

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ КИБЕРНЕТИКИ

А. В. КАЛЯЕВ

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ
ЦИФРОВЫХ
ИНТЕГРАТОРОВ

КИЕВ



1964

В книге изложены вопросы теории цифровых интеграторов, являющихся основными узлами цифровых интегрирующих машин. Рассмотрены общие методы анализа процесса численного интегрирования в цифровых интеграторах. Полученные результаты положены в основу синтеза алгоритмов цифровых интегрирующих, дифференцирующих, множительных, делительных и суммирующих блоков, оперирующих с потоками приращений. Исследованы погрешности цифровых интегрирующих устройств. Изложены принципы построения функциональных схем цифровых интеграторов.

Книга может быть использована научными работниками и инженерами, занимающимися вопросами теории, конструирования и применения цифровых аналоговых вычислительных машин, а также аспирантами и студентами, специализирующимися в области вычислительной техники.

Ответственный редактор
член-корреспондент АН УССР Г. Е. ПУХОВ

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю. А. Теоретические основы работы цифрового дифференциального анализатора, Изд. НИИ МАП СССР, М., 1957.
2. Воронов А. А. и др. Цифровые аналоги для систем автоматического управления, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1960.
3. Воронов А. А. Цифровые разностные анализаторы для программирования движения по параболическим кривым. Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, № 5, 1959.
4. Воронов А. А. О применении цифровых аналогов для программирования кривых второго порядка в двухкоординатных системах автоматического управления. Сб. работ Инст. электромеханики по вопросам электромеханики, в. 3, Изд-во АН СССР, 1960.
5. Воронов А. А., Ермилов Б. Л., Соколов Г. Н. Некоторые вопросы синтеза и анализа цифровых аналогов для систем автоматического управления. Труды первого международного конгресса ИФАК, т. III, Изд-во АН СССР, 1960.
6. Воронов А. А., Соколов Г. Н. Устройство для программирования кривых второго порядка, основанное на цифровых интеграторах. «Автоматика и телемеханика», № 2, 1959.
7. Под ред. Гольденберга Л. М., Цифровой дифференциальный анализатор. Связьиздат, М.—Л., 1962.
8. Гольденберг Л. М., Окунев Ю. Б. Вопросы программирования задач для цифровых дифференциальных анализаторов, «Автоматика и телемеханика», № 1, 1962.
9. Гураков А. А., Шевелев А. Г. ЦДА последовательного действия с мнемонической схемой для набора задач. Труды КИ ГВФ, в. 1, 1961.
10. Дроздов Е. А. Цифровые аналоги. «Приборостроение», № 5, 1957.
11. Ермилов Б. Л. Цифровые аналоги. Сб. работ Инст. электромеханики по вопросам электромеханики, в. 4, Изд-во АН СССР, 1960.
12. Жидков Е. П. Математические основы цифрового дифференциального анализатора. Сб. «Автоматическое управление и вычислительная техника», в. I, Машгиз, М., 1960.
13. Каляев А. В., Пьявченко О. Н. Электронный цифровой дифференциальный анализатор, Изд. ГОСИНТИ, М., 1963.
14. Каляев А. В. О путях повышения быстродействия и о расширении логических возможностей ЦДА. Сб. «Комбинированные вычислительные машины», Изд-во АН СССР, 1962.
15. Каляев А. В. Цифровые интеграторы. Сб. «Математическое моделирование и электрические цепи», Изд-во АН УССР, Киев, 1963.
16. Кожарский Л. А. Об одном способе построения цифровых дифференциальных анализаторов. Сб. «Вопросы теории математических машин», в. I, М., 1958.
17. Каляев А. В., Обросов И. И., Беседин В. И. Выходное печат-

- тающее устройство для цифрового дифференциального анализатора. «Электромеханика», № 1, 1963.
18. Майоров Ф. В. Электронные цифровые интегрирующие машины. Машгиз, М., 1962.
 19. Майоров Ф. В. Цифровые интегрирующие машины. Сб. «Автоматическое управление и вычислительная техника», Машгиз, М., в. I, 1958.
 20. Майоров Ф. В. Применение цифровых интегрирующих машин для управления реальными объектами. Труды конференции «Пути развития советского математического машиностроения», Изд-во АН СССР, М., 1956.
 21. Майоров Ф. В., Применение цифровых интегрирующих машин для автоматизации производственных процессов. Сб. «Применение вычислительной техники для автоматизации производства», Машгиз, М., 1961.
 22. Мисайловский С. В. О скоростной ошибке интегратора ЦДА. Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, № 1, 1960.
 23. Мисайловский С. В. О возможности коррекции методической ошибки цифрового дифференциального анализатора. Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, № 6, 1959.
 24. Меньшиков Г. Г. Вычисление функциональных полиномов на цифровых моделях. Сб. «Труды учебных институтов связи», в. 6, Л., 1961.
 25. Неслуховский К. С. Цифровые интегрирующие машины. Изд. ИТМ и ВТ АН СССР, М., 1961.
 26. Строганов Р. П. Некоторые вопросы построения цифровых дифференциальных анализаторов. Научно-технический информационный бюллетень, № 12, Изд. Ленинградского политехнического института, Л., 1960.
 27. Строганов Р. П. Ферритовое запоминающее устройство для цифровых дифференциальных анализаторов. Научно-технический информационный бюллетень № 3, Изд. Ленинградского политехнического института, Л., 1961.
 28. Шилейко А. В. Цифровые модели. Обзор. «Автоматика и телемеханика», № 12, 1959.
 29. Шилейко А. В. Методика выбора оптимальной структуры цифровой модели. «Автоматика и телемеханика», № 1, 1961.
 30. Цифровые дифференциальные анализаторы. Сборник переводов А. В. Шилейко под ред. Б. Я. Когана, ИЛ, 1959.
 31. Сб. «Комбинированные вычислительные машины», Изд-во АН СССР, М., 1962.
 32. Allen M. W., A decimal addition-subtraction unit. Proceeding of the Institution of Electrical Engineers. Pt. B. No. 1, p. 138, 1956.
 33. Allen M. W., ADA—a transistor decimal digital differential analyzer. The Journal of the Institution of Engineers Australia, vol. 29, No. 10—11, p. 255—262, 1957.
 34. Braun E. L., Digital computers in Continious Control System I. R. E. Transaction on Electronic Computer, EC-7, No. 2, 1958.
 35. Braun E. L. and Posto O., Systems Consideration for Computers in Process Control IRE. Convention Record 1958, part 4.
 36. Braun E. L., A comparison of integral and incremental digital computer for process control applications, Control Engineering, vol. 7, p. 115—118, No. 1, 1960.
 37. Donan J. E., The serial-memory differential analyzer, Math. Tables and other Aids to Comp., No. 38, p. 102—112, April 1952.
 38. Forbes G. F., The digital differential analyzer, Comput. and Autom., No. 1, p. 8—9, 1955.
 39. Klein M. L., and oth., Digital differential analyzers, Instr. and Autom., 30, No. 6, p. 1105—1109, June 1957.
 40. Mendelson M. J., The decimal digital differential analyzer, Aeronaut. Eng. Rew., 13, No. 2, p. 42—54, February 1954.
 41. Mita S., Chiba K., Tedda, J. Inst. Electr. Communication Eng., Japan, 40, No. 6, 1957.
 42. Owen P. L., The use of direct logic in the design of an arithmetic unit, Electron. Engng, 34, No. 414, p. 540—545, 1962.

43. Owen P. L., The main store of digital differential analyzer, *Electron. Engng*, 33, No. 402, p. 514—520, 547, 554, 1961.
44. Palevsky M., An approach to digital simulation, *Proc. Nat. Simul. Conf.*, January 1956, 18.1—18.4.
45. Palevsky M., The design of the Bendix digital differential analyzer, *Proc. of IRE.*, 41, No. 10, p. 1352—1356, October 1953.
46. Shackell S. M., Tryon J. G., The relative merits of incremental and conventional digital computers in airborne real-time control, *Commun. and Electron.*, No. 50, p. 393—400, 1960.
47. Sprague R. E., Fundamental concepts of the digital differential analyzer; method of computation, *Math. Tables and other Aids to Comp.*, 6, No. 37, p. 41—49, 1952.
48. Shannon C. E., Mathematical theory of the differential analyzer, *J. Math. and Phys.*, 20, No. 4, 1941.
49. Selfridge R. G., Coding a general purpose digital computer to operate as a differential analyzer, *Proc. Western Joint Computer Conf.*, p. 82—84, 1955.
50. Tostanoski B. M. and oth., The simulation of a digital differential analyzer on the IBM type 701 EDPM, *Proc. Nat. Simul. Conf.*, January 1956, 19.1—19.8.
51. Weiss E., Applications of CRC-105 decimal digital differential analyzer, *Trans. IRE*, December 1952, PGEC-1.
52. Walz R. F., Digital computers-general-purpose and DDA, *Instr. and Autom.*, No. 9, p. 1516—1522, September 1955.
53. Walker D. F., The digital differential analyzer-2, *Control*, 2, No. 14, p. 95, 1955.
54. The Corsair computer. *Process Control and Aut.*, vol. 7, No. 6. 308. 1960.
55. *Convention Record Electronic Computer (TRICE)*, 1958.
56. *Computing machines (Maddida)*, *Mech, Eng.*, 73, No. 4, 325, April 1951.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Цифровые аналоговые вычислительные машины	5
§ 1. Основные классы вычислительных машин	5
§ 2. Электронные цифровые интегрирующие машины	7
§ 3. Области применения и перспективы развития цифровых интегрирующих машин	8
§ 4. Принципы построения и типы цифровых аналоговых вычислительных машин	13
§ 5. О повышении скорости работы и о расширении логических возможностей цифровых интегрирующих машин	20
§ 6. Узлы цифровых интегрирующих машин и особенности их построения	23
§ 7. Процесс численного интегрирования в цифровых интегрирующих машинах и методы его реализации	25
§ 8. Цифровые интеграторы, как основные элементы цифровых аналоговых вычислительных машин	34
§ 9. Основные задачи анализа и синтеза цифровых интеграторов	38
Глава II. Численные методы интегрирования в цифровых интеграторах	40
§ 1. Проблема численного интегрирования в цифровых интеграторах в целом	40
§ 2. Метод прямоугольников	41
§ 3. Метод трапеций	45
§ 4. Метод парабол	47
§ 5. Сравнение формул прямоугольников, трапеций и парабол	51
§ 6. Квантование независимой переменной, интегрируемой функции и интеграла	53
§ 7. Особенности интегрирования квантованных функций и образование квантов интеграла	58
§ 8. Общие принципы анализа процесса численного интегрирования в цифровых интеграторах	65
§ 9. Формулы для вычисления приращения интеграла	76
§ 10. Анализ процесса численного интегрирования в цифровых интеграторах, работающих с большими приращениями	78
§ 11. Анализ процесса численного интегрирования в цифровых интеграторах, работающих с малыми приращениями	85
Глава III. Квантование величин в цифровых интеграторах и дельта-преобразование непрерывных функций	95
§ 1. Общие замечания	95
§ 2. Элементарные дискретные функции	96

§ 3.	Функция расчленения и ее основные свойства	100
§ 4.	Системы квантования непрерывных функций	105
§ 5.	О восстановлении квантуемой функции по точкам квантования	108
§ 6.	Понятие о квантованных функциях	109
§ 7.	Функциональная связь между квантуемыми и квантованными функциями	116
§ 8.	Алгоритмы точек квантования	119
§ 9.	Преобразование квантованных функций в потоки приращений (дельта-преобразование)	124
§ 10.	Алгоритмы преобразования непрерывных функций в потоки приращений	128
§ 11.	Полоса неопределенности при задании непрерывной функции потоком приращений в случае полного квантования	136
Глава IV. Алгоритмы цифровых интеграторов		139
§ 1.	Алгоритмы цифровых интеграторов при интегрировании по Риману	139
§ 2.	Оптимальный алгоритм цифрового интегратора при интегрировании по Стильтесу в случае больших приращений	150
§ 3.	Оптимальный алгоритм цифрового интегратора при интегрировании по Стильтесу в случае малых приращений	156
§ 4.	Обобщенный оптимальный алгоритм цифрового интегратора	170
§ 5.	Алгоритм инкрементного цифрового интегратора	171
Глава V. Последовательные и параллельные цифровые интеграторы		174
§ 1.	Последовательные цифровые интеграторы, основанные на формуле прямоугольников	174
§ 2.	Последовательные цифровые интеграторы, построенные на основе формулы трапеций	178
§ 3.	Последовательные цифровые интеграторы, построенные на основе формулы четных ординат	183
§ 4.	Последовательные цифровые интеграторы, работающие с большими приращениями	188
§ 5.	Параллельные цифровые интеграторы, основанные на формуле прямоугольников	191
§ 6.	Параллельные цифровые интеграторы, основанные на формуле трапеций	194
§ 7.	Параллельные цифровые интеграторы, основанные на формуле средних ординат	196
Глава VI. Кодирование чисел и приращений в цифровых интеграторах		199
§ 1.	Бинарная и тернарная системы приращений	199
§ 2.	Система переменных приращений в цифровых интеграторах	202
§ 3.	Кодирование чисел и приращений в случае бинарной системы	203
§ 4.	Кодирование чисел и приращений в случае тернарной системы	215
§ 5.	О цикличности кодов цифровых интеграторов	223
Глава VII. Математические операции с потоками приращений		227
§ 1.	Система математических операций с потоками приращений	227
§ 2.	Алгоритмы интегрирования потоков приращений	229
§ 3.	Алгоритмы суммирования потоков приращений	232
§ 4.	Алгоритмы дифференцирования потоков приращений	240
§ 5.	Алгоритмы умножения потоков приращений	244
§ 6.	Алгоритмы деления потоков приращений	245
§ 7.	Понятие о скорости потока приращений	247
Глава VIII. Функциональные схемы цифровых интеграторов		250
§ 1.	Последовательный цифровой интегратор на основе формулы прямоугольников	250
§ 2.	Последовательный цифровой интегратор на одном сумматоре	254

§ 3. Параллельный цифровой интегратор	258
§ 4. Суммирующие блоки	261
§ 5. Множительные блоки	264
§ 6. Индикаторы равенства потоков приращений	265
<i>Глава IX. Погрешности цифровых интеграторов</i>	<i>268</i>
§ 1. Погрешности метода интегрирования	268
§ 2. Погрешности квантования и округления	271
§ 3. Оценка полной погрешности цифрового интегратора	273
§ 4. О соотношениях между погрешностями и о выборе величины квантов	276
§ 5. Погрешность кодирования приращений	277
§ 6. Погрешности квантования и динамические погрешности в сумматорах потоков приращений	280
Приложение I	282
Литература	289

Каляев Анатолий Васильевич
Введение в теорию цифровых интеграторов

*Печатается по постановлению ученого совета
 Института кибернетики АН УССР*

Редакторы *Н. М. Лабинова, Т. С. Мельник*

Художественный редактор *В. П. Кузь*

Оформление художника *В. А. Лисецкого*

Технический редактор *А. А. Матаевичук*

Корректор *В. А. Литовкина*

БФ 05184. Зак. № 2256. Изд. № 14. Тираж 3300. Формат бумаги 60×92¹/₁₆. Печ. физ. листов 18,25+2 вкл. Условн. печ. листов 19,129. Учетно-изд. листов 17,6. Подписано к печати 21/II 1964 г. Цена 1 руб. 8 коп.