Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования «Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра Информатики

Дисциплина «Методы численного анализа»

**ОТЧЕТ**

к лабораторной работе №3

на тему:

**«ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ»**

БГУИР 6-05-0612-02 005

|  |
| --- |
| Выполнила студент группы 353504  АНТОНОВА Лидия Сергеевна |
|  |
| (дата, подпись студента) |
| Проверил доцент каф. Информатики  АНИСИМОВ Владимир Яковлевич |
|  |
| (дата, подпись преподавателя) |

Минск 2024

# 1 ЦЕЛЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

1 Изучить методы численного решения нелинейных уравнений - методов бисекции, хорд, метода Ньютона и его модификаций.

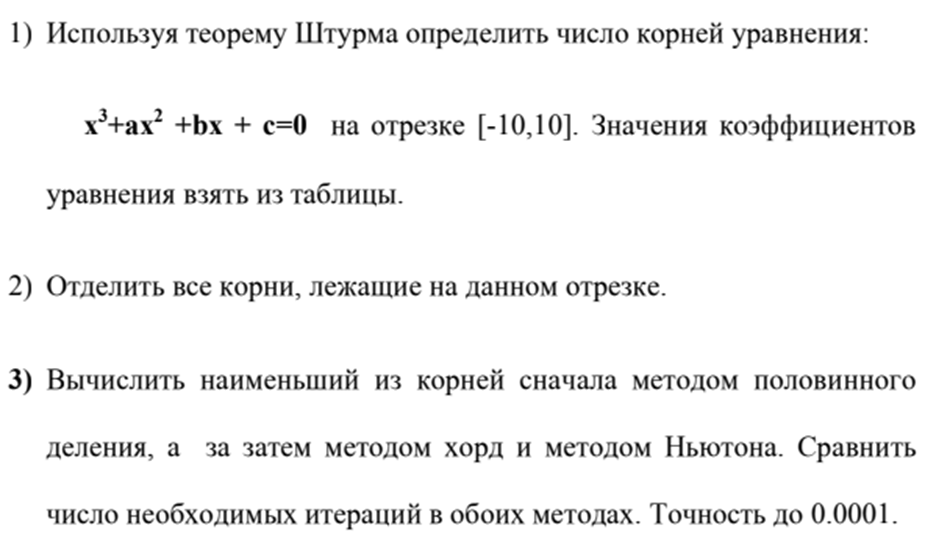
2 Исследовать скорость сходимости итерационных процедур.

3 Проверить правильность работы программы на тестовых примерах.

4 Сравнить число итераций, необходимого для достижения заданной точности вычисления разными методами.  
  
 **2 задание**

Вариант 1.

**Изображение выглядит как текст, снимок экрана, Шрифт, документ

Автоматически созданное описание**

Исходные данные:

a = -14,4621; b = 60,6959; c = -70,9238.

# 3 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Численное решение нелинейного уравнения *f(x)=0* заключается в вычислении с заданной точностью значения всех или некоторых корней уравнения и распадается на несколько задач: *во-первых,* надо исследовать количество и характер корней (вещественные или комплексные, простые или кратные), *во-вторых,* определить их приближенное расположение, т.е. значения начала и конца отрезка, на котором лежит только один корень, *в- третьих,* выбрать интересующие нас корни и вычислить их с требуемой точностью. Вторая задача называется ***отделением корней****.* Решив ее, по сути дела, находят приближенные значения корней с погрешностью, не превосходящей длины отрезка, содержащего корень. Отметим два простых приема отделения действительных корней уравнения - *табличный* и *графический.* Первый прием состоит в вычислении таблицы значений функции *f(x)* в заданных точках *xt* и использовании следующих теорем математического анализа:

1. *Если функция y=f(x) непрерывна на отрезке [а,b] и f(a)f(b)<0, то внутри отрезка [a,b] существует по крайней мере один корень уравнения f(x)=0.*
2. *Если функция y=f(x) непрерывна на отрезке [а,b], f(a)f(b) < 0 и f '(x) на интервале (a,b) сохраняет знак, то внутри отрезка [a,b] существует единственный корень уравнения f(x)=0.*

Таким образом, если при некотором *k* числа *f(xk)* и *f(xk+1)* имеют разные знаки, то это означает, что на интервале *(xk,xk+1)* уравнение имеет по крайней мере один действительный корень нечетной кратности (точнее – нечетное число корней). Выявить по таблице корень четной кратности очень сложно.

Изображение выглядит как линия, диаграмма, График, Шрифт

Автоматически созданное описаниерис.1

На рис.1 представлены три наиболее часто встречающиеся ситуации:

а) кратный корень: *f '(x\*)=0, f(a1)\* f(b1) > 0;*

б) простой корень: *f '(x\*)=0, f(a2)\* f(b2) < 0;*

в) вырожденный корень: *f '(x\*)* не существует, *f(a3)\* f(b3)>0.*

Как видно из рис.1, в первых двух случаях значение корня совпадает с точкой экстремума функции и для нахождения таких корней рекомендуется использовать методы поиска минимума функции.

Для определения числа корней на заданном промежутке используется Теорема Штурма: Если *f(x)* является многочленом и уравнение *f(x)=0* не имеет кратных корней на промежутке [а, b], то число корней этого уравнения, лежащих на таком промежутке, совпадает с числом *N(a) – N(b)*, где функция *N* определяется следующим образом.

Строим ряд Штурма *f0*(*x*), *f1*(*x*)*, f2*(*x*), *…,* *fm*(*x*), где

*f0*(*x*) = *f(x),*

*f1*(*x*) = *f* '*(x),*

*fi*(*x*) = *остаток от деления fi-2*(*x*) *на fi-1(x), взятый с обратным знаком*

Функция *N(x)* определяется как число перемен знака в ряде Штурма, если подставить в функции ряда значение *x*

Для отделения корней можно использовать график функции *y=f(x).* Корнями уравнения являются те значения *х,* при которых график функции пересекает ось абсцисс. Построение графика функции даже с малой точностью обычно дает представление о расположении и характере корней уравнения (иногда позволяет выявить даже корни четной кратности). Если построение графика функции *y=f(x)* вызывает затруднение, следует преобразовать исходное уравнение к виду *φ1(х)=φ2(х)* таким образом, чтобы графики функций *у=φ1(х)* и *у=φ2(х)* были достаточно просты. Абсциссы точек пересечения этих графиков и будут корнями уравнения.

Допустим, что искомый корень уравнения отделен, т.е. найден отрезок *[а, b],* на котором имеется только один корень уравнения. Для вычисления корня с требуемой точностью ε обычно применяют какую-либо итерационную процедуру ***уточнения корня****,* строящую числовую последовательность значений *xn,* сходящуюся к искомому корню уравнения. Начальное приближение *х0* выбирают на отрезке [а, b], продолжают вычисления, пока не выполнится неравенство | *xn-1* – *xn* | < ε, и считают, что *xn* есть корень уравнения, найденный с заданной точностью. Имеется множество различных методов построения таких последовательностей и выбор алгоритма – весьма важный момент при практическом решении задачи. Немалую роль при этом играют такие свойства метода, как простота, надежность, экономичность, важнейшей характеристикой является его *скорость сходимости.* Последовательность *хп,* сходящаяся к пределу *x\**, имеет скорость сходимости порядка α, если при . При α=1 сходимость называется линейной, при 1<α<2 – сверхлинейной, при α=2 – квадратичной. С ростом α алгоритм, как правило, усложняется и условия сходимости становятся более жесткими. Рассмотрим наиболее распространенные итерационные методы уточнения корня.

**Метод простых итераций**. Вначале уравнение *f(x)=0* преобразуется к эквивалентному уравнению вида *х=φ(х).* Это можно сделать многими способами, например, положив *φ(х)=х+♦(x)f(x)*, где *♦(х)* – произвольная непрерывная знакопостоянная функция. Выбираем некоторое начальное приближение *х0* и вычисляем дальнейшие приближения по формуле

*хk= φ(хk-1), k=1,2, ...*

Метод простых итераций не всегда обеспечивает сходимость к корню уравнения. Достаточным условием сходимости этого метода является выполнение неравенства  на отрезке, содержащем корень и все приближения *хп.* Метод имеет линейную скорость сходимости и справедливы следующие оценки:





Метод имеет простую геометрическую интерпретацию: нахождение корня уравнения *f(х)=0* равносильно обнаружению неподвижной точки функции *х= φ(х),* т.е. точки пересечения графиков функций *у= φ(х)* и *у=х.* Если производная *φ'(х)<0,* то последовательные приближения колеблются около корня, если же производная *φ'(х)>0,* то последовательные приближения сходятся к корню монотонно.

Изображение выглядит как диаграмма, Технический чертеж, линия, зарисовка

Автоматически созданное описание

Рис. 2. Метод простых итераций: а - односторонний сходящийся процесс; б - односторонний расходящийся процесс; в - двухсторонний сходящийся процесс; г - двухсторонний расходящийся процесс

Рассмотрим процесс графически (рис. 2). Из графиков видно, что при *φ'(x)<0* и при *φ'(x)>0* возможны как сходящиеся, так и расходящиеся итерационные процессы. Скорость сходимости зависит от абсолютной величины производной *φ(х).* Чем меньше *|φ'(х)|* вблизи корня, тем быстрее сходится процесс.

**Метод хорд**. Пусть дано уравнение *f(x) =* 0, *a* ≤ *x* ≤*b*, где *f(x)* – дважды непрерывно дифференцируемая функция. Пусть выполняется условие *f(a)\*f(b)<*0 и проведено отделение корней, то есть на данном интервале *(a, b)* находится один корень уравнения. При этом, не ограничивая общности, можно считать, что *f(b)>0.*

Пусть функция *f* выпукла на интервале *(a, b)* (см. рис. 3).

Изображение выглядит как линия, зарисовка, диаграмма, рисунок

Автоматически созданное описаниерис.3

Заменим график функции хордой (прямой), проходящей через точки *M0(a, f(a))* и *M1(b, f(b))*. Уравнение прямой, проходящей через две заданные точки, можно записать в виде  В нашем случае получим:

 Найдем точку пересечения  Теперь возьмем интервал *(x1,b)* в качестве исходного и повторим вышеописанную процедуру (см. рис. 3). Получим  Продолжим процесс. Каждое последующее приближение вычисляется по рекуррентной формуле

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, программное обеспечение, Значок на компьютере

Автоматически созданное описание

Если же функция вогнута (см. рис. 4)Изображение выглядит как линия, зарисовка, диаграмма

Автоматически созданное описание

уравнение прямой соединяющей точки *M0(a, f(a))* и *M1(b, f(b))* запишем в виде  Найдем точку пересечения хорды с осью Ox:

 Теперь возьмем интервал *(a, x1)* в качестве исходного и найдем точки пересечения хорды, соединяющей точки *(a, f(a))* и *(x1, f(x1)),* с осью абсцисс (см. рис. 4). Получим  Повторяя данную процедуру, получаем рекуррентную формулу:

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, программное обеспечение, Значок на компьютере

Автоматически созданное описание

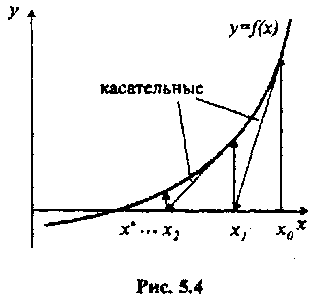
Описанный выше метод построения рекуррентных последовательностей (3.1) и (3.2) называется методом хорд. Для использования метода хорд нужно было бы предварительно найти точки перегиба и выделить участки, на которых функция не меняет характер выпуклости.

Однако на практике поступают проще: в случае  для построения рекуррентной последовательности применяются формулы (3.1), а в случае, когда  применяют формулы (3.2).

**Метод Ньютона** (**касательных**). Для начала вычислений требуется задание одного начального приближения *x0,* последующие приближения вычисляются по формуле



Метод имеет квадратичную скорость сходимости для простого корня, но очень чувствителен к выбору начального приближения. При произвольном начальном приближении итерации сходятся, если всюду , в противном случае сходимость будет только при *x0,* достаточно близком к корню. Существует несколько достаточных условий сходимости. Если производные  и  сохраняют знак в окрестности корня, рекомендуется выбирать *x0* так, чтобы  Если, кроме этого, для отрезка *[a,b],* содержащего корень, выполняются условия  то метод сходится для любых *a ≤ x0 ≤ b.*

рис.5

Метод Ньютона получил также второе название *метод касательных* благодаря геометрической иллюстрации его сходимости, представленной на рис. 5. Метод Ньютона позволяет находить как простые, так и кратные корни. Основной его недостаток – малая область сходимости и необходимость вычисления производной.

# 4 Выполнение работы

При написании задания данной лабораторной работы использовалась система компьютерной алгебры Maple 2021.

Задаем начальное условие.

a := -14.4621;

b := 60.6959;

c := -70.9238;

f := x -> x^3 + a\*x^2 + b\*x + c;

f\_prime := unapply(diff(f(x), x), x);

Реализация через теорему Штурма.

SturmSequence := proc(f)

local f0, f1, f2, seq;

f0 := f(x);

f1 := diff(f0, x);

seq := [f0, f1];

while 0 < degree(f1, x) do

f2 := -rem(f0, f1, x);

break;

if f2 = 0;

seq := [op(seq), f2];

f0 := f1;

f1 := f2;

end do;

return seq;

end proc;

N := proc(seq, a)

local count, i, sign\_a, sign\_next;

count := 0;

sign\_a := sign(eval(seq[1], x = a));

for i from 2 to nops(seq) do

sign\_next := sign(eval(seq[i], x = a));

if sign\_a\*sign\_next < 0 then

count := count + 1;

end if;

sign\_a := sign\_next;

end do;

return count;

end proc;

**Изображение выглядит как текст, Шрифт, снимок экрана, белый

Автоматически созданное описание**

В результате получили, что на данном отрезке от -10 до 10 3 корня.

Метод бисекции.

BisectionMethod := proc(f, a\_init, b\_init, epsilon)

local a, b, mid, fa, fb, fmid, iter;

iter := 0;

a := a\_init;

b := b\_init;

fa := f(a);

fb := f(b);

if 0 < fb\*fa then

error "Функция не меняет знак на интервале [a, b], корень не гарантирован!";

end if;

while epsilon < abs(b - a) do

mid := 1/2\*a + 1/2\*b;

fmid := f(mid);

if fa\*fmid < 0 then

b := mid;

fb := fmid;

else

a := mid;

fa := fmid;

end if;

iter := iter + 1;

end do;

return mid, iter;

end proc

Метод Хорд.

ChordMethod := proc(f, a\_init, b\_init, epsilon)

local a, b, fa, fb, iter, x\_new, f\_new;

iter := 0;

a := a\_init;

b := b\_init;

fa := f(a);

fb := f(b);

if 0 < fa\*fb then

error "Функция не меняет знак на интервале [a, b], корень не гарантирован!";

end if;

while epsilon < abs(b - a) do

x\_new := b - fb\*(b - a)/(fb - fa);

f\_new := f(x\_new);

if abs(f\_new) < epsilon then

return x\_new, iter;

end if;

if fa\*f\_new < 0 then

b := x\_new;

fb := f\_new;

else

a := x\_new;

fa := f\_new;

end if;

iter := iter + 1;

end do;

return x\_new, iter;

end proc

Метод Ньютона.

NewtonMethod := proc(f, f\_prime, x0, tol, max\_iter := 100)

local x\_n, x\_n1, iter, f\_xn, f\_prime\_xn;

x\_n := x0;

iter := 0;

do

f\_xn := f(x\_n);

f\_prime\_xn := f\_prime(x\_n);

if f\_prime\_xn = 0 then

return "Ошибка: производная равна нулю, невозможно продолжить вычисления";

end if;

x\_n1 := x\_n - f\_xn/f\_prime\_xn;

if abs(x\_n1 - x\_n) < tol then

return x\_n1, iter;

end if;

x\_n := x\_n1;

iter := iter + 1;

if max\_iter < iter then

return "Ошибка: метод не сошелся за заданное количество итераций";

end if;

end do;

end proc

# 5 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Используя теорему Штурма определили число корней уравнения:

x3+ax2 +bx + c=0 на отрезке [-10,10].



Метод Бисекции:

Изображение выглядит как текст, Шрифт, линия, снимок экрана

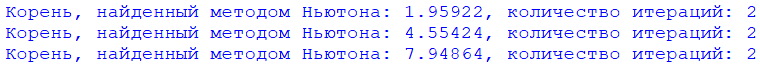
Автоматически созданное описание

Метод Хорд:

Изображение выглядит как текст, Шрифт, Цвет электрик, снимок экрана

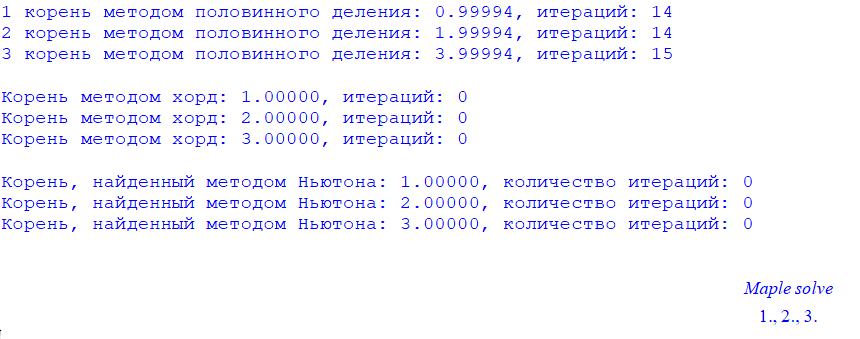
Автоматически созданное описание

Метод Ньютона:



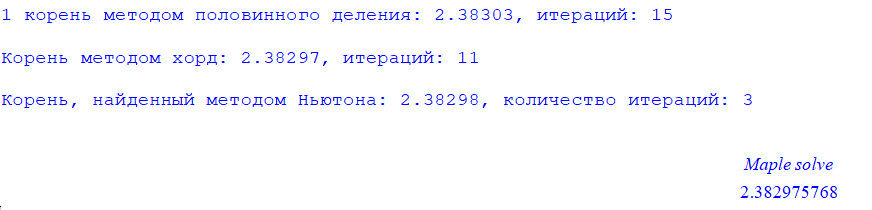
Тестовый пример 1.

a = -6; b = 11; c = -6.

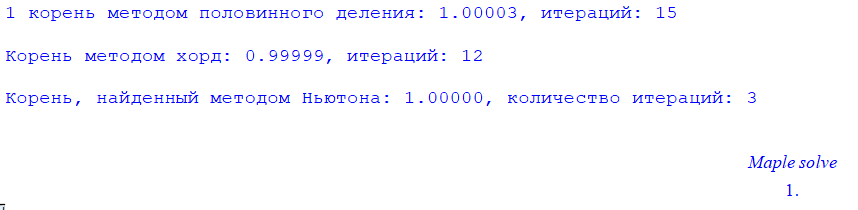


Тестовый пример 2.

a = 0; b = -4; c = -4.

  
  
Тестовый пример 3.

a = -3; b = 8; c = -6.



**Оценка эффективности методов**

**Подсчет среднего числа итераций каждого из методов**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Название метода | Номер теста | | | | Среднее количество итераций |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 |  |
| Метод половинного деления | 15/15/15 | 14/14/15 | 15 | 15 | 15 |
| Метод хорд | 15/3/20 | 0/0/0 | 11 | 12 | 9 |
| Метод Ньютона | 2/2/2 | 0/0/0 | 3 | 3 | 2 |

# Вывод

Таким образом, в ходе выполнения лабораторной работы были изучены методы численного решения нелинейных уравнений (метод хорд, метод Бисекции, метод Ньютона), исследована скорость сходимости итерационных процедур, составлена программа численного решения нелинейных уравнений методами бисекции, хорд, Ньютона, проверена правильность работы программы на тестовых примерах, численно решено нелинейное уравнение заданного варианта, сравнены количества итераций, необходимых для достижения заданной точности вычисления разными методами.

Оптимальным способом численного решения нелинейных уравнений является применение метода Ньютона, так скорость сходимости в этом методе почти всегда квадратичная, однако нельзя забывать об ограничениях, которые присутствуют в методах, преобразовании исходного уравнения (Метод простых итераций) и определении начального приближения (Метод Ньютона), что не нужно для метода половинного деления. В ходе работы были рассмотрены 4 функции, имеющие несколько корней на заданном отрезке (-10, 10), и в ходе решения результат был проверен с помощью графика, что дает понять, что реализованные методы успешно справляются с решением нелинейных уравнений.