

10. Общий подход к построению квадратурных  
формул. Квадратурные формулы  
Ньютона-Котеса, Чебышёва, Гаусса

Андрей Бареков      Ярослав Пылаев  
По лекциям Устинова С.М.

June 26, 2020

# 1 Общий подход

Все ранее полученные (не составные) квадратурные формулы имели следующий вид:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{k=1}^S A_k f(x_k) \quad (1)$$

$$\underbrace{A_k(\text{веса}) \rightarrow S, \quad x_k(\text{узлы}) \rightarrow S}_{2S}$$

Выдвигается идея, выбрать  $A_k$  и  $x_k$  так, чтобы формула (1) была точна для полиномов заданной степени.

Если  $f(x)$  хорошо описывается полиномом этой степени, то и ответ будет хороший. В противном случае, применяем составные формулы.

Потребуем, чтобы формула (1) была точна для полинома  $N$  степени.

1.  $f(x) = \alpha - const$ ,
2.  $f(x) = x$ ,
3.  $f(x) = x^2$ ,
- ...
- $N + 1$ .  $f(x) = x^N$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^S A_k &= b - a \\ \sum_{k=1}^S A_k x_k &= \frac{b^2 - a^2}{2} \\ \sum_{k=1}^S A_k x_k^2 &= \frac{b^3 - a^3}{3} \\ &\dots\dots\dots \\ \sum_{k=1}^S A_k x_k^N &= \frac{b^{N+1} - a^{N+1}}{N + 1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Различные семейства квадратурных формул отличаются друг от друга выбором  $\underbrace{x_k}_{\text{узлов}}$  и  $\underbrace{A_k}_{\text{весов}}$ , на которые накладываются дополнительные условия.

## 2 Семейство квадратурных формул Ньютона-Котеса

Узлы  $x_k$  - равноотстоящие.

$$h = \frac{b-a}{S-1}, \quad x_k = a + (k-1)h, \quad x_1 = a, \quad x_S = b.$$

Для равноотстоящих узлов при использовании составных квадратурных формул ранее вычисленные  $f(x_k)$  не надо вычислять вновь, что уменьшает объём вычислений примерно в два раза.

Система (2) имеет при этом единственное решение.

Формулы Ньютона-Котеса гарантированно точны для полиномов степени  $S-1$ .

Если решать систему (2) для  $S = 1, 2, 3, \dots$ , то получим квадратурные формулы, которые получали из интерполяционных полиномов.

## 3 Семейство квадратурных формул Чебышёва

Формулы Чебышёва наиболее часто используются, когда  $f(x_k)$  измерены с заметной погрешностью. С этой целью  $A_k$  выбираются одинаково.

Из уравнения 1 системы (2) видим, что  $A = \frac{b-a}{S}$ , тогда:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{S} \sum_{k=1}^S f(x_k)$$

Решение системы (2) должно существовать, быть единственным, и все  $x_k$  должны принадлежать промежутку  $(a, b)$ .

Дальнейшее повышение точности реализуется за счет составных квадратурных формул.

Формулы Чебышёва гарантированно точны для полиномов степени  $S$ , при этом они существуют только для  $S = 1 - 7, 9$ .

## 4 Семейство квадратурных формул Гаусса

*Формулы наивысшей алгебраической степени точности.*

В формулах Гаусса нет никаких дополнительных ограничений, и все  $2S$  параметров направлены на решение системы (2).

Система (2) имеет единственное решение для любого значения  $S$  для формул Гаусса.

Формулы Гаусса гарантированно точны для полиномов степени  $2S - 1$

Значения  $A_k$  и  $x_k$  для всех квадратурных формул заносят в справочники для стандартного промежутка (чаще всего это  $[-1; 1]$  или  $[0; 1]$ ), а для произвольного промежутка  $[a; b]$  выполняют замену переменных:

$$\begin{aligned} x &= \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2}t, \quad t \in [-1; 1] \\ dx &= \frac{b-a}{2}dt \\ \Rightarrow \int_a^b f(x) dx &= \frac{b-a}{2} \int_{-1}^{+1} f\left(\frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2}t\right) dt \\ &\approx \frac{b-a}{2} \sum_{k=1}^S A_k f\left(\frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2}t_k\right) \end{aligned}$$

$A_k$  и  $t_k$  взяты из справочника для стандартного промежутка