Georges L. Loum, Jeremie T. Zoueu and G. Ablart</i> . . . . .	509
Дробные операторы: критерии синтеза и реализация <i>А. Х. Гильмутдинов, П. А. Ушаков, М. М. Гильметдинов</i> . . . . .	527
Fractional-Order Memristive Systems <i>Ivo Petráš, Yang Quan Chen and Calvin Coopmans</i> . . . . .	549
Passive and Active Elements Using Fractional $L_\beta C_\alpha$ Circuit <i>A. G. Radwan and K. N. Salama</i> . . . . .	567

## Часть VI. 2013

Packaging of Single-Component Fractional Order Element <i>D. Mondal and K. Biswas</i> . . . . .	597
Experimental Characterization of Ionic Polymer Metalcomposite as a Novel Fractional Order Element <i>R. Caponetto, S. Graziani, F. L. Pappalardo and F. Sapuppo</i> . . . . .	617