# Лекция 6
# Задачи конструкторского проектирования и методы их решения

# <u>Вопросы лекции</u>

1. Классификация задач конструкторского проектирования.
2. Задачи и методы геометрического проектирования.
3. Задачи и методы топологического проектирования.

# Вопрос 1.
# Классификация задач конструкторского проектирования

Применительно к этапам проектирования ЭС обычно выделяют первые четыре группы (из приведенных пяти) близких по однородности задач, решаемых последовательно:

1) Задачи системотехнического проектирования,
2) Задачи схемотехнического проектирования
3) Задачи **конструкторского** проектирования
4) Задачи технологического проектирования

*5) Задачи, связанные с испытаниями ЭС.*

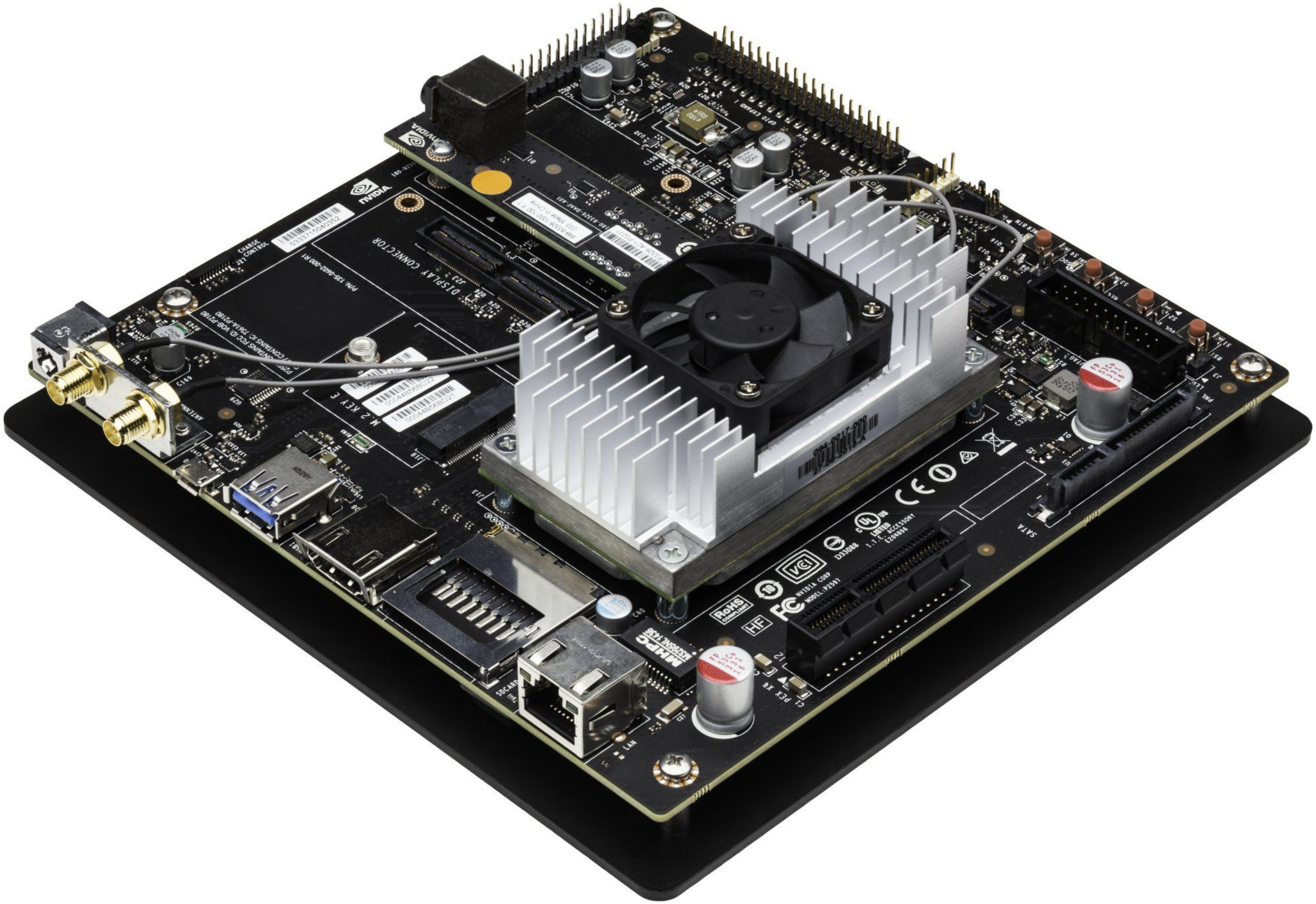
Все рассмотренные **группы задач тесно взаимосвязаны** и во многих случаях при решении задач одной группы
приходится возвращаться к решению задач, им предшествующих.

Например, при выполнении **конструкторского проектирования** может возникнуть необходимость пересмотра **схемотехнических решений** и даже принципа действия ЭС (**системотехническое проектирование**), т. е. в схеме процесса проектирования имеют место обратные связи и отдельные итерации могут выполняться многократно.

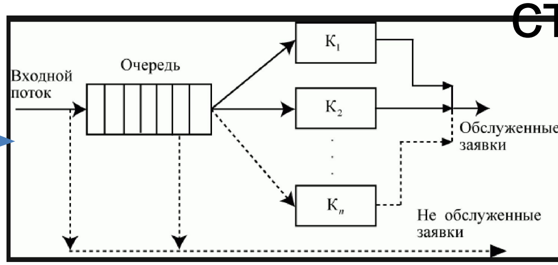
Основная **цель конструкторского проектирования** – реализация принципиальных схем, полученных на этапе схемотехнического (функционального) проектирования. При этом производятся конструирование отдельных деталей, компоновка узлов из деталей и конструктивных элементов, агрегатов из узлов, после чего оформляется техническая документация на объект проектирования.

Решение задач конструкторского проектирования во многом регламентировано существующими нормативно-техническими документами — государственными и отраслевыми стандартами, инструкциями, техническими
условиями и пр., поскольку **конечной целью проектирования** является получение технической документации, позволяющей изготовить требуемое

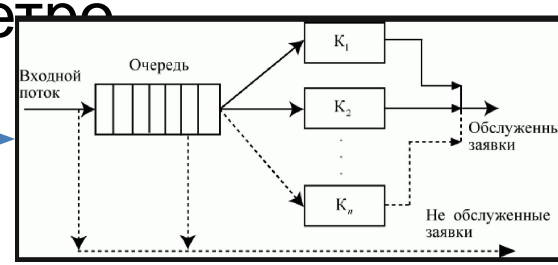
# Пример конструкции устройства коммутации (контролера)



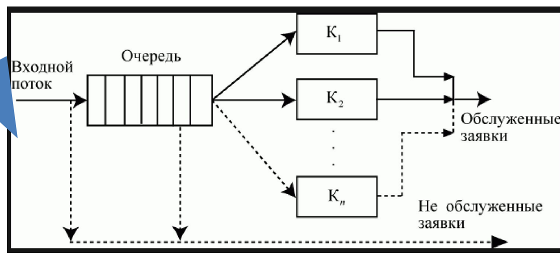
# Условная принципиальная (функциональная) схема ЭС типа телекоммуникационной СМО, имитирующей станцию метро



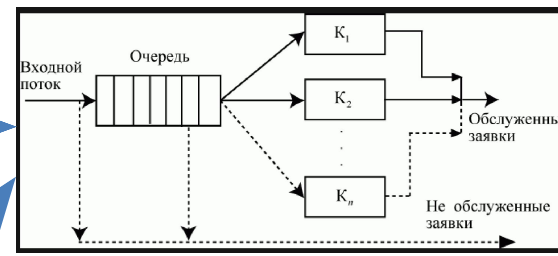

Внешний интерфейс (вход в вестибюль)



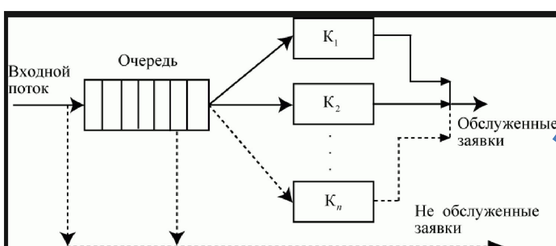

Входной фильтр (турникеты)




Абонентская линия (эскалатор)




Магистральный мультиплексор (электричка)




Соединительная линия (пешеходный

Задачи конструкторского проектирования делятся на две основные группы:

1. Определение геометрических параметров конструкции – **геометрическое проектирование**.

2. Синтезирование структуры (топологии) конструкции – **топологическое проектирование**.

# Вопрос 2

## Задачи и методы геометрического проектирования

**Геометрическое проектирование** связано с определением размеров, формы заготовки и т. п.

С учетом того, что конструкция большинства ЭС содержит функциональные
узлы на печатном монтаже, задачи **конструкторского проектирования печатных узлов** занимают одно из наиважнейших мест среди всех видов конструкторских работ.

Исходными данными для геометрического проектирования ЭС в виде функциональных узлов на печатном монтаже служат **требования к геометрии** (форме и размерам) **печатной платы.**

**Задача синтеза геометрических объектов** (ГО) состоит в формировании сложных ГО из элементарных ГО заданной структуры.

Основным критерием геометрического синтеза является точность воспроизведения требуемой формы ГО.

Решение задачи синтеза формы (облика) изделия обеспечивает получение оптимальной или рациональной формы деталей, узлов или агрегатов, влияющей на качество функционирования объекта проектирования.

Задачи синтеза геометрических объектов во многих случаях являются **оптимизационными**, т.е. предполагают необходимость достижения некоторых наилучших результатов с учетом заданных ограничений (по форме, объему, площади ГО, по количеству размещаемых объектов и т.п.) .

Результатом решения задачи оптимизации считаются оптимальные значения управляемых параметров $\boldsymbol{m}^*$, при которых достигается экстремум (оптимальное значение) целевой функции $\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{m})$:

$$\boldsymbol{m}^* = \underset{\boldsymbol{m} \in \boldsymbol{M}}{\arg \operatorname{extr}}\, \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{m}).$$

Экстремальное (оптимальное) значение целевой функции $\boldsymbol{Q}^*=\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{m}^*)$ тоже относится к результату решения задачи оптимизации:

$$\boldsymbol{Q}^* = \underset{\boldsymbol{m} \in \boldsymbol{M}}{\operatorname{extr}}\, \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{m}) = \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{m}^*)$$

При выполнении условий

$$g_i(x_1, \ldots, x_n) \ast b_i, \quad i = \overline{1, m} \tag{4.1}$$

необходимо найти параметры $(x_1, \ldots, x_n)$, при которых функция $\Phi(x_1, \ldots, x_n)$ принимает наибольшее или наименьшее значение.

Условия (4.1) задают множество (набор) $G_x$, что записывается следующим образом:

$$G_x = \{x_1, \ldots, x_n \colon g_i(x_1, \ldots, x_n) \ast b_i, \ i = \overline{1, m}\},$$

т. е. $G_x$ — множество наборов параметров $\{x_1, \ldots, x_n\}$, для которых выполняются соотношения (4.1).

Условия (4.1) называются ограничениями задачи. Знак $\ast$ в них показывает, что могут иметь место отношения вида $>$, $<$ или $=$. При этом необязательно, чтобы знаки отношений для всех $i$ были одинаковыми. Возможны также и другие способы определения множества $G_x$. Так, дополнительно к (4.1) может быть задано требование целочисленности всех или нескольких переменных. Кроме того, множество $G_x$ может быть задано в виде решения некоторых уравнений и т. д. Однако форма (4.1) наиболее употребительна и удобна, ею мы и будем пользоваться.

Задачу математического программирования удобно записать в векторной форме. Для этого совокупность $\{x_1, \ldots, x_n\}$ заменяется вектором $\vec{x} = [x_1, \ldots, x_n]^{\text{т}}$. Тогда задача записывается так:

$$\Phi(\vec{x}) \Rightarrow \min_{\vec{x} \in G_x} (\max),$$

где $G_x = \{\vec{x}\colon\ g_i(\vec{x}) \ast b_i,\ i = \overline{1, m}\}$,

В рассматриваемых задачах множество $G_x$ допустимых векторов $\vec{x}$ называют **областью допустимых решений**, а функцию $\Phi(\vec{x})$ — **целевой.**

При рассмотрении задач математического программирования можно ограничиться случаем $\Phi(\vec{x}) \Rightarrow \min$. Действительно, если имеется задача $\Phi(\vec{x}) \Rightarrow \max$, то, меняя знак целевой функции, получаем

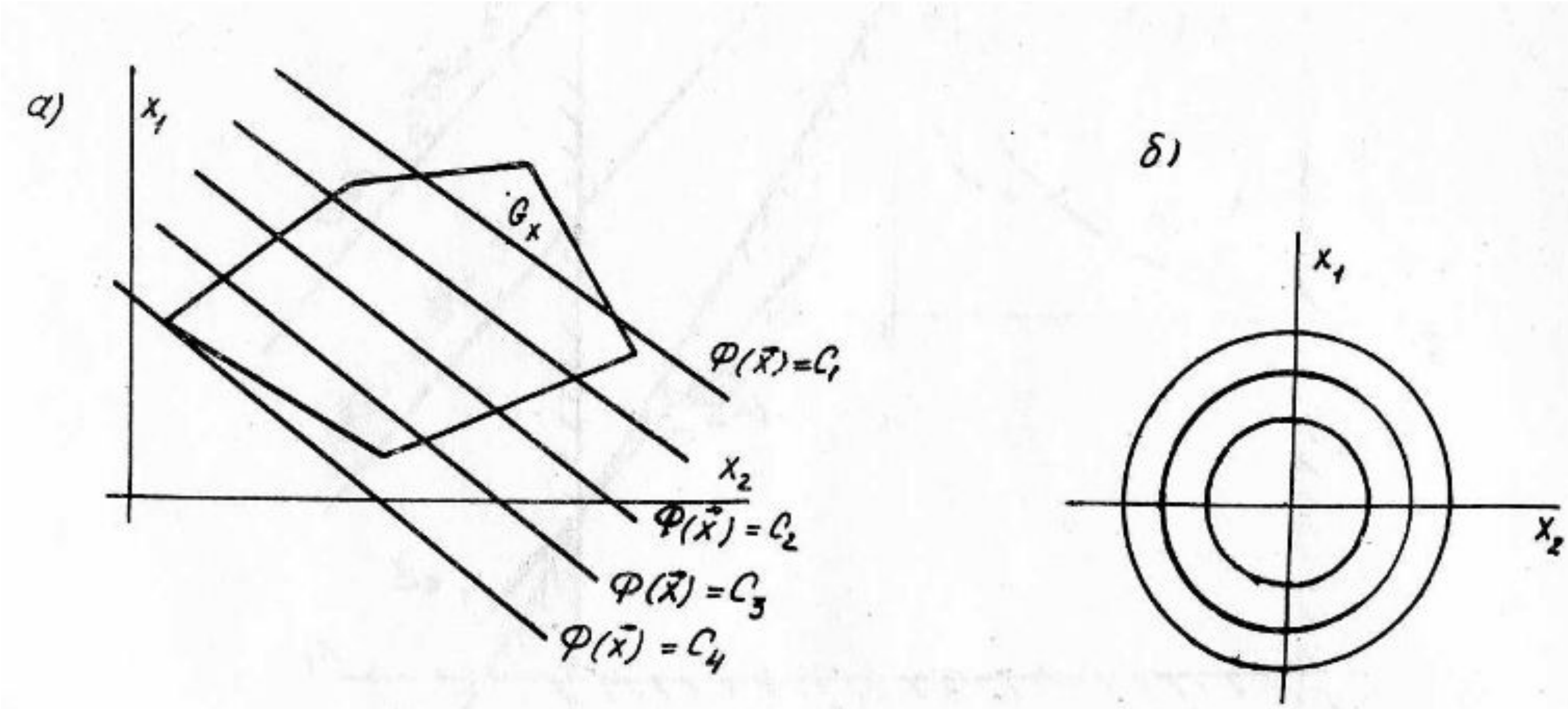
$$\Phi_1(\vec{x}) = -\Phi(\vec{x}), \quad \Phi_1(\vec{x}) \Rightarrow \min.$$

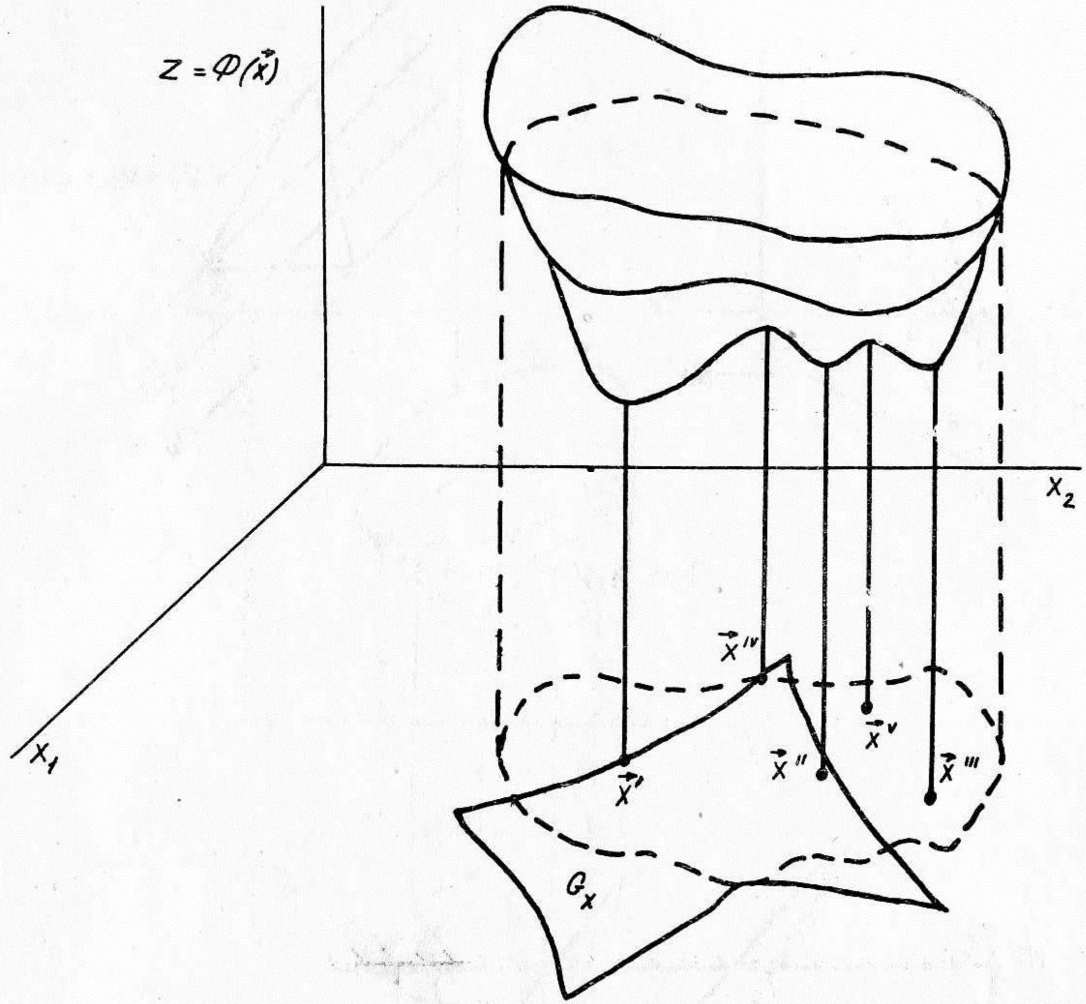
***Математическое программирование*** представляет собой математическую дисциплину, занимающуюся изучением экстремальных задач (задач оптимизации / синтеза)
и разработкой **методов их решения**

## *Типовые задачи оптимизации*

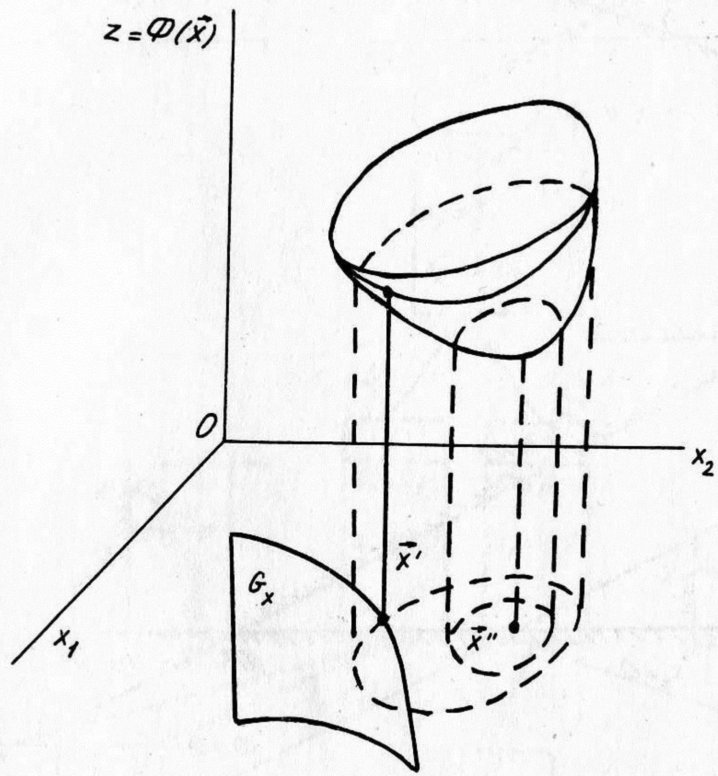
- Линейное программирование
- Нелинейное программирование
- Динамическое программирование
- Целочисленное программирование
- Стохастическое программирование
- Задачи многокритериальной оптимизации
- Теоретико-игровые задачи
- и др.

**_Графическое представление функций двух переменных в виде линий равного уровня (изолиний)_**

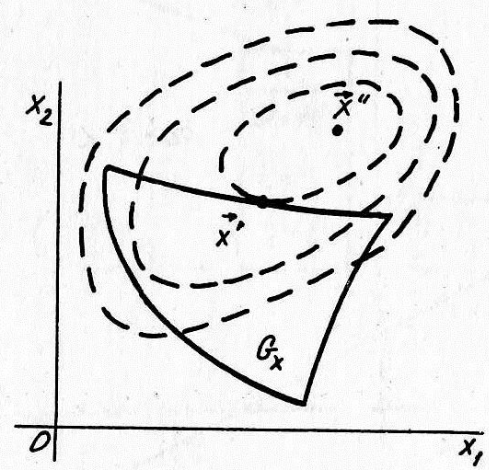




$z = \Phi(\vec{x})$
$x_2$
$x_1$
$\vec{x}^{\,IV}$
$\vec{x}^{\,V}$
$\vec{x}^{\,II}$
$\vec{x}^{\,III}$
$\vec{x}^{\,I}$
$G_x$



z = Φ(x⃗)
0
x₂
x₁
x⃗′
Gₓ
x⃗″

x₂
x⃗″
x⃗′
Gₓ
0
x₁

**Верификация решения.** Признаки, позволяющие определить, является ли данная точка решением задачи оптимизации, имеют важное теоретическое и практическое значение. В частности, они оказываются полезными для выработки критериев остановки итерационных процедур.

Условия экстремума гладкой функции $\Phi(\vec{x})$

**Теорема 4.3.** Для того чтобы в точке $\vec{x^0}$ функция $\Phi(\vec{x})$ имела безусловный локальный экстремум, необходимо, чтобы все ее частные производные обращались в нуль в точке $\vec{x^0}$:

$$\left.\frac{\partial\Phi(\vec{x})}{\partial x_i}\right|_{x_i=x_i^0}=0.$$

Это же условие может быть записано в векторной форме через градиент

$$\nabla\Phi(\vec{x^0})=0.$$

Выполнение равенств характеризует стационарную точку. Ею может быть точка минимума, максимума, седловая точка и т. д. Для более точного выяснения характера стационарной точки необходимо привлечение вторых производных.

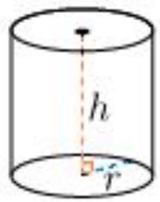
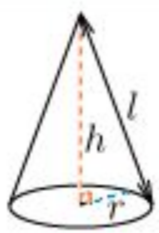
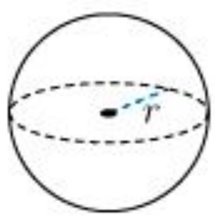
**Теорема 4.4.** Для того чтобы дважды непрерывно дифференцируемая функция $n$ переменных $\Phi(\vec{x})$ имела в стационарной точке $\vec{x}^*$ безусловный локальный минимум (максимум), необходимо, чтобы матрица Гессе была неотрицательно (неположительно) определенной, и достаточно, чтобы она была положительно (отрицательно) определенной.

$$\nabla^2\Phi(\vec{x}) = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial\Phi(\vec{x})}{\partial x_1\,\partial x_1} & \dfrac{\partial\Phi(\vec{x})}{\partial x_1\,\partial x_2} & \dots & \dfrac{\partial\Phi(\vec{x})}{\partial x_1\,\partial x_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \dfrac{\partial\Phi(\vec{x})}{\partial x_i\,\partial x_1} & \dfrac{\partial\Phi(\vec{x})}{\partial x_i\,\partial x_2} & \dots & \dfrac{\partial\Phi(\vec{x})}{\partial x_i\,\partial x_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \dfrac{\partial\Phi(\vec{x})}{\partial x_n\,\partial x_1} & \dfrac{\partial\Phi(\vec{x})}{\partial x_n\,\partial x_2} & \dots & \dfrac{\partial\Phi(\vec{x})}{\partial x_n\,\partial x_n} \end{bmatrix}.$$

## Пример оптимизационной задачи синтеза ГО

Спроектировать цилиндрический (конусный, сферический) корпус для некоторого электронного устройства объемом $V$ куб.см таким образом, чтобы на его изготовление было израсходовано как можно меньше материала (т.е. корпус должен иметь минимальную площадь поверхности $S$).

Найти оптимальные значения $r$ и $h$ (см. рис). Используя уравнение для заданного объема корпуса, двумерную задачу оптимизации можно свести к одномерной и решить аналитически (проверкой условия стационарности точки оптимума) или итерационно методом золотого сечения и/или методом Ньютона.

| | | | |
|---|---|---|---|
| <br>Цилиндр | $V = \pi r^2 h$<br>$r$ - радиус основания<br>$h$ - высота | $S = 2S_{\text{осн}} + S_{\text{бок}} =$<br>$= 2\pi r^2 + 2\pi r h$ | |
| <br>Конус | $V = \frac{1}{3}\pi r^2 h$ | $S = S_{\text{осн}} + S_{\text{бок}} =$<br>$= \pi r^2 + \pi r l$<br>$l$ - образующая | $l = \sqrt{r^2 + h^2}$ |
| <br>Шар | $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ | $S = 4\pi r^2$ | |

# Для решения дискретных или целочисленных задач оптимизации часто используется метод ветвей и границ

Суть метода заключается в том, что сначала в области допустимых решений системы ограничений находится оптимальное решение задачи без учета условия целочисленности. Если найдется целочисленное решение, то цель достигнута. В противном случае выбираем любую из дробных переменных и по ней строим два ограничения. Как? Пусть, например, $x_2 = \frac{7}{2}$, т. е. $3 \leq x_2 \leq 4$. При этом дробные значения $x_2$ изменяются в интервале (3; 4), а целые — следует взять вне этого интервала так:

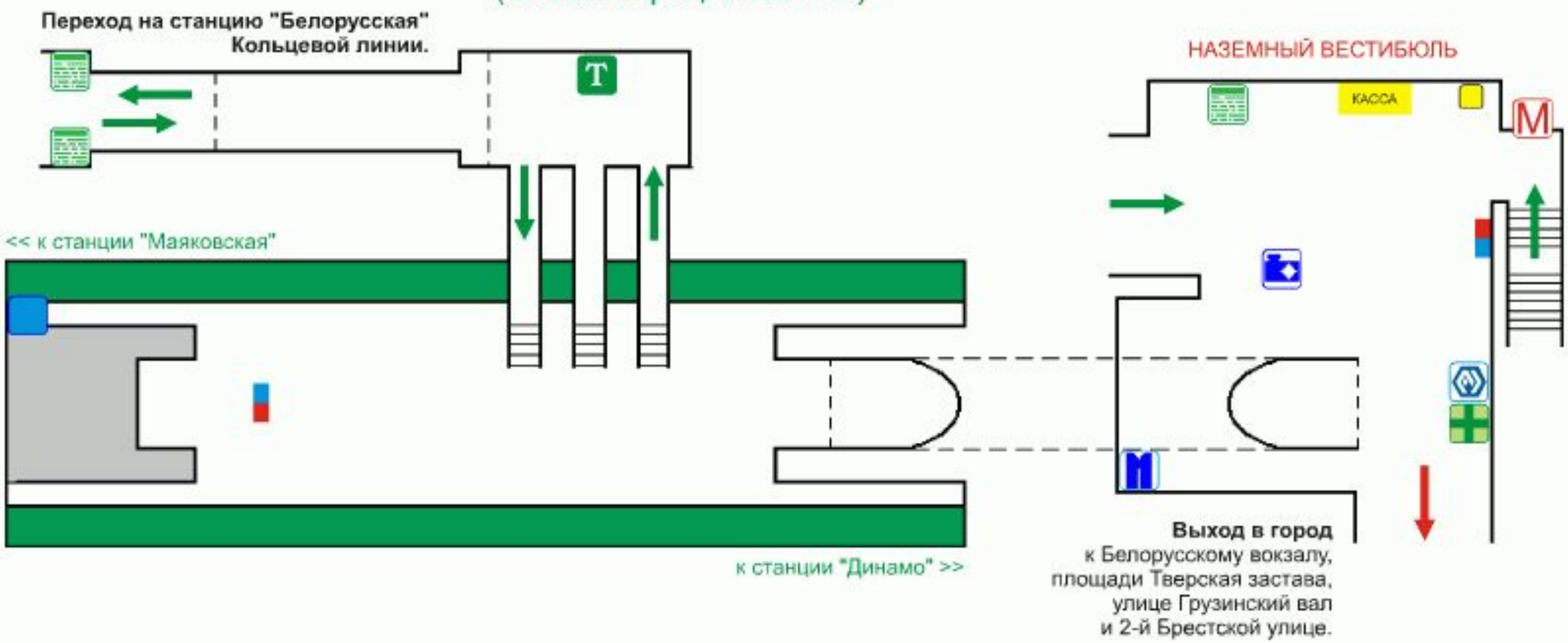
$$x_2 \leq 3 \quad \text{и} \quad x_2 \geq 4.$$

Таким образом, вместо одной задачи, где $x_2 = \frac{7}{2}$, будем иметь две подзадачи, т. е. две ветви.

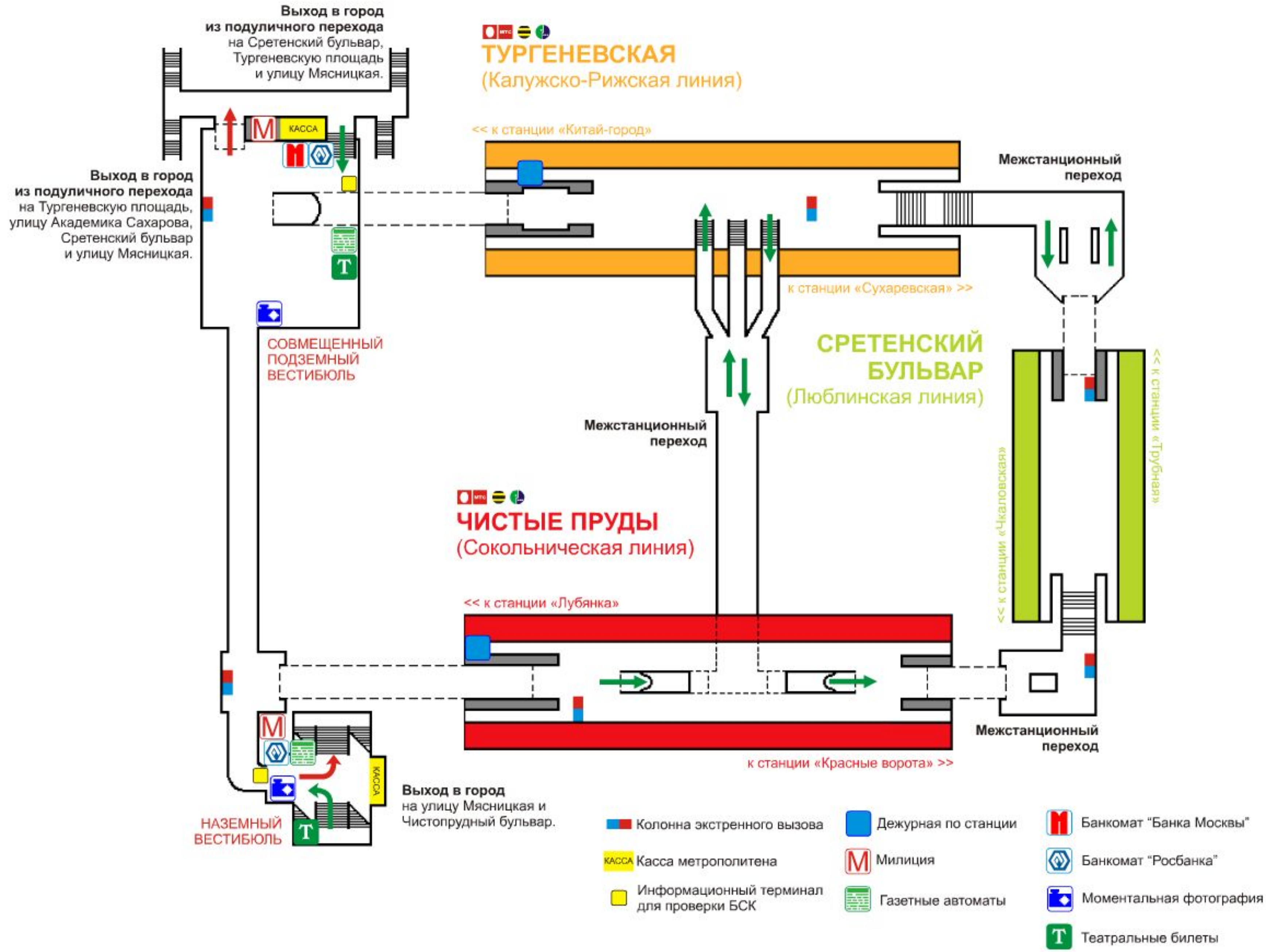

Так как множество всех решений целочисленной оптимизации конечно, то в итоге ветвление заканчивается нахождением целочисленного решения, если оно существует. Границами в методе выступают значения функций задач на каждой ветви.

# БЕЛОРУССКАЯ

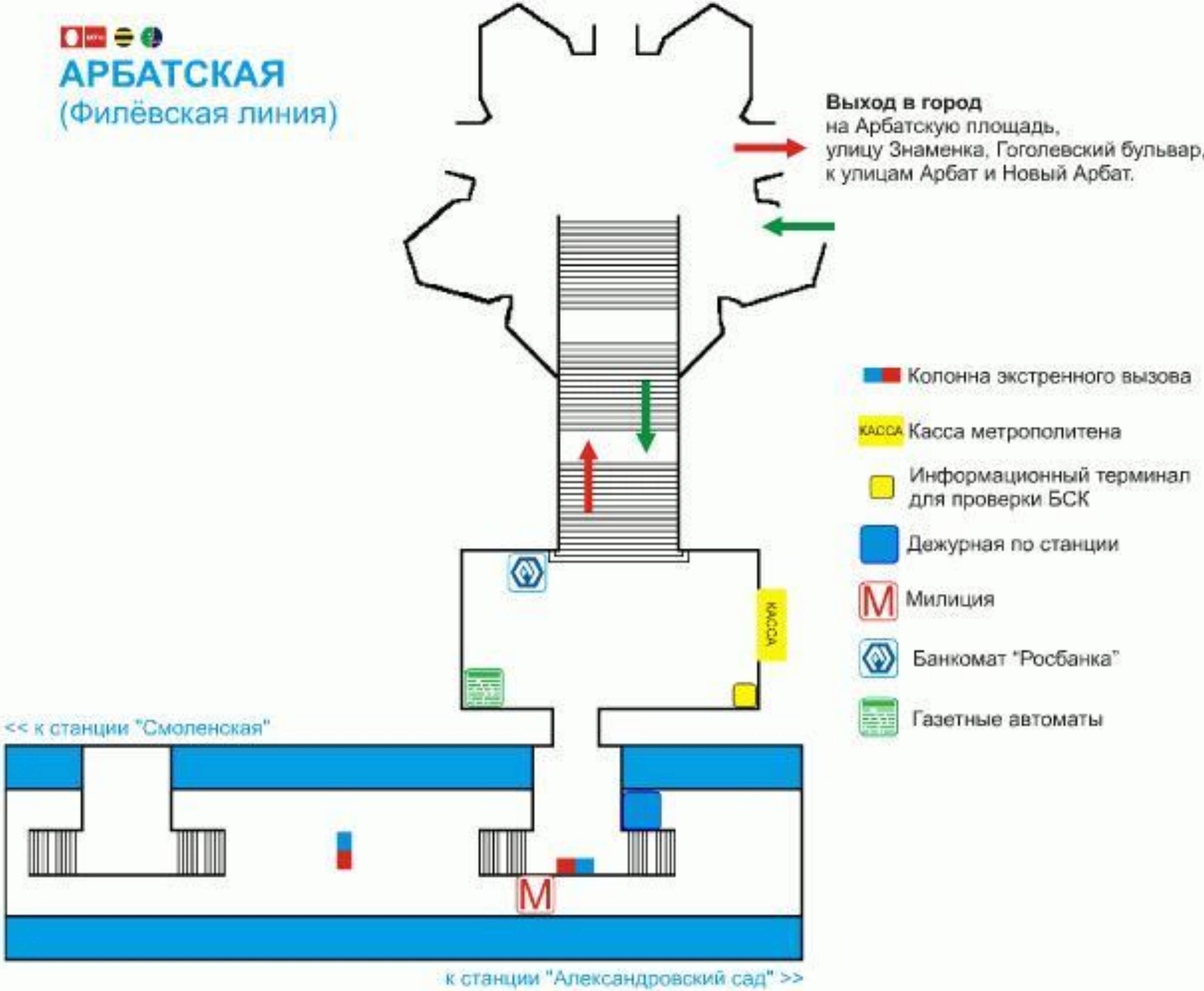
(Замоскворецкая линия)

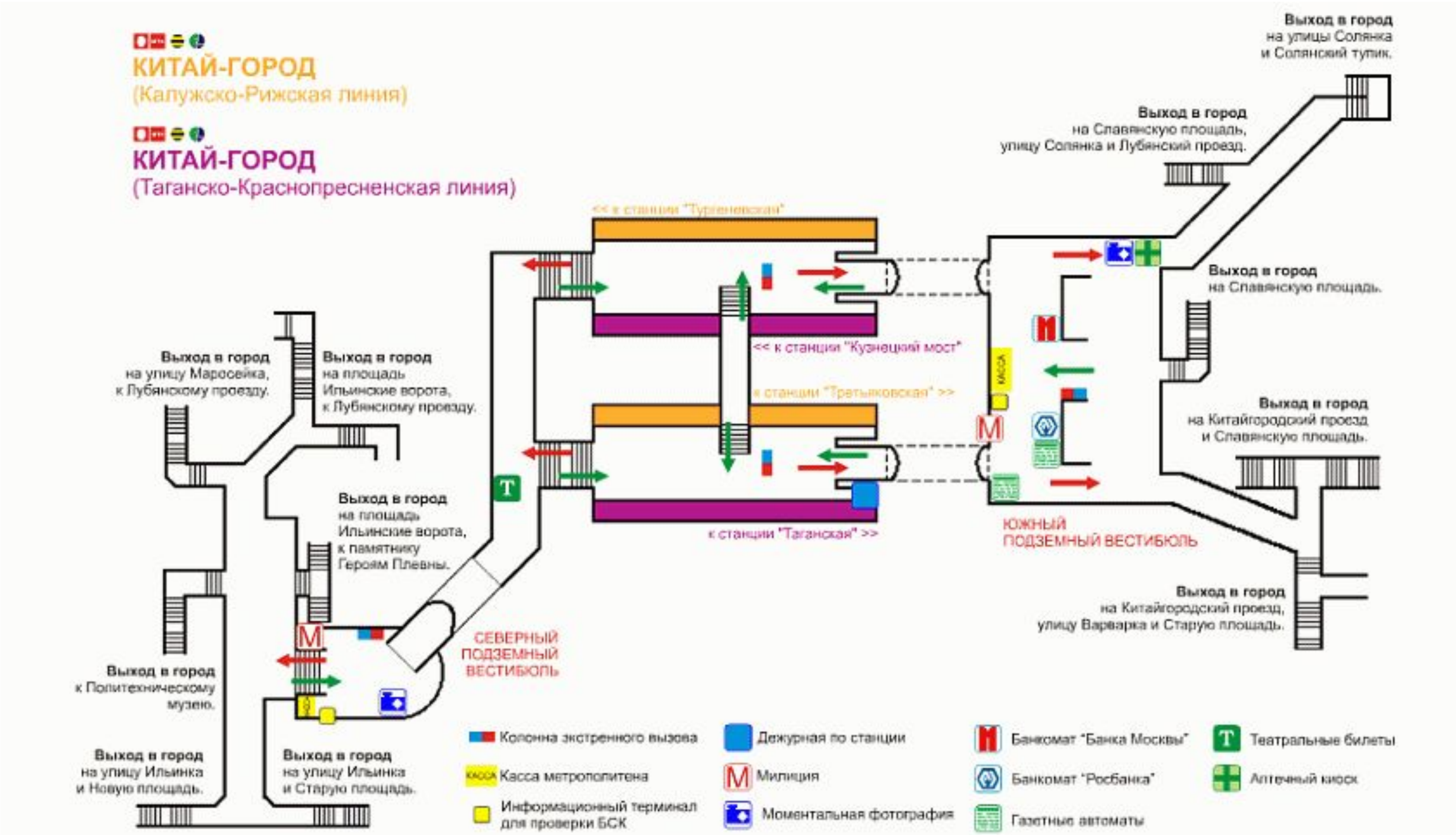



- Колонна экстренного вызова
- КАССА Касса метрополитена
- Информационный терминал для проверки БСК
- Дежурная по станции
- Милиция
- Аптечный киоск
- Мини-отделение "Банка Москвы"
- Банкомат "Росбанка"
- Моментальная фотография
- Театральные билеты
- Газетные автоматы


Выход в город
из подуличного перехода
на Сретенский бульвар,
Тургеневскую площадь
и улицу Мясницкая.
ТУРГЕНЕВСКАЯ
(Калужско-Рижская линия)
<< к станции «Китай-город»
КАССА
Выход в город
из подуличного перехода
на Тургеневскую площадь,
улицу Академика Сахарова,
Сретенский бульвар
и улицу Мясницкая.
Межстанционный
переход
к станции «Сухаревская» >>
СОВМЕЩЕННЫЙ
ПОДЗЕМНЫЙ
ВЕСТИБЮЛЬ
СРЕТЕНСКИЙ
БУЛЬВАР
(Люблинская линия)
Межстанционный
переход
<< к станции «Трубная»
<< к станции «Чкаловская»
ЧИСТЫЕ ПРУДЫ
(Сокольническая линия)
<< к станции «Лубянка»
Межстанционный
переход
к станции «Красные ворота» >>
КАССА
Выход в город
на улицу Мясницкая и
Чистопрудный бульвар.
НАЗЕМНЫЙ
ВЕСТИБЮЛЬ
Колонна экстренного вызова
Дежурная по станции
Банкомат "Банка Москвы"
КАССА Касса метрополитена
Милиция
Банкомат "Росбанка"
Информационный терминал
для проверки БСК
Газетные автоматы
Моментальная фотография
Театральные билеты

# АРБАТСКАЯ
## (Филёвская линия)




КИТАЙ-ГОРОД
(Калужско-Рижская линия)
КИТАЙ-ГОРОД
(Таганско-Краснопресненская линия)
<< к станции "Тургеневская"
<< к станции "Кузнецкий мост"
к станции "Третьяковская" >>
к станции "Таганская" >>
Выход в город на улицы Солянка и Солянский тупик.
Выход в город на Славянскую площадь, улицу Солянка и Лубянский проезд.
Выход в город на Славянскую площадь.
Выход в город на Китайгородский проезд и Славянскую площадь.
Выход в город на Китайгородский проезд, улицу Варварка и Старую площадь.
ЮЖНЫЙ ПОДЗЕМНЫЙ ВЕСТИБЮЛЬ
Выход в город на улицу Маросейка, к Лубянскому проезду.
Выход в город на площадь Ильинские ворота, к Лубянскому проезду.
Выход в город на площадь Ильинские ворота, к памятнику Героям Плевны.
СЕВЕРНЫЙ ПОДЗЕМНЫЙ ВЕСТИБЮЛЬ
Выход в город к Политехническому музею.
Выход в город на улицу Ильинка и Новую площадь.
Выход в город на улицу Ильинка и Старую площадь.
КАССА
Колонна экстренного вызова
Касса метрополитена
Информационный терминал для проверки БСК
Дежурная по станции
Милиция
Моментальная фотография
Банкомат "Банка Москвы"
Банкомат "Росбанка"
Газетные автоматы
Театральные билеты
Аптечный киоск

Примеры пакетов программ, позволяющих автоматизировать решение задач геометрического проектирования:

-**AutoCAD** - 3-х мерное и 2-х мерное проектирование, подготовка конструкторской документации.

-«**Компас**» - 2D и 3D моделирование, подготовка конструкторской документации в соответствии с ГОСТ.

-**SolidWorks** - 3D проектирование изделий (деталей и сборок) любой степени сложности с учётом специфики изготовления. Создание конструкторской документации в строгом соответствии с ГОСТ.

# Вопрос 3

## Задачи и методы топологического проектирования

**Топологическое проектирование** является наиболее сложным и ответственным этапом разработки конструкции ЭС. Оно позволяет определить топологическую структуру объекта с учетом всех необходимых функциональных связей между всеми функциональными узлами.

В качестве исходных данных при топологическом проектировании используются результаты решения задач как **схемотехнического**, так и **геометрического проектирования**. Результаты этого этапа во многом определяют функциональные (качественные и количественные) характеристики спроектированного устройства.

# Состав и взаимосвязь задач топологического

## Методы решения задач компоновки

Последовательный алгоритм, использующий матрицу смежности

Последовательный алгоритм, использующий матрицу цепей

Последовательно-итерационный алгоритм
Генетические алгоритмы

# Методы решения задач размещения

Последовательно-итерационный алгоритм размещения

Эвристический алгоритм, основанный на методе выделения «длинных» и «коротких» ребер

Последовательный алгоритм размещения однотипных элементов

Алгоритм, основанный на методе ветвей и границ

Алгоритм случайного поиска

Алгоритмы размещения соединений по слоям платы

# Методы решения задач трассировки

Алгоритмы формирования списка электрических соединений

Алгоритмы определения порядка проведения соединений

Волновой алгоритм

Алгоритм встречной волны

Волновой алгоритм соединения комплексов

Алгоритм минимального отклонения от соединительной линии

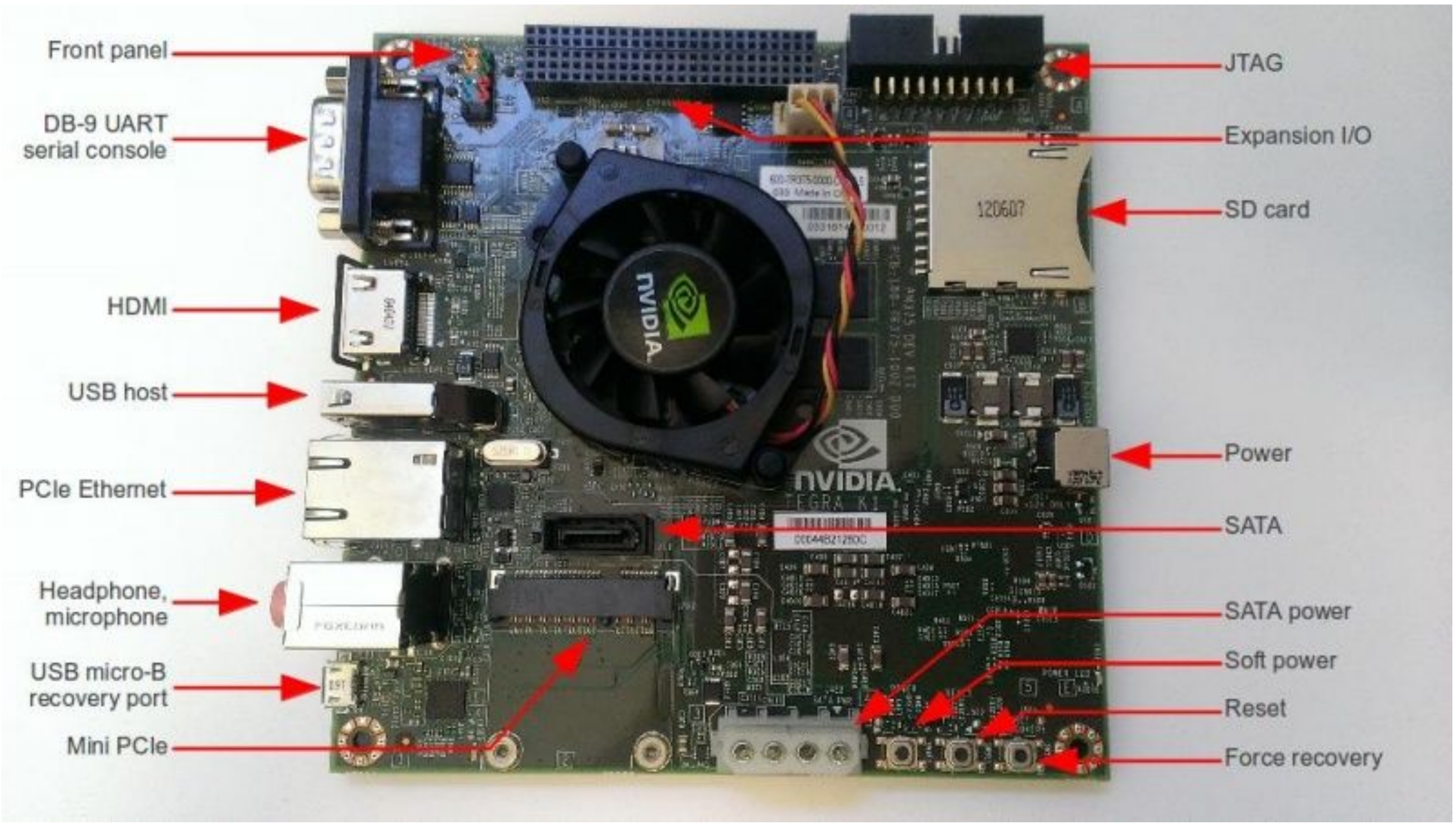
Алгоритм обхода занятых дискрет

Лучевой алгоритм

Волновой алгоритм трассировки многослойных печатных плат

Алгоритм Хейса

# Пример конструкции ЭС с характерными особенностями результатов топологического проектирования устройства коммутации (контролера):



Примеры пакетов программ, позволяющих автоматизировать решение задач топологического проектирования:

- **OrCAD** — пакет программ, предназначенный для автоматизации проектирования электронных приборов. Используется, в основном, для создания электронных моделей печатных плат, а также для разработки электронных схем и их моделирования.
- **Altium Designer** – пакет программ, разработанный фирмой Altium на основе и взамен пакетов P-CAD и Protel. Предназначен для разработки узлов на печатной плате с возможностью пространственного моделирования, схемотехнического моделирования электронных устройств, а так же для разработки конфигурационных кодов для ПЛИС.
- **TopoR** (Topological Router) – это высокопроизводительный топологический трассировщик печатных плат и высокоэффективный PCB-редактор. Отличительные свойства:
• высокая скорость и качество трассировки;
• набор инструментов, позволяющий существенно сокращать сроки разработки электронных устройств.
• вычисление экономной геометрической формы проводников по топологическим путям;
• перемещение компонентов на разведённой плате без потери имеющейся разводки.