

ПЕРСОНАЛИИ  
PERSONALIA



Серия «Математика»  
2024. Т. 50. С. 170–179

Онлайн-доступ к журналу:  
<http://mathizv.isu.ru>

---

---

ИЗВЕСТИЯ

Иркутского  
государственного  
университета

---

---

Научная статья

УДК 012

MSC 01A70

DOI <https://doi.org/10.26516/1997-7670.2024.50.170>

**Анатолий Соломонович Апарцин.**  
**Научное наследие**

**С. В. Солодуша**<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup> Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, Иркутск,  
Российская Федерация  
✉ [solodusha@isem.irk.ru](mailto:solodusha@isem.irk.ru)

**Аннотация.** Дан краткий обзор основных направлений научной деятельности А. С. Апарцина в развитии теории неустойчивых задач вычислительной математики. Приведены теоретические и прикладные результаты исследований его коллег и учеников.

**Ключевые слова:** интегральные уравнения Вольтерра I рода, численные методы, обратные и некорректные задачи

**Благодарности:** Результаты исследований, представленные в п. 2, выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FWEU-2021-0006, тема № АААА-А21-121012090034-3).

**Ссылка для цитирования:** Солодуша С. В. Анатолий Соломонович Апарцин. Научное наследие // Известия Иркутского государственного университета. Серия Математика. 2024. Т. 50. С. 170–179.  
<https://doi.org/10.26516/1997-7670.2024.50.170>

Research article

**Anatoly Solomonovich Aparcyn. Scientific Heritage**

**Svetlana V. Solodusha**<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup> Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation  
✉ solodusha@isem.irk.ru

**Abstract.** A brief overview of the main directions of scientific activity of A. S. Apartsin in the development of the theory of unstable problems of computational mathematics is given. The theoretical and applied results of research by his colleagues and students are presented.

**Keywords:** Volterra integral equations of the first kind, numerical methods, inverse and ill-posed problems

**Acknowledgements:** The research results presented in paragraph 2 were carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FWEU-2021-0006, topic No. AAAA-A21-121012090034-3).

**For citation:** Solodusha S. V. Anatoly Solomonovich Apartsyn. Scientific Heritage. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Mathematics*, 2024, vol. 50, pp. 170–179. (in Russian)

<https://doi.org/10.26516/1997-7670.2024.50.170>



Он человек был — человек во всем;  
ему подобных мне уже не встретить.  
В. Шекспир

## 1. Очерк о научной и педагогической деятельности

Родился Анатолий Соломонович 14 марта 1942 г. в Хабаровске. Детские годы ученого прошли в Иркутске, куда семья переехала во время войны. Окончив школу, он поступил на физико-математический факультет Иркутского государственного университета им. А. А. Жданова.

Как одного из лучших студентов-математиков после четвертого курса его направили на механико-математический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Там во время учебы у академика А. Н. Тихонова он специализировался в относительно молодой отрасли математики, связанной с общей теорией некорректных (неустойчивых) задач и численных методов их решения. После окончания университета был принят в 1966 г. на работу в Сибирский энергетический институт Сибирского отделения Академии наук СССР (позже ИСЭМ СО РАН).

В 1983 г. под руководством А. Б. Бакушинского защитил кандидатскую диссертацию, которую оппонировали профессор В. А. Морозов и В. В. Воронин. Основные теоретические результаты, полученные им в диссертационной работе, связаны с общей схемой построения дискретизационных методов регуляризации интегральных уравнений I рода типа Вольтерра, основанной на согласовании размерности конечномерных аппроксимирующих уравнений с уровнем погрешности исходных данных (см., например, [6; 11]). При этом были рассмотрены как конечноразностные (квадратурные), так и проекционные приближенные методы. Также были изучены комбинированные регуляризующие алгоритмы, в которых наряду с дискретизационным параметром регуляризации  $h$  введен «традиционный» параметр регуляризации  $\alpha$ . Практическая часть диссертационного исследования была посвящена решению реальных прикладных задач, в том числе задаче определения тепловых потоков в теплофизических установках, сводящейся к уравнению Абеля. Полученные результаты он докладывал на семинарах известных математиков XX в.: В. А. Винокурова, А. Ф. Верлани, В. К. Иванова, Г. М. Вайникко, В. А. Морозова, Н. Г. Преображенского.

В 1989 г. он стал заведующим лабораторией неустойчивых задач вычислительной математики в родном институте. После защиты кандидатской диссертации А. С. Апарцин занялся кругом задач, связанным с некорректными задачами в энергетике и их саморегуляризацией. Цикл работ [2; 8; 12; 15–17; 24] посвящен уравнениям Вольтерра I рода в теории развивающихся систем, исследованию численных методов их решения в интегральных моделях с управляемой памятью, а также применению моделей В. М. Глушкова для моделирования долгосрочных стратегий развития единой электроэнергетической системы.

Многие работы А. С. Апарцина посвящены теории  $n$ -мерных интегральных уравнений Вольтерра I рода с двумя переменными пределами, связанных с идентификацией нелинейных динамических систем типа „вход-выход“. В публикациях [2–4; 23; 25] исследуется задача построения математической модели динамики в виде интегро-степенного ряда Вольтерра. Разработанная методика была применена для моделирования динамики теплообмена на высокотемпературном контуре (ВТК) ИСЭМ СО РАН [21; 22].

В 2000 г. А. С. Апарцин защитил докторскую диссертацию «Неклассические уравнения Вольтерра I рода в интегральных моделях динамических систем: теория, численные методы, приложения» в Иркутском государственном университете. Оппонентами выступили профессора А. Б. Бакушинский, Ю. Е. Воскобойников, Н. А. Сидоров, ведущей организацией — Институт математики и механики Уральского отделения РАН.

Дальнейшие исследования А. С. Апарцина были связаны с развитием теории, базирующейся на понятии соответствующих мажорантных уравнений, и численных методов решения полиномиальных интегральных уравнений Вольтерра I рода  $n$ -й степени [1; 5; 7; 9]. Им получены неулучшаемые оценки решений новых классов нелинейных неравенств с операторами Вольтерра, изучена устойчивость непрерывного решения выделенных классов нелинейных интегральных уравнений [10].

Совместно со своими учениками Е. В. Марковой и И. В. Сидлер им рассмотрена специфика интегральных моделей развивающихся систем с отсутствующей предысторией [13; 14; 18–20]. Для моделирования процессов старения и замены элементов динамической системы А. С. Апарциным было введено тестовое интегральное уравнение Вольтерра I рода для  $N$  возрастных групп, качественный анализ которого показал неустойчивость решения при степенном росте модуля коэффициента старшей возрастной группы.

Анатолий Соломонович был талантливым педагогом и наставником. В родном ИГУ он преподавал основные и специальные курсы вычислительной математики. Подготовил и воспитал четыре кандидата и одного доктора наук, на протяжении многих лет (с 2005 по 2015 г.) оппонировал кандидатские и докторские диссертации.

Сформированное А. С. Апарциным научное направление исследований обратных задач динамики энергетических объектов и систем, связанное с разработкой интегральных моделей на основе уравнений Вольтерра I рода и устойчивых численных методов, развивается в работах его учеников и коллег.

## 2. Научный вектор

Исследования, начатые в работах А. С. Апарцина, с 2018 г. развиваются в нескольких направлениях. В частности, по одному из направлений, связанному с методами численного решения интегральных уравнений Вольтерра I рода, построением моделей на основе полиномов Вольтерра и их применением в энергетике, С. В. Солодушей была защищена докторская диссертация (2019 г.) и В. А. Спириевым — кандидатская диссертация (2023 г.).

К настоящему времени разработан и реализован двухэтапный подход к численному моделированию процесса автоматического регулирования нелинейной динамики объектов тепло- и электроэнергетики на базе полиномов Вольтерра с векторным входом. Первый этап заключается в построении полиномов Вольтерра во временной области на основе откликов объекта на тестовые входные сигналы в виде функций Хевисайда с отклоняющимися аргументами. На втором этапе построенная интегральная модель используется для восстановления входного сигнала, обеспечивающего заданный отклик.

Составляющими данного подхода являются:

- оригинальная методика декомпозиции отклика, основанная на априорном учете необходимых условий разрешимости многомерных уравнений Вольтерра I рода в соответствующих классах функций;
- новый способ идентификации полиномов Вольтерра для векторного входного сигнала, основанный на восстановлении интегралов от ядер и обобщении численного метода Product Integration (интегрирование произведения) на многомерный случай;
- исследование новых классов полиномиальных интегральных уравнений Вольтерра I рода второй и третьей степени и их систем;
- разработка и реализация численных алгоритмов решения введенных интегральных уравнений и систем в задаче восстановления входного сигнала, апробация применительно к объектам тепло- и электроэнергетики.

Практическая ценность данного исследования состоит в приведении разработанных методов построения интегральных моделей на базе уравнений Вольтерра I рода к уровню вычислительных технологий. С привлечением имитационных моделей радиационного теплообменника и ветроэнергетической установки с горизонтальной осью вращения реализовано построение и тестирование динамических моделей в виде квадратичных и кубичных полиномов Вольтерра в случае векторных входных сигналов. Выполнено тестирование универсальных модулей разработанного программного комплекса для описания динамики элемента установки ВТК ИСЭМ СО РАН и участка энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт. Приведенные результаты представлены в докторской диссертации С. В. Солодуши.

### 3. Обмен опытом: сохраняя традиции

Под руководством А. С. Апарцина была организована секция «Обратные и некорректные задачи прикладной математики» Байкальской международной школы-семинара «Методы оптимизации и их приложения». Некорректные задачи подробно рассматривались на школе с момента ее создания. Первым в этом направлении был доклад А. Б. Баку-

шинского в 1969 г. А уже в 1986 г. была создана полновесная секция, на которой состоялись яркие доклады А. Б. Бакушинского, В. В. Васина, А. С. Антипина, Е. С. Левитина. Эта тематика подробно освещалась и в дальнейшем. За всю историю научной школы-семинара в ней, помимо указанных выше, принимали участие известные специалисты по проблемам регуляризации неустойчивых задач и численных методов В. А. Морозов, В. К. Горбунов, А. Л. Агеев, Ю. Е. Воскобойников, А. А. Асанов, А. И. Гребенников, Z. Jackiewicz, В. С. Сизиков и др. В 2008 г. секция расширила свою тематику за счет докладов М. В. Булатова и В. Ф. Чистякова по численным методам решения интегро-алгебраических уравнений и дифференциально-алгебраических уравнений с особенностями. На протяжении многих лет обмен научным опытом способствовал плодотворному сотрудничеству и воспитанию талантливой молодежи.

В 2022 г. к 80-летию со дня рождения А. С. Апарцина была возобновлена работа секции в виде самостоятельного семинара с названием «Неустойчивые задачи вычислительной математики». В текущем году состоялось второе заседание семинара с международным участием. География семинара охватила научные институты и вузы из семи городов: Бишкек, Москва, Санкт-Петербург, Ульяновск, Екатеринбург, Новосибирск, Иркутск. Было представлено 12 пленарных и 11 секционных докладов в очном и дистанционном формате. Из иностранных участников присутствовали А. А. Асанов, З. А. Каденова, А. З. Пирматов.

С научной лекцией для молодежи на тему «Как решать некорректные задачи» выступил А. Г. Ягола. Живой интерес вызвал доклад С. И. Кабанихина о регуляризации нелинейных операторных уравнений Вольтерра. А. Л. Агеев и Т. В. Антонова сделали обзорный доклад по результатам исследования методов локализации естественных границ на изображении. Доклад В. В. Васина был посвящен устойчивым итерационным процессам в задаче условной квадратичной и выпуклой минимизации. Спектральным задачам и их приложениям были посвящены доклады В. С. Сизикова и А. Л. Баландина. А. М. Денисов ознакомил участников семинара с приближенным решением обратных задач для сингулярно возмущенных уравнений в частных производных. С докладами по теории интегральных уравнений и их системам выступили З. А. Каденова, М. В. Булатов, В. Ф. Чистяков, С. В. Солодуша. Специальное внимание было уделено методам построения математических моделей. В области экономики прозвучал интересный доклад В. К. Горбунова.

А. С. Апарцин заложил крепкую основу для научной работы в созданной им лаборатории неустойчивых задач вычислительной математики ИСЭМ СО РАН, поэтому память о нем сохраняется в работах его учеников и коллег.

## Список источников

1. Апарцин А. С. К теории полилинейных уравнений Вольтерра I рода // Оптимизация, управление, интеллект. 2005. № 1(9). С. 5–27.
2. Апарцин А. С. Неклассические уравнения Вольтерра I рода: теория и численные методы. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1999. 193 с.
3. Апарцин А. С. Новый алгоритм моделирования нелинейных динамических систем на базе полиномов Вольтерра // Оптимизация, управление, интеллект. 2000. № 5. С. 26–32.
4. Апарцин А. С. О новых классах линейных многомерных уравнений I рода типа Вольтерра // Известия высших учебных заведений. Математика. 1995. № 11. С. 28–41.
5. Апарцин А. С. О полилинейных уравнениях Вольтерра I рода // Автоматика и телемеханика. 2004. № 2. С. 118–125.
6. Апарцин А. С. О применении различных квадратурных формул для приближенного решения интегральных уравнений Вольтерра I рода методом квадратурных сумм // Дифференциальные и интегральные уравнения. Вып. 2. Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 1973. С. 107–116.
7. Апарцин А. С. О сходимости численных методов решения билинейного уравнения Вольтерра I рода // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2007. Т. 47, № 8. С. 1378–1386.
8. Апарцин А. С. Об интегральных уравнениях Вольтерра I рода в теории развивающихся систем // Численные методы оптимизации и анализа. Новосибирск : Наука, 1992. С. 58–67.
9. Апарцин А. С. Полилинейные интегральные уравнения Вольтерра I рода: элементы теории и численные методы // Известия Иркутского государственного университета. Серия Математика. 2007. Т. 1, № 1. С. 13–41.
10. Апарцин А. С. Полиномиальные интегральные уравнения Вольтерра I рода и функция Ламберта // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2012. Т. 18, № 1. С. 69–81.
11. Апарцин А. С., Бакушинский А. Б. Приближенное решение интегральных уравнений Вольтерра I рода методом квадратурных сумм // Дифференциальные и интегральные уравнения. Вып. 1. Иркутск : Иркут. гос. ун-т, 1972. С. 248–258.
12. Применение интегральных уравнений Вольтерра для моделирования стратегий технического перевооружения электроэнергетики / А. С. Апарцин, И. В. Караулова, Е. В. Маркова, В. В. Труфанов // Электричество. 2005. № 10. С. 69–75.
13. Апарцин А. С., Маркова Е. В., Сидлер И. В. Влияние экономических показателей на решение задачи оптимизации возрастной структуры оборудования электростанций // Известия Иркутского государственного университета. Серия Математика. 2018. Т. 25. С. 19–32. <https://doi.org/10.26516/1997-7670.2018.25.19>
14. Апарцин А. С., Маркова Е. В., Сидлер И. В. Интегральная модель развивающейся системы с отсутствующей предысторией // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2018. Т. 23, № 123. С. 361–367. <https://doi.org/10.20310/1810-0198-2018-23-123-361-367>
15. Апарцин А. С., Маркова Е. В., Труфанов В. В. Анализ оптимальных стратегий технического перевооружения электроэнергетических систем // Труды XII Байкальской международной школы-семинара «Методы оптимизации и их приложения». Т. 4. Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2001. С. 25–30.

16. Апарцин А. С., Маркова Е. В., Труфанов В. В. Интегральные модели развития электроэнергетических систем. Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2002. 36 с.
17. Апарцин А. С., Маркова Е. В., Труфанов В. В. К определению оптимальных стратегий долгосрочного развития электроэнергетических систем на базе интегральных моделей В. М. Глушкова // Труды II Международной конференции «Средства математического моделирования». СПб. : СПбГТУ, 1999. С. 118–123.
18. Апарцин А. С., Сидлер И. В. Исследование тестовых уравнений Вольтерра I рода в интегральных моделях развивающихся систем // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2018. Т. 24, № 2. С. 24–33. <https://doi.org/10.21538/0134-4889-2018-24-2-24-33>
19. Апарцин А. С., Сидлер И. В. О тестовых уравнениях Вольтерра I рода в интегральных моделях развивающихся систем // Автоматика и телемеханика. 2018. № 4. С. 31–45.
20. Апарцин А. С., Сидлер И. В. Тестовое уравнение Вольтерра I рода в интегральных моделях развивающихся систем, содержащих  $n$  возрастных групп // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2018. Т. 23, № 122. С. 168–179. <https://doi.org/10.20310/1810-0198-2018-23-122-168-179>
21. Апарцин А. С., Солодуша С. В., Таиров Э. А. Математические модели нелинейной динамики на базе рядов Вольтерра и их приложения // Известия РАЕН. Математика. Математическое моделирование. Информатика и управление. 1997. Т. 1, № 2. С. 115–125.
22. Таиров Э. А., Апарцин А. С. Построение интегральных динамических моделей теплообменников и их исследование на высокотемпературном контуре // Известия РАН. Энергетика. 1996. № 3. С. 85–98.
23. Apartsyn A. S. Mathematical modeling the dynamic systems and objects with the help of the Volterra integral series // EPRI-SEI Joint seminar of methods for solving the problems on energy power systems development and control. Beijing, China, 1991. P. 117–132.
24. Apartsyn A. S. Some ill-posed problems and their applications in energy research // Sov. Tech. Rev. A. Energy. Harwood Academic Publishers GmbH, USA, 1992. Vol. 6, Part 1. P. 65–125.
25. Apartsyn A. S., Solodusha S. V. Mathematical Simulation of Nonlinear Dynamic Systems by Volterra Series // Engineering Simulation. 2000. Vol. 17. P. 143–153.

## References

1. Apartsyn A.S. On the theory of multilinear Volterra equations of the first kind. *Optimizatsiya, upravlenie, intellekt*, 2005, no. 1(9), pp. 5–27. (in Russian)
2. Apartsyn A.S. *Nonclassical Linear Volterra Equations of the First Kind*. VSP, Utrecht-Boston, 2003, 168 p.
3. Apartsyn A.S. New Algorithm for Modeling Nonlinear Dynamic Systems Based on Volterra Polynomials. *Optimizatsiya, upravlenie, intellekt*, 2000, vol. 5, pp. 26–32. (in Russian)
4. Apartsyn A.S. On new classes of linear multidimensional equations of the first kind of Volterra type. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Matematika*, 1995, vol. 11, pp. 28–41. (in Russian)

5. Apartsyn A.S. Multilinear Volterra equations of the first kind. *Automation and Remote Control*, 2004, vol. 65, no. 2, pp. 263–269. <https://doi.org/10.1023/B:AURC.0000014723.06564.f4>
6. Apartsin A.S. On the application of various quadrature formulas for the approximate solution of Volterra integral equations of the first kind by the method of quadrature sums *Differentsial'nye i integral'nye uravneniya*, vol. 2, Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 1973, pp. 107–116. (in Russian)
7. Apartsin A.S. On the convergence of numerical methods for solving a Volterra bilinear equations of the first kind. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2007, vol. 47, no. 8, pp. 1323–1331. <https://doi.org/10.1134/S0965542507080106>
8. Apartsyn A.S. On Volterra integral equations of the first kind in the theory of developing systems. *Chislennye metody optimizatsii i analiza*, Novosibirsk, Nauka Publ., 1992, pp. 358–67. (in Russian)
9. Apartsyn A.S. Polilinear integral Volterra equations of the first kind: the elements of the theory and numeric methods. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Mathematics*, 2007, no. 1, pp. 13–41. (in Russian)
10. Apartsin A.S. Polynomial Volterra integral equations of the first kind and the Lambert function. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*, 2013, vol. 280, no. S1, pp. 26–38. <https://doi.org/10.1134/S008154381302003X>
11. Apartsin A.S., Bakushinsky A.B. Approximate solution of Volterra integral equations of the first kind by the method of quadrature sums. *Differentsial'nye i integral'nye uravneniya*, vol. 1, Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 1972, pp. 248–258. (in Russian)
12. Apartsyn A.S., Karaulova I.V., Markova E.V., Trufanov V.V. Application of Volterra integral equations for modeling strategies of technical upgrading electricity. *Elektrichestvo*, 2005, vol. 10, pp. 69–75. (in Russian)
13. Apartsyn A.S., Markova E.V., Sidler I.V. Influence of Economic Indices on the Solution to the Optimization Problem of the Age Structure of Power Plants Equipment. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Mathematics*, 2018, vol. 25, pp. 19–32. <https://doi.org/10.26516/1997-7670.2018.25.19> (in Russian)
14. Apartsyn A.S., Markova E.V., Sidler I.V. Integral model of developing system without prehistory. *Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2018, vol. 23, no. 123, pp. 361–367. <https://doi.org/10.20310/1810-0198-2018-23-123-361-367> (in Russian)
15. Apartsyn A.S., Markova E.V., Trufanov V.V. Analysis of optimal strategies of technical re-equipment of electric energy systems. *Proceedings of XII Baikal International School-Seminar "Optimization Methods and their Applications"*, vol. 4, Irkutsk, ESI SB RAS Publ., 2001, pp. 25–30. (in Russian)
16. Apartsyn A.S., Markova E.V., Trufanov V.V. *Integral'nye modeli razvitiya elektroenergeticheskikh sistem* [Integral models of electric power systems development]. Irkutsk, ESI SB RAS Publ., 2002, 36 p. (in Russian)
17. Apartsyn A.S., Markova E.V., Trufanov V.V. On the finding optimal strategies for long-term development of electric power systems based on integral models by V. M. Glushkov. *Proceedings of the II International Conf. "Mathematical Modeling Tools"*, St. Petersburg, SPbSTU Publ., 1999, pp. 118–123. (in Russian)
18. Apartsyn A.S., Sidler I.V. Study of test Volterra equations of the first kind in integral models of developing systems. *Trudy Instituta matematiki i mekhaniki UrO RAN*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 24–33. <https://doi.org/10.21538/0134-4889-2018-24-2-24-33> (in Russian)

19. Apartsin A.S., Sidler I.V. On the Test Volterra Equations of the First Kind in the Integral Models of Developing Systems. *Automation and Remote Control*, 2018, vol. 79, no. 4, pp. 604–616. <https://doi.org/10.1134/S0005117918040033>
20. Apartsyn A.S., Sidler I.V. The test Volterra equation of the first kind in integral models of developing systems containing  $n$  age groups. *Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2018, vol. 23, no. 122, pp. 168–179. <https://doi.org/10.20310/1810-0198-2018-23-122-168-179> (in Russian)
21. Apartsyn A.S., Solodusha S.V., Tairov E.A. Mathematical models of nonlinear dynamics based on Volterra series and their applications. *Izvestiya RAEN. Matematika. Matematicheskoe modelirovanie. Informatika i upravlenie*, 1997, vol. 1, no. 2, pp. 115–125. (in Russian)
22. Tairov E.A., Apartsyn A.S. Construction of integral dynamic models of heat exchangers and their study on a high-temperature circuit. *Izvestiya RAN. Energetika*, 1996, no. 3, pp. 85–98. (in Russian)
23. Apartsyn A.S. Mathematical modeling the dynamic systems and objects with the help of the Volterra integral series. *EPRI-SEI Joint seminar of methods for solving the problems on energy power systems development and control*, Beijing, China, 1991, pp. 117–132.
24. Apartsyn A.S. Some ill-posed problems and their applications in energy research. *Sov. Tech. Rev. A. Energy*, vol. 6, part 1, Harwood Academic Publishers GmbH, USA, 1992, pp. 65–125.
25. Apartsin A.S., Solodusha S.V. Mathematical Simulation of Nonlinear Dynamic Systems by Volterra Series. *Engineering Simulation*, 2000, vol. 17, pp. 143–153.

### Об авторах

**Солодуша Светлана**

**Витальевна**, д-р техн. наук, доц.,  
Институт систем энергетики им. Л.  
А. Мелентьева СО РАН, Иркутск,  
664033, Российская Федерация,  
solodusha@isem.irk.ru,  
<https://orcid.org/0000-0001-6162-7542>

### About the authors

**Svetlana V. Solodusha**, Dr. Sc.

(Eng.), Assoc. Prof., Melentiev Energy  
Systems Institute SB RAS, Irkutsk,  
664033, Russian Federation,  
solodusha@isem.irk.ru,  
<https://orcid.org/0000-0001-6162-7542>

*Поступила в редакцию / Received 12.08.2024*

*Поступила после рецензирования / Revised 19.08.2024*

*Принята к публикации / Accepted 26.08.2024*