МИНОБРНАУКИ РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ» ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)
Кафедра МО ЭВМ

ОТЧЕТ

по лабораторной работе №5

по дисциплине «Построение и анализ алгоритмов»

Тема: Алгоритм Ахо-Корасик

Студент гр. 8303 _____ Колосова М.П.

Преподаватель _____ Фирсов М.А.

Санкт-Петербург

2020

Цель работы

Изучить работу алгоритма Ахо-Корасик для решения задач точного поиска набора образцов и поиска образца с джокером (символом, совпадающим с любым из алфавита).

Задание 1

Разработайте программу, решающую задачу точного поиска набора образцов.

Вход:

Первая строка содержит текст (T, $1 \le |T| \le 100000$)

Вторая - число ($1 \le n \le 3000$), каждая следующая из строк содержит шаблон из набора = $\{p_1, \dots, p_n\}$ $1 \le |p_i| \le 75$

Все строки содержат символы из алфавита {A,C,G,T,N}

Выход:

Все вхождения образцов из P в T.

Каждое вхождение образца в текст представить в виде двух чисел – i p, где i - позиция в тексте (нумерация начинается с 1), с которой начинается вхождение образца с номером p (нумерация образцов начинается с 1).

Строки выхода должны быть отсортированы по возрастанию, сначала номера позиции, затем номера шаблона.

Sample Input:

NTAG

3

TAGT

TAG

T

Sample Output:

2 2

2 3

Задание 2

Используя реализацию точного множественного поиска, решите задачу точного поиска для одного образца с джокером.

В шаблоне встречается специальный символ, именуемый джокером (wild card), который "совпадает" с любым символом. По заданному содержащему шаблоны образцу P необходимо найти все вхождения P в текст T.

Например, образец a??c? с джокером ? встречается дважды в тексте .

Символ джокер не входит в алфавит, символы которого используются в T. Каждый джокер соответствует одному символу, а не подстроке неопределённой длины. В шаблон входит хотя бы один символ не джокер, т.е. шаблоны вида ??? недопустимы.

Все строки содержат символы из алфавита {A,C,G,T,N}

Вход:

Текст (T, $1 \leq |T| \leq 100000$)

Шаблон (P, $1 \leq |P| \leq 40$)

Символ джокера

Выход:

Строки с номерами позиций вхождений шаблона (каждая строка содержит только один номер).

Номера должны выводиться в порядке возрастания.

Sample Input:

ACTANCA

A$$A$

$

Sample Output:

1

Индивидуализация

Вариант 3

Вычислить длину самой длинной цепочки из суффиксных ссылок и самой длинной цепочки из конечных ссылок в автомате.

Бор

Бор (префиксное дерево) — структура данных, позволяющая хранить ассоциативный массив, ключами которого являются строки. Представляет собой корневое дерево, каждое ребро которого помечено каким-то символом так, что для любого узла все рёбра, соединяющие этот узел с его сыновьями, помечены разными символами. Считается, что бор содержит данную строку-ключ тогда и только тогда, когда эту строку можно прочитать на пути из корня до некоторого (единственного для этой строки) терминального узла.

Из такой структуры данных возможно построить автомат путем добавления суффиксных ссылок.

Описание алгоритма №1

В программе реализован алгоритм Ахо-Корасик. По словарю шаблонов строится бор. Затем для каждого символа текста выполняется поиск по автомату. Переход в автомате осуществляется следующим образом. Если возможно,то выполняется переход в потомка, в другом случае - по суффиксной ссылке. После перехода выполняется проверка на то, является ли вершина и всевозможные её суффиксы – терминальными. Если да, то возвращаем все такие найденные номера паттернов. Если символа в автомате не оказалось, то текущая вершина принимает значение корня – вхождение не найдено.

Описание алгоритма задания №2

В качестве словаря шаблонов используются подстроки маски, разделенные символами джокера. Аналогично заданию №1 сначала строится бор из этих подстрок и выполняется поиск по автомату для каждого символа текста. Появления подстроки в тексте на позиции j означает возможное появление маски

на позиции j-l+1, где l – индекс начала подстроки в маске. Далее, с помощью вспомогательного массива для таких позиций увеличиваем его значение на 1. Индексы, по которым хранятся значения равному n (количеству подстрок), являются вхождениями маски в текст.

Описание реализации индивидуализации

Конечная ссылка ведёт на ближайшую по суффиксным ссылкам конечную вершину, поэтому после построения автомата с помощью обхода в ширину от каждой вершины происходит попытка построения конечной ссылки. Если суффиксная цепь ведет от текущей вершине к терминальной, то устанавливается ссылка от текущей к конечной вершине. Далее вычисляется длина каждой возможной цепи суффиксных ссылок и цепи конечных ссылок. В качестве результата выводятся максимальные значения.

Сложность алгоритма

Построение бора выполняется за O(m), где m – суммарная длина паттернов (для джокеров – суммарная длина подстрок, разделенных джокером). Суффиксные ссылки строятся с помощью обхода в ширину, сложность которого - O(V+E). Число число рёбер имеет линейную зависимость от числа вершин. Отсюда - O(2m) = O(m). Бор позволяет за один проход по тексту найти все вхождения, поэтому сложность составляет O(n), где n – длина текста. Значит, сложность по времени составляет O(m + n).

Сложность по памяти для хранения бора — O(m), где m — количество вершин (каждый символ представляет собой вершину бора), также на каждой позиции текста могут встретиться все шаблоны, что в свою очередь приводит к общей сложности по памяти O(n∗k+m), где n — длина текста, k —число шаблонов.

Описание функций и структур данных

Class TreeNode – структура, для хранения данных о корневой вершине бора.

Поля класса:

string dbgStr; - строка, которую можно получить при переходе в текущую вершину по ребрам

char value – Значение ноды, символ, по которому был произведён переход;

TreeNode* parent – ссылка на родительскую вершину;

TreeNode* suffixLink – суффиксная ссылка;

unordered_map <char, TreeNode*> children – асссоциативный неупорядочный контейнер потомков, ключом которого является символ, по которому можно перейти на потомка;

size_t numOfPattern – порядковый номер паттерна

vector<pair<size_t, size_t>> substringEntries – вектор, элементами которого является пара: индекс вхождения в маску и длина подстроки

Методы

TreeNode(char val) – конструктор для заполнения поля значения значением символа, по которому перешли;

TreeNode(char val) — конструктор для создания корневой вершины

void insert(const string &str) – метод для вставки строки в бор;

auto find(const char c) – выполняет поиск, по заданному символу, в боре, в случае найденной терминальной вершины, возвращает либо вектор size_t (задание 1), либо вектор пар size_t (задание 2);

void makeAutomaton() – функция, которая модифицирует бор в автомат путём добавления суффиксных ссылок;

void makeFinishLink() - функция построения конечных ссылок на основе суффиксных

void findMaxLinkChain() - функция поиска максимальной длины ссылочных цепей

№1:

set<pair<size_t, size_t>> AhoCorasick(const string &text, const vector<string> &patterns) – функция, возвращающая множество, состоящее из пары индекса вхождения в текст и номера паттерна, который был найден в нём.

№2:

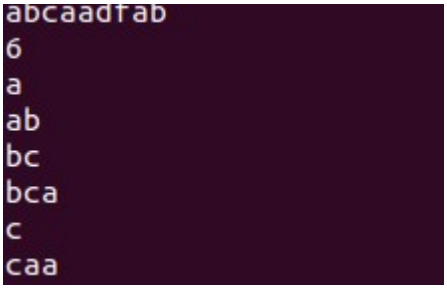
vector <size_t> AhoCorasick(const string &text, const string &mask, const char joker)– функция, возвращающая вектор индексов вхождения маски в текст.

Тестирование

№1

Ввод	Вывод
ABCASDTEAD 5 ABC DTE ASD TEA EAD	1 1 4 3 6 2 7 4 8 5
ABCBABC 4 ABC BC CBA BAB	1 1 2 2 3 3 4 4 5 1 6 2
DOGNTADOG 3 TA DOG NA	1 2 5 1 7 2
DDDA 1 DD	1 1

Тест с подробным промежуточным выводом:

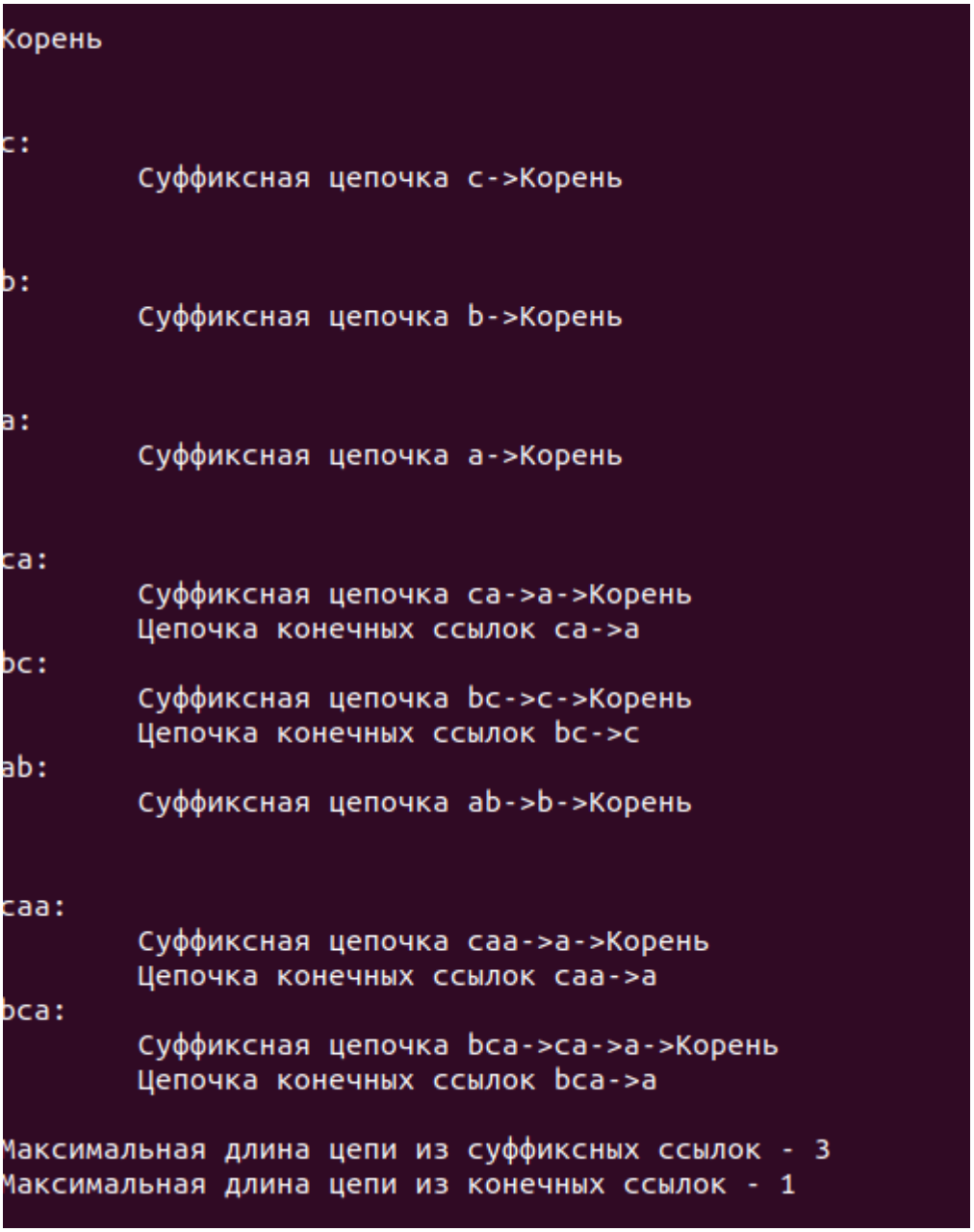


```
Текущее состояние бора:
Корень:

c:
        Суффиксная ссылка: Корень
        Родитель: Корень
        Потомок: a
b:
        Суффиксная ссылка: Корень
        Родитель: Корень
        Потомок: c
a:
        Суффиксная ссылка: Корень
        Родитель: Корень
        Потомок: b
ca:
        Суффиксная ссылка: a
        Родитель: c
        Потомок: a
bc:
        Суффиксная ссылка: c
        Родитель: b
        Потомок: a
ab:
        Суффиксная ссылка: b
        Родитель: a

caa:
        Суффиксная ссылка: a
        Родитель: ca

bca:
        Суффиксная ссылка: ca
        Родитель: bc
```



№2:

Ввод	**Вывод**
ACTANCA A$$A $	1
CATNATCAT $AT $	1 4 7

Тест с подробным промежуточным выводом:

```
ACTANCA
A$$A$
$
Вставляем строку: A
Текущее состояние бора:
Корень:
        Потомок: A
A:
        Родитель: Корень


Вставляем строку: A
Текущее состояние бора:
Корень:
        Потомок: A
A:
        Родитель: Корень


Строим автомат:
A:
        Родитель: Корень
        Суффиксная ссылка: Корень


Текущее состояние бора:
Корень:
        Потомок: A
A:
        Суффиксная ссылка: Корень
        Родитель: Корень


Ищем 'A' из: Корень
Символ найден!
Ищем 'C' из: A
Переходим по суффиксной ссылке: Корень
Символ не найден!
Ищем 'T' из: Корень
Символ не найден!
Ищем 'A' из: Корень
Символ найден!
Ищем 'N' из: A
Переходим по суффиксной ссылке: Корень
Символ не найден!
Ищем 'C' из: Корень
Символ не найден!
Ищем 'A' из: Корень
Символ найден!
1
```

Вывод

В ходе выполнения лабораторной работы была изучена работа алгоритма Ахо-Корасик. Алгоритм был реализован для поиска вхождений шаблонов из словаря в тексте, а также для поиска шаблона с джокером.

Приложение А

Код программы 1

```
#include <iostream>
#include <string>
#include <vector>
#include <set>
#include <queue>
#include <algorithm>
#include <unordered_map>

using namespace std;

class Tree {

    string dbgStr = ""; // Для отладки
    char value; // Значение узла
    size_t numOfPattern = 0; // Номер введенного паттерна
    Tree *parent = nullptr; // Родитель ноды
    Tree* suffixLink = nullptr; // Суффиксная ссылка
    Tree* finishLink = nullptr; // конечная ссылка
    unordered_map <char, Tree*> children; // Потомки узла
public:
    Tree() : value('\0') {}
    Tree(char val) : value(val) {} // Конструктор ноды
    void initialization(vector<string> patterns){
        for(auto &pattern : patterns){
            this->insert(pattern);
        }
    }
    void printInfo(Tree *curr){

        cout << curr->dbgStr << ':' << endl;

        if (curr->suffixLink)
               cout << "\tСуффиксная ссылка: " << (curr->suffixLink == this ?
"Корень" : curr->suffixLink->dbgStr) << endl;
        if(curr->finishLink)
               cout << "\tКонечная ссылка: " << (curr->finishLink->dbgStr) <<
endl;

        if(curr -> parent)
            cout << "\tРодитель: "  << (curr->parent->value ? curr->parent->dbgStr
:  "Корень") << endl;

        if (!curr->children.empty())
            cout << "\tПотомок: ";
        for (auto child : curr->children) {
            cout << child.second->value << ' ';

        }
    }
    // Вставка подстроки в бор
    void insert(const string &str) {
        auto curr = this;
        static size_t countPatterns = 0;

        for (char c : str) { // Идем по строке
            // Если из текущей вершины по текущему символу не было создано
перехода
            if (curr->children.find(c) == curr->children.end()) {
                // Создаем переход
                curr->children[c] = new Tree(c);
```

```
                curr->children[c]->parent = curr;
                curr->children[c]->dbgStr += curr->dbgStr + c;
            }
            // Спускаемся по дереву
            curr = curr->children[c];
        }

        cout << "Вставляем строку: " << str << endl;
        printBor();

        // Показатель терминальной вершины, значение которого равно порядковому
номеру добавления шаблона
        curr->numOfPattern = ++countPatterns;
    }

    //печать бора
    void printBor() {
        cout << "Текущее состояние бора:" << endl;

        queue<Tree *> queue;
        queue.push(this);

        while (!queue.empty()) {

            auto curr = queue.front();
            if (!curr->value)
                cout << "Корень:" << endl;
            else
                printInfo(curr);
                for (auto child : curr->children) {
                    queue.push(child.second);
                }

            queue.pop();
            cout << endl;
        }
        cout << endl;

    }

    // Функция для поиска подстроки в строке при помощи автомата
    vector<size_t> find(const char c) {
        static const Tree *curr = this; // Вершина, с которой необходимо начать
следующий вызов
        cout << "Ищем '" << c << "' из: " << (curr->dbgStr.empty() ? "Корень" :
curr->dbgStr) << endl; // Дебаг

        for (; curr != nullptr; curr = curr->suffixLink) {
            // Обходим потомков, если искомый символ среди потомков не найден, то
            // переходим по суффиксной ссылке для дальнейшего поиска
            for (auto child : curr->children)
                if (child.first == c) { // Если символ потомка равен искомому
                    curr = child.second; // Значение текущей вершины переносим на
этого потомка
                    vector<size_t> visited; // Вектор номеров найденных терм.
вершин
                    // Обходим суффиксы, т.к. они тоже могут быть терминальными
вершинами
                    for (auto temp = curr; temp->suffixLink; temp = temp-
>suffixLink)
                        if (temp->numOfPattern)
                            visited.push_back(temp->numOfPattern - 1);
                    //
```

```
                    cout << "Символ найден!" << endl; // Дебаг
                    return visited;
                }

            if (curr->suffixLink) {
                cout << "Переходим по суффиксной ссылке: ";
                cout << (curr->suffixLink->dbgStr.empty() ? "Корень" : curr-
>suffixLink->dbgStr) << endl;
            }
        }
        cout << "Символ не найден!" << endl; // Дебаг

        curr = this;
        return {};
    }

    // Функция для построения недетерминированного автомата
    void makeAutomaton() {

        cout << "Строим автомат: " << endl;
        queue<Tree *> queue; // Очередь для обхода в ширину

        for (auto child : children) // Заполняем очередь потомками корня
            queue.push(child.second);

        while (!queue.empty()) {
            auto curr = queue.front(); // Обрабатываем вершину из очереди
            printInfo(curr);
            // Заполняем очередь потомками текущей верхушки
            for (auto child : curr->children) {
                queue.push(child.second);
            }

            if (!curr->children.empty())
                cout << endl;

            queue.pop();
            auto p = curr->parent; // Ссылка на родителя обрабатываемой вершины
            char x = curr->value; // Значение обрабатываемой вершины
            if (p)
                p = p->suffixLink; // Если родитель существует, то переходим по
суффиксной ссылке

            // Пока можно переходить по суффиксной ссылке или пока
            // не будет найден переход в символ обрабатываемой вершины
            while (p && p->children.find(x) == p->children.end())
                p = p->suffixLink; // Переходим по суффиксной ссылке

            // Суффиксная ссылка для текущей вершины равна корню, если не смогли
найти переход
            // в дереве по символу текущей вершины, иначе равна найденной вершине
            curr->suffixLink = p ? p->children[x] : this;

            // Дебаг
            cout << "\tСуффиксная ссылка: " << (curr->suffixLink == this ?
"Корень" : curr->suffixLink->dbgStr) << endl << endl;
        }

        // Дебаг
        cout << endl;
        printBor();
    }

    void makeFinishLink(){
```

```
        cout << "Строим конечные ссылки" << endl;

        queue<Tree *> queue;
        queue.push(this);

        while (!queue.empty()) {

            auto curr = queue.front();
            auto next = curr;
            //проходим по суффиксным ссылкам каждой вершины автомата
            while(1){

                if(next->suffixLink && next->suffixLink->value){//есть возможность
перейти по суффиксной ссылке не в корень
                    next = next->suffixLink;//переходим
                }
                else break;//цепочка суффиксных ссылок закончилась

                if(next->numOfPattern){//вершина - терминальная
                    curr->finishLink = next;//строим конечную ссылку
                    break;
                }

            }
            //обход в ширину
            for (auto child : curr->children) {
                queue.push(child.second);
            }

            queue.pop();
        }
        printBor();
    }

    void findMaxLinkChain(){//индивидуализация поиск максимальных цепей

        size_t maxSuffixChain = 0;
        size_t maxFinishChain = 0;
        size_t buf = 0;//для хранения длины цепочки из текущей вершины

        queue<Tree *> queue;
        queue.push(this);

        while (!queue.empty()) {

            auto curr = queue.front();
            auto next = curr;

            //проходим по суффиксным ссылкам каждой вершины автомата
            if(curr->value)
                cout << curr->dbgStr << ":" << endl << "\tСуффиксная цепочка ";
            cout << curr->dbgStr;
            buf = 0;
            while(1){
                if(next->suffixLink ){//&& next->suffixLink->value){//есть
возможность перейти по суффиксной ссылке не в корень
                    next = next->suffixLink;//переходим
                    cout << "->" << next->dbgStr;
                    buf++;//увеличиваем длину цепи

                }
                else break;//цепочка суффиксных ссылок закончилась
            }
```

```
            cout << "Корень" << endl;
            maxSuffixChain = max(maxSuffixChain, buf);
            //cout << "Текущая максимальная длина цепи суффиксных ссылок: " <<
maxSuffixChain << endl;

            buf = 0;
            next = curr;
            if(curr->finishLink)
                cout << "\tЦепочка конечных ссылок " << curr->dbgStr;
            else cout << endl;
            while(1){
                if(next->finishLink ){//есть возможность перейти по конечной
ссылке
                    next = next->finishLink;//переходим
                    if(next->dbgStr != "")
                        cout << "->" << next->dbgStr;
                    buf++;//увеличиваем длину цепи
                }
                else break;//цепочка суффиксных ссылок закончилась
            }
            maxFinishChain = max(maxFinishChain, buf);
            //cout << "Текущая максимальная длина цепи конечных ссылок: " <<
maxFinishChain <<endl;

            //обход в ширину
            for (auto child : curr->children) {
                queue.push(child.second);
            }

            queue.pop();
            cout << endl;
        }
        cout << endl;

        cout << "Максимальная длина цепи из суффиксных ссылок - " <<
maxSuffixChain << endl;
        cout << "Максимальная длина цепи из конечных ссылок - " << maxFinishChain
<< endl;
        cout << endl;

    }

    ~Tree() { // Деструктор ноды
        for (auto child : children) delete child.second;
    }

};

auto AhoCorasick(const string &text, const vector <string> &patterns)
{
    Tree bor;
    set <pair<size_t, size_t>> result;

    bor.initialization(patterns);
    bor.makeAutomaton(); // Из полученного бора создаем автомат (путем добавления
суффиксных ссылок)
    bor.makeFinishLink();//добавляем конечные ссылки
    bor.findMaxLinkChain();//поиск максимальных длин цепей ссылок

    {
        size_t j = 0;
        for(auto &el : text){//поиск для каждого символа строки
            for(auto pos : bor.find(el))// Проходим по всем найденным позициям,
записываем в результат
```

```
                result.emplace(j - patterns[pos].size() + 2, pos + 1);
            j++;
        }
    }

    return result;
}

int main()
{
    string text;
    size_t n;
    cin >> text >> n;
    vector <string> patterns(n);//словарь

    for(auto &pattern : patterns){
        cin >> pattern;
    }

    auto res = AhoCorasick(text, patterns);
    for (auto r : res)
        cout << r.first << ' ' << r.second << endl;

    return 0;
}
```

Приложение В

Код программы 2

```
#include <iostream>
#include <string>
#include <vector>
#include <queue>
#include <unordered_map>

using namespace std;

class TreeNode {

    string dbgStr = ""; // Для отладки
    char value; // Значение ноды
    TreeNode *parent = nullptr; // Родитель ноды
    TreeNode *suffixLink = nullptr; // Суффиксная ссылка
    TreeNode *finishLink = nullptr; //конечная ссылка
    unordered_map <char, TreeNode*> children; // Потомок ноды
    vector <pair<size_t, size_t>> substringEntries;
    size_t numOfPattern = 0;
public:
    TreeNode(char val) : value(val) {} // Конструктор ноды
    TreeNode() : value('\0') {}

    void printInfo(TreeNode *curr) {

        if (curr->suffixLink)
               cout << "\tСуффиксная ссылка: " << (curr->suffixLink == this ?
"Корень" : curr->suffixLink->dbgStr) << endl;
        if(curr->finishLink)
               cout << "\tКонечная ссылка: " << (curr->finishLink->dbgStr) <<
endl;

        if(curr -> parent)
            cout << "\tРодитель: "  << (curr->parent->value ? curr->parent->dbgStr
:  "Корень") << endl;

        if (!curr->children.empty())
            cout << "\tПотомок: ";
        for (auto child : curr->children) {
            cout << child.second->value << ' ';

        }

    }
    // Отладочная функция для печати бора
    void printBor() {

        cout << "Текущее состояние бора:" << endl;

        queue<TreeNode *> queue;
        queue.push(this);

        while (!queue.empty()) {
            auto curr = queue.front();
            if (!curr->value)
                cout << "Корень:" << endl;
            else
                cout << curr->dbgStr << ':' << endl;

            printInfo(curr);
```

```
            for (auto child : curr->children) {
                queue.push(child.second);
            }

            queue.pop();
            cout << endl;
        }
        cout << endl;

    }

    // Вставка подстроки в бор
    void insert(const string &str, size_t pos, size_t size) {
        auto curr = this;
        size_t countPatterns = 0;

        for (char c : str) { // Идем по строке
            // Если из текущей вершины по текущему символу не было создано
перехода
            if (curr->children.find(c) == curr->children.end()) {
                // Создаем переход
                curr->children[c] = new TreeNode(c);
                curr->children[c]->parent = curr;
                curr->children[c]->dbgStr += curr->dbgStr + c;
            }
            // Спускаемся по дереву
            curr = curr->children[c];
        }
        cout << "Вставляем строку: " << str << endl;
        printBor();

        curr->substringEntries.emplace_back(pos, size);

        // Показатель терминальной вершины, значение которого равно порядковому
номеру добавления шаблона
        curr->numOfPattern = ++countPatterns;
    }

    vector <pair<size_t, size_t>> find(const char c)
    {
        static const TreeNode *curr = this; // Вершина, с которой необходимо
начать следующий вызов
        cout << "Ищем '" << c << "' из: " << (curr->dbgStr.empty() ? "Корень" :
curr->dbgStr) << endl;

        for (; curr != nullptr; curr = curr->suffixLink) {
            // Обходим потомков, если искомый символ среди потомков не найден, то
            // переходим по суффиксной ссылке для дальнейшего поиска
            for (auto child : curr->children)
                if (child.first == c) { // Если символ потомка равен искомому
                    curr = child.second; // Значение текущей вершины переносим на
этого потомка
                    // вектор пар, состоящих из начала безмасочной подстроки в
маске и её длины
                    vector <pair<size_t, size_t>> visited;

                    // Обходим суффиксы, т.к. они тоже могут быть терминальными
вершинами
                    for (auto temp = curr; temp->suffixLink; temp = temp-
>suffixLink)
                        for (auto el : temp->substringEntries)
                            visited.push_back(el);

                    cout << "Символ найден!" << endl; // Дебаг
```

```
                    return visited;
                }

            // Дебаг
            if (curr->suffixLink) {
                cout << "Переходим по суффиксной ссылке: ";
                cout << (curr->suffixLink->dbgStr.empty() ? "Корень" : curr-
>suffixLink->dbgStr) << endl;
            }
        }
        cout << "Символ не найден!" << endl; // Дебаг

        curr = this;
        return {};
    }

    // Функция для построения недетерминированного автомата
    void makeAutomaton() {
        cout << "Строим автомат: " << endl;

        queue<TreeNode *> queue; // Очередь для обхода в ширину

        for (auto child : children) // Заполняем очередь потомками корня
            queue.push(child.second);

        while (!queue.empty()) {
            auto curr = queue.front(); // Обрабатываем верхушку очереди

            // Для дебага
            cout << curr->dbgStr << ':' << endl;
            printInfo(curr);

            // Заполняем очередь потомками текущей верхушки
            for (auto child : curr->children) {
                queue.push(child.second);
            }

            // Дебаг
            if (!curr->children.empty())
                cout << endl;

            queue.pop();
            auto p = curr->parent; // Ссылка на родителя обрабатываемой вершины
            char x = curr->value; // Значение обрабатываемой вершины
            if (p) p = p->suffixLink; // Если родитель существует, то переходим по
суффиксной ссылке

            // Пока можно переходить по суффиксной ссылке или пока
            // не будет найден переход в символ обрабатываемой вершины
            while (p && p->children.find(x) == p->children.end())
                p = p->suffixLink; // Переходим по суффиксной ссылке

            // Суффиксная ссылка для текущей вершины равна корню, если не смогли
найти переход
            // в дереве по символу текущей вершины, иначе равна найденной вершине
            curr->suffixLink = p ? p->children[x] : this;

            // Дебаг
            cout << "\tСуффиксная ссылка: " << (curr->suffixLink == this ?
"Корень" : curr->suffixLink->dbgStr) << endl << endl;
        }

        // Дебаг
        cout << endl;
```

```
        printBor();
    }

    void makeFinishLink(){

        cout << "Строим конечные ссылки" << endl;

        queue<TreeNode *> queue;
        queue.push(this);

        while (!queue.empty()) {

            auto curr = queue.front();
            auto next = curr;
            //проходим по суффиксным ссылкам каждой вершины автомата
            while(1){

                if(next->suffixLink && next->suffixLink->value){//есть возможность
перейти по суффиксной ссылке не в корень
                    next = next->suffixLink;//переходим
                }
                else break;//цепочка суффиксных ссылок закончилась

                if(next->numOfPattern){//вершина - терминальная
                    curr->finishLink = next;//строим конечную ссылку
                    break;
                }

            }
            //обход в ширину
            for (auto child : curr->children) {
                queue.push(child.second);
            }

            queue.pop();
        }
        printBor();
    }

    void findMaxLinkChain(){//индивидуализация поиск максимальных цепей

        size_t maxSuffixChain = 0;
        size_t maxFinishChain = 0;
        size_t buf = 0;//для хранения длины цепочки из текущей вершины

        queue<TreeNode *> queue;
        queue.push(this);

        while (!queue.empty()) {

            auto curr = queue.front();
            auto next = curr;

            //проходим по суффиксным ссылкам каждой вершины автомата
            if(curr->value)
                cout << curr->dbgStr << ":" << endl << "\tСуффиксная цепочка ";
            cout << curr->dbgStr;
            buf = 0;
            while(1){
                if(next->suffixLink ){//&& next->suffixLink->value){//есть
возможность перейти по суффиксной ссылке не в корень
                    next = next->suffixLink;//переходим
                    cout << "->" << next->dbgStr;
```

```
                    buf++;//увеличиваем длину цепи

                }
                else break;//цепочка суффиксных ссылок закончилась
            }
            cout << "Корень" << endl;
            maxSuffixChain = max(maxSuffixChain, buf);

            buf = 0;
            next = curr;
            if(curr->finishLink)
                cout << "\tЦепочка конечных ссылок " << curr->dbgStr;
            else cout << endl;
            while(1){
                if(next->finishLink ){//есть возможность перейти по конечной
ссылке
                    next = next->finishLink;//переходим
                    if(next->dbgStr != "")
                        cout << "->" << next->dbgStr;
                    buf++;//увеличиваем длину цепи
                }
                else break;//цепочка суффиксных ссылок закончилась
            }
            maxFinishChain = max(maxFinishChain, buf);

            //обход в ширину
            for (auto child : curr->children) {
                queue.push(child.second);
            }

            queue.pop();
            cout << endl;
        }
        cout << endl;

        cout << "Максимальная длина цепи из суффиксных ссылок - " <<
maxSuffixChain << endl;
        cout << "Максимальная длина цепи из конечных ссылок - " << maxFinishChain
<< endl;
        cout << endl;

    }

    ~TreeNode()
    {
        for (auto child : children)
            delete child.second;
    }

};

auto AhoCorasick(const string &text, const string &mask, char joker) {

    TreeNode bor;
    vector <size_t> result;
    vector <size_t> midArr(text.size()); // Массив для хранения кол-ва попаданий
безмасочных подстрок в текст
    string pattern;
    size_t numSubstrs = 0; // Количество безмасочных подстрок

    for (size_t i = 0; i <= mask.size(); i++) { // Заполняем бор безмасочными
подстроками маски
        char c = (i == mask.size()) ? joker : mask[i];
        if (c != joker)
```

```
            pattern += c;
        else if (!pattern.empty()) {
            numSubstrs++;
            bor.insert(pattern, i - pattern.size(), pattern.size());
            pattern.clear();
        }
    }

    bor.makeAutomaton();
    bor.makeFinishLink();
    bor.findMaxLinkChain();

    for (size_t j = 0; j < text.size(); j++)
        for (auto pos : bor.find(text[j])) {
            // На найденной терминальной вершине вычисляем индекс начала маски в
тексте
            int i = int(j) - int(pos.first) - int(pos.second) + 1;
            if (i >= 0 && i + mask.size() <= text.size())
                midArr[i]++; // Увеличиваем её значение на 1
        }

    for (size_t i = 0; i < midArr.size(); i++) {
        // Индекс, по которым промежуточный массив хранит количество
        // попаданий безмасочных подстрок в текст, есть индекс начала вхождения
маски
        // в текст, при условии, что кол-во попаданий равно кол-ву подстрок б/м
        if (midArr[i] == numSubstrs) {
            result.push_back(i + 1);
        }
    }

    return result;
}

int main()
{
    string text, pattern;
    char joker;
    cin >> text >> pattern >> joker;

    for (auto res : AhoCorasick(text, pattern, joker))
        cout << res << endl;

    return 0;
}
```