Механико-математический факультет

Аналитическая геометрия, 1 семестр, 2 поток

Билеты

Москва
2024

Содержание

Билет 1. Векторные пространства и множества

1.1 Векторные пространства

Геометрические векторы в математике являются **свободными векторами** - классами эквивалентности направленных отрезков по уже известному нам отношению эквивалентности векторов.

Определение. Векторным (линейным) пространством (над полем $\mathbb{R}$) называется множество V с введенными на нем бинарными операциями "+": $V \times V \to V$ и "$*$": $\mathbb{R} \times V \to V$, отвечающие следующим свойствам (аксиомам):

$\forall \bar{a}, \bar{b}, \bar{c} \in V; \lambda, \mu \in \mathbb{R}:$

1. $\bar{a} + \bar{b} = \bar{b} + \bar{a}$ (коммутативность сложения);
2. $(\bar{a} + \bar{b}) + \bar{c} = \bar{a} + (\bar{b} + \bar{c})$ (ассоциативность сложения);
3. $\exists \bar{0} \in V : \bar{a} + \bar{0} = \bar{0} + \bar{a} = \bar{a}$ (существует нейтральный элемент по сложению - нулевой вектор);
4. $\exists (-\bar{a}) \in V : \bar{a} + (-\bar{a}) = (-\bar{a}) + \bar{a} = \bar{0}$ (существует противоположный элемент по сложению);
5. $\lambda(\mu\bar{a}) = (\lambda\mu)\bar{a}$ (ассоциативность умножения на числа);
6. $(\lambda + \mu)\bar{a} = \lambda\bar{a} + \mu\bar{a}$ (дистрибутивность по умножению);
7. $\lambda(\bar{a} + \bar{b}) = \lambda\bar{a} + \lambda\bar{b}$ (дистрибутивность по сложению);
8. $1 * \bar{a} = \bar{a}$.

Примеры. Векторные пр-ва:

- $\mathbb{R}, \mathbb{R}^2, \mathbb{R}^n$:
- Функции;
- Многочлены;
- Многочлены степени $\leqslant n$.

Замечание. Св-ва векторных пространств:

1. $\bar{0}$ единственный.

   Пусть $\bar{0}_1, \bar{0}_2$ - нулевые векторы.

   Тогда $\bar{0}_1 = \bar{0}_1 + \bar{0}_2 = \bar{0}_2$, ч.т.д.

2. $-\bar{a}$ единственный.

   Пусть $-\bar{a}_1, -\bar{a}_2$ - противоположные к $\bar{a}$ векторы.

   Тогда $-\bar{a}_1 = -\bar{a}_1 + \bar{0} = -\bar{a}_1 + (\bar{a} + -\bar{a}_2) = (-\bar{a}_1 + \bar{a}) + (-\bar{a}_2) = \bar{0} + (-\bar{a}_2) = -\bar{a}_2$, ч.т.д.

3. $\lambda * \bar{0} = \bar{0}$.

   $\lambda * \bar{0} = \lambda * (\bar{0} + \bar{0}) = \lambda * \bar{0} + \lambda * \bar{0}$

   Прибавив к обеим частям вектор, противоположный к $\lambda * \bar{0}$, получим $\lambda * \bar{0} = \bar{0}$, ч.т.д.

4. $-(\lambda\bar{a}) = (-\lambda)\bar{a} = \lambda(-\bar{a})$.

   Нетрудно видеть, что все три вектора противоположны $\lambda\bar{a}$, а далее из п.2.

5. $-\bar{a} = -1 * \bar{a}$

   Следует из п.4.

6. $\lambda\bar{a} = \bar{0} \Leftrightarrow$ либо $\lambda = 0$, либо $\bar{a} = \bar{0}$.

   Либо $\lambda = 0$, либо $\lambda \neq 0 \Rightarrow \frac{1}{\lambda} * \lambda * \bar{a} = \frac{1}{\lambda}\bar{0} = \bar{0} \Rightarrow \bar{a} = \bar{0}$, ч.т.д.

1.2 Линейная комбинация векторов

Определение. Сумма вида $\lambda_1\bar{x}_1 + ... + \lambda_n\bar{x}_n$ называется линейной комбинацией векторов $\bar{x}_1 ... \bar{x}_n$.

Определение. Если в линейной комбинации $\lambda_1 = ... = \lambda_n = 0$, то она называется тривиальной, а иначе - нетривиальной.

Определение. Если вектор $\bar{x}$ равен линейной комбинации $\lambda_1\bar{x}_1 + ... + \lambda_n\bar{x}_n$, то говорят, что он линейно выражается (раскладывается) через векторы $\bar{x}_1 ... \bar{x}_n$. (Сама линейная комбинация $\lambda_1\bar{x}_1 + ... + \lambda_n\bar{x}_n$ называется выражением (разложением) вектора $\bar{x}$ через $\bar{x}_1 ... \bar{x}_n$)

1.3 Линейно зависимые и линейно независимые множества и системы векторов

Определение. Упорядоченное множество векторов называется системой векторов. (В системе векторов элементы могут повторяться)

Определение. Множество векторов называется линейно зависимым, если существует равная нулю нетривиальная линейная комбинация векторов из этого множества. В противном случае оно называется линейно независимым.

Пример. Система из двух векторов $\bar{a}, \bar{b}$ линейно зависима $\Leftrightarrow \bar{a} = \lambda\bar{b}$.

Замечание. Множество векторов линейно зависимо $\Leftrightarrow$ один из векторов этого множества линейно выражается через некоторые другие векторы этого множества.

1.4 Полные множества и системы векторов

Определение. Множество (система) векторов из векторного пространства V называется полным(полной) в V, если любой вектор $\bar{x} \in V$ линейно выражается через векторы этого множества.

Замечание. $X \subset V$ полно в $V \Rightarrow \forall Y : X \subset Y$ полно в V.

Замечание. $X \subset V$ линейно независимо в $V \Rightarrow \forall Y \subset X$ линейно независимо в V.

Билет 2. Базис и размерность векторного пространства

2.1 Базис векторного пространства. Конечномерное векторное пространство.

Определение. Множество векторов E в векторном пространстве V называется базисом V, если E линейно независимо и полно в V.

Определение. Векторное пространство, в котором существует конечный (состоящий из конечного числа векторов) базис, называется конечномерным. В противном случае оно называется бесконечномерным.

2.2 Лемма о количестве векторов в ЛНЗ системе (аналог ОЛЛЗ)

Лемма. Если X - конечное полное множество из n векторов в векторном пространстве V и Y - линейно независимое множество векторов в V, то Y конечно и число векторов в $Y \leqslant n$.

Доказательство. (пер.) Произвольно занумеруем векторы в $X : (\bar{x}_1, ..., \bar{x}_n)$. Будем по одному добавлять в эту систему векторы из Y и одновременно выкидывать векторы из X так, чтобы система оставалась полной.

Пусть за k шагов ($0 \leqslant k \leqslant n$) мы добавили некоторые $\bar{y_1}, ..., \bar{y_k}$ и выкинули какие-то k векторов из X - осталась система $(\bar{y_1}, ..., \bar{y_k}, \bar{x}_{i_1}, ..., \bar{x}_{i_{n-k}})$. Возьмём $\bar{y}_{k+1}$ из Y (если такого нет, то в $Y \leqslant n$ векторов, что нам и нужно), и добавим его в систему. Так как до этого система оставалась полной, $\bar{y}_{k+1}$ выражается через $(\bar{y_1}, ..., \bar{y_k}, \bar{x}_{i_1}, ..., \bar{x}_{i_{n-k}})$, причём какой-то $\bar{x}_{i_j}$ входит в это разложение с коэффициентом, не равным нулю (иначе противоречие с линейной независимостью Y - $\bar{y}_{k+1}$ выразился через $\bar{y_1}, ..., \bar{y_k}$).

Тогда $\bar{x}_{i_j}$ выражается через другие векторы системы и $\bar{y}_{k+1}$ (в выражении $\bar{y}_{k+1}$ перенесём всё, кроме $\bar{x}_{i_j}$ в другую часть и разделим на коэффициент перед ним). А так как $(\bar{y_1}, ..., \bar{y_{k+1}}, \bar{x}_{i_1}, ..., \bar{x}_{i_{n-k}})$ - полная, эта же система без $\bar{x}_{i_j}$. очевидно, останется полной.

Пусть смогли проделать n таких шагов. Тогда имеем систему $(\bar{y_1}, ..., \bar{y_n})$. Если в Y есть ещё векторы, то они с одной стороны выражаются через векторы системы из её полноты, а с другой - не выражаются через них из линейной независимости Y. Противоречие, т.е. в Y не может оказаться больше n векторов, ч.т.д. □

2.3 Теорема о количестве векторов в базисе. Размерность векторного пространства.

Теорема. Если в векторном пространстве есть конечный базис, то все базисы в нём конечны и содержат одинаковое количество векторов.

Доказательство. Пусть $\bar{e}_1, ..., \bar{e}_n$ - конечный базис в V. Любой другой базис V линейно независим, т.е. по лемме содержит $k \leqslant n$ векторов, а с другой стороны полон, т.е. первый базис по лемме содержит $n \leqslant k$ векторов. Отсюда $n = k$, ч.т.д. □

Определение. Количество векторов в любом базисе векторного пространства V называется размерностью V и обозначается $dimV$.

Примеры. $dim\ \bar{0} = 0, dim\ \pi (= dim\ \mathbb{R}^2) = 2, dim\ \mathbb{R}^3 = 3.$

Билет 3. Координаты в базисе

3.1 Однозначность выражения вектора в конечномерном в. п. через базис

Теорема. В конечномерном векторном пространстве выражение любого вектора через базис определяется однозначно.

3.2 Координаты вектора в базисе

Доказательство. Если $\bar{x} = \lambda_1\bar{e}_1 + ... + \lambda_n\bar{e}_n = \lambda'_1\bar{e}_1 + ... + \lambda'_n\bar{e}_n$, то $\bar{x} - \bar{x} = \bar{0} = (\lambda_1 - \lambda'_1)\bar{e}_1 + ... + (\lambda_n - \lambda'_n)\bar{e}_n$. Если эти два разложения различны, то равная нулю линейная комбинация базисных векторов нетривиальна, что противоречит линейной независимости базиса. То есть двух различных разложений быть не может, ч.т.д. □

Определение. Пусть V - конечномерное векторное пространство и $\bar{e}_1, ..., \bar{e}_n$ - базис в нём. Коэффициенты $\lambda_1, ..., \lambda_n$ в выражении любого вектора $x \in V$ через эти базисные векторы называются координатами вектора x в базисе $\bar{e}_1, ..., \bar{e}_n$. ($\lambda_k$ называется k-й координатой)

Замечание. Векторы в n-мерном векторном пространстве находятся во взаимно однозначном соответствии с упорядоченной строкой из n чисел из $\mathbb{R}$ (например, векторы ассоциированного с евклидовой плоскостью векторного пространства соответствуют парам чисел) Таким образом можно задать операции сложения и умножения на число векторов плоскости через операции над числами, проводимыми покоординатно.

Билет 4. Аффинные пространства

4.1 Аффинное пространство

Элементы плоскости (как множества) - точки, а не векторы, поэтому для работы непосредственно с плоскостью необходимо ввести данное определение.

Определение. Аффинное пространство - тройка $(X, V, +)$ (обычно обозначается $\mathbb{A}$), где X - множество (точек), V - векторное пространство, а $''+''$ операция: $X \times V \to X$, для которых выполнены аксиомы:

1. $\forall A \in X, \forall \bar{a}, \bar{b} \in V : A + (\bar{a} + \bar{b}) = (A + \bar{a}) + \bar{b}$;
2. $\forall A \in X : A + \bar{0} = A$;
3. $\forall A, B \in X \ \ \exists! \ \bar{a} \in V : A + \bar{a} = B$. Обозначается $\bar{a} = \overrightarrow{AB}$.

4.2 Радиус-векторы и репер

Если зафиксировать какую-нибудь точку $O \in X$, возникает взаимно однозначное соответствие между точками A и их радиус-векторами $\overrightarrow{OA}$.

Определение. Репер (система координат) в аффинном пространстве $(X, V, +)$ - пара (O, E), где $O \in X$ и E - базис в V. Точка O называется началом координат (отсчёта). Координаты точки A в (O, E) - координаты её радиус-вектора $\overrightarrow{OA}$ в базисе E.

Замечание. Для аффинного пространства верно:

1. Если $A = (x_1, ..., x_n), \bar{a} = (y_1, ..., y_n)$, то $A + \bar{a} = (x_1 + y_1, ..., x_n + y_n)$.
2. Если $A = (a_1, ..., a_n), B = (b_1, ..., b_n)$, то $\overrightarrow{AB} = (b_1 - a_1, ..., b_n - a_n)$.

(Следует из сложения векторов)

4.3 Конечномерное аффинные пространства и их размерность

Определение. Если $\mathbb{A} = (X, V, +)$ - аффинное пространство, то говорят, что V - векторное пространство, ассоциированное с $\mathbb{A}$.

Определение. $\mathbb{A}$ называется конечномерным, если ассоциированное с ним V конечномерно. В этом случае $dim\mathbb{A}$ (размерность $\mathbb{A}$) равна $dimV$.

Теперь точки аффинного пространства аналогично векторам можно ассоциировать с наборами чисел. Однако для ассоциирования евклидовой плоскости и её аксиом с двумерным аффинным пространством, необходимы отвечающие аксиомам понятия прямой и расстояния.

Билет 5. Подпространства

5.1 Векторное подпространство

Определение. Векторным подпространством векторного пространства V называется непустое множество $V_1 \subset V$ такое. что $\forall \bar{x}, \bar{y} \in V_1 : \bar{x} + \bar{y} \in V_1, \lambda\bar{x} \in V_1 (\forall \lambda \in \mathbb{R})$.

Замечание. Определение эквивалентно следующему: множество $V_1 \subset V$ - векторное подпространство V, если V_1 является векторным пространством относительно операций $+$ и $*$, определённых для V. (Доказательство осуществляется путём прямой проверки аксиом векторного пространства для V_1)

5.2 Аффинное подпространство

Введём несколько определений аффинного подпространства и докажем их эквивалентность.

Определение. Аффинным подпространством аффинного пространства $\mathbb{A} = (X, V, +)$ называется

1. его непустое подмножество вида $A+V_1 = A + \bar{a} : \bar{a} \in V_1$, где V_1 - векторное подпространство V и $A \in X$ - точка;

2. тройка $(X_1 \subset X, V_1 \subset V, +_1)$, где V_1 - векторное подпространство V и операция $+_1 = +$, для которой $\forall A, B \in X_1, \forall \bar{a} \in V_1 : A + \bar{a} \in X_1, \overrightarrow{AB} \in V_1$;

3. тройка $(X_1 \subset X, V_1 \subset V, +_1)$, где V_1 - векторное подпространство V и операция $+_1 = +$, которая сама является аффинным пространством.

Утверждение. Приведённые определения эквивалентны.

Доказательство. Докажем следующие следствия:

1 $\Rightarrow$ 2 Пусть $P = A + \bar{a}, Q = A + \bar{b}$. Тогда $\overrightarrow{PQ} = \bar{b} - \bar{a}$ (в силу единственности такого вектора), т.е. $\overrightarrow{PQ} \in V_1$. Второе необходимое свойство 2 очевидно выполнено.

2 $\Rightarrow$ 1 Пусть X_1, V_1 удовлетворяют 2. Зафиксируем произвольную $A \in X_1$. $\forall B \in X_1$ имеем $B = A + \overrightarrow{AB}$, причём $A \in X_1, \overrightarrow{AB} \in V_1 \Rightarrow B \in X_1$.

Эквивалентность 2 $\Leftrightarrow$ 3 очевидна из определения аффинного пространства. $\square$

5.3 Прямая в аффинном пространстве

Определение. Прямая в аффинном пространстве - его одномерное аффинное подпространство.
Плоскость (двумерная) в аффинном пространстве - его двумерное аффинное подпространство.

Определение. Единственный вектор в любом базисе векторного пространства, ассоциированного с одномерным аффинным пространством, называется направляющим вектором этого аффинного пространства.

Билет 6. Скалярное произведение

6.1 Скалярное произведение

Определение. Пусть V - векторное пространство. Скалярным произведением в V называется функция $(\ ,\ ) : V \times V \to \mathbb{R}$ со свойствами:

1. $(\bar{x}, \bar{x}) \geqslant 0\ \forall \bar{x} \in V$, причём $(\bar{x}, \bar{x}) = 0 \Leftrightarrow \bar{x} = \bar{0}$ (положительная определённость);

2. $(\bar{x}, \bar{y}) = (\bar{y}, \bar{x})\ \forall \bar{x}, \bar{y} \in V$ (коммутативность);

3. $(\alpha\bar{x}+\beta\bar{y}, \bar{z}) = \alpha(\bar{x}, \bar{z})+\beta(\bar{y}, \bar{z})\ \forall \bar{x}, \bar{y}, \bar{z} \in V, \alpha, \beta \in \mathbb{R}$ (линейность по первому аргументу)

Из коммутативности выполнена и линейность по второму аргументу, т.е. скалярное произведение - билинейная функция.

6.2 Евклидово векторное и точечно-евклидово аффинное пространство

Определение. Конечномерное аффинное (векторное) пространство вместе со скалярным произведением называется точечно-евклидовым (евклидовым) пространством. Двумерное точечно-евклидово пространство называется евклидовой плоскостью.

6.3 Длина вектора и расстояния между точками

Определение. Длиной вектора называется величина $\sqrt{(\bar{x}, \bar{x})}$.

Определение. Расстоянием (евклидовым) между точками $A, B \in \mathbb{A}$ называется длина вектора $\overrightarrow{AB}$. Будем обозначать $d(A, B)$ как $|\overrightarrow{AB}|$.

6.4 Выражение скалярного произведения через длины

Замечание. Зная длины всех векторов, скалярное произведение можно восстановить по формуле $(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{2}(|\bar{x}+\bar{y}|^2 - |\bar{x}|^2 - |\bar{y}|^2)$. Это несложно проверить: $\frac{1}{2}(|\bar{x}+\bar{y}|^2 - |\bar{x}|^2 - |\bar{y}|^2) = \frac{1}{2}((\bar{x}+\bar{y}, \bar{x}+\bar{y}) - (\bar{x}, \bar{x}) - (\bar{y}, \bar{y})) = \frac{1}{2}(2(\bar{x}, \bar{y})) = (\bar{x}, \bar{y})$.

Билет 7. Неравенство Коши-Буняковского

7.1 Неравенство Коши-Буняковского

Теорема (Неравенство Коши-Буняковского). $\forall \bar{a}, \bar{b} \in V \quad (\bar{a}, \bar{b}) \leqslant \sqrt{(\bar{a}, \bar{a})(\bar{b}, \bar{b})}$, причём равенство достигается только при $\bar{a} = \lambda \bar{b}$.

Доказательство. Рассмотрим выражение $(\bar{a}+t\bar{b}, \bar{a}+t\bar{b})$. Оно равно нулю $\Leftrightarrow \bar{a} = -t\bar{b}$, т.е. может быть равно нулю не более чем при одном t. С другой стороны $(\bar{a} + t\bar{b}, \bar{a} + t\bar{b}) = (\bar{a}, \bar{a}) + 2(\bar{a}, \bar{b})t + (\bar{b}, \bar{b})t^2$ - квадратный трёхчлен относительно t. Его дискриминант равен $4(\bar{a}, \bar{b})^2 - 4(\bar{a}, \bar{a})(\bar{b}, \bar{b})$, а из первого рассуждения знаем, что дискриминант $\leqslant 0$, причём равенство достигается только в случае коллинеарности $\bar{a}$ и $\bar{b}$. Отсюда $(\bar{a}, \bar{b}) \leqslant \sqrt{(\bar{a}, \bar{a})(\bar{b}, \bar{b})}$, ч.т.д. □

7.2 Величина угла и ортогональные векторы

Определение. Величиной угла между ненулевыми векторами $\bar{a}, \bar{b}$ называется число $arccos\frac{(\bar{a},\bar{b})}{|\bar{a}||\bar{b}|}$ (из н. Коши-Буняковского $|\frac{(\bar{a},\bar{b})}{|\bar{a}||\bar{b}|}| \leqslant 1$).

Определение. Векторы $\bar{a}, \bar{b}$ называются ортогональными (перпендикулярными), если $(\bar{a}, \bar{b}) = 0$.

Билет 8. Прямоугольная система координат

8.1 Ортонормированный базис и прямоугольная система координат

Определение. Базис векторного пространства V со скалярным произведением называется ортонормированным, если все его векторы попарно ортогональны и имеют длину 1.

Определение. Система координат в точечно-евклидовом пространстве называется прямоугольной, если её базис ортонормированный.

8.2 Выражение скалярного произведения через координаты векторов

Утверждение. В точечно-евклидовом пространстве верно следующее выражение скалярного произведения через координаты векторов: если в некотором базисе $(\bar{e}_1, ..., \bar{e}_n)$ $\bar{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \bar{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$, то $(\bar{x}, \bar{y}) = \sum\limits_{i=1}^{n} x_i \cdot \sum\limits_{j=1}^{n} y_j (\bar{e}_i, \bar{e}_j)$.

Доказательство. $(\bar{x}, \bar{y}) = (x_1\bar{e}_1 + ... + x_n\bar{e}_n, y_1\bar{e}_1 + ... + y_n\bar{e}_n) = \sum\limits_{i=1}^{n}(x_i\bar{e}_i, y_1\bar{e}_1 + ... + y_n\bar{e}_n) = \sum\limits_{i=1}^{n} x_i(\bar{e}_i, y_1\bar{e}_1 + ... + y_n\bar{e}_n) = \sum\limits_{i=1}^{n} x_i \cdot \sum\limits_{j=1}^{n} y_j(\bar{e}_i, \bar{e}_j)$ □

8.3 Выражение для прямоугольной системы координат

Замечание. В случае, когда базис ортонормированный, имеем $(e_i, e_j) = \delta_{ij}$, т.е. $(\bar{x}, \bar{y}) = x_1y_1 + ... + x_ny_n$. То есть в прямоугольной системе координат длина вектора вычисляется по формуле $|\bar{x}| = \sqrt{x_1^2 + ... + x_n^2}$, а расстояние между точками $P = (x_1, ..., x_n), Q = (y_1, ..., y_n)$ выражается как $|PQ| = |\overrightarrow{PQ}| = \sqrt{(y_1 - x_1)^2 + ... + (y_n - x_n)^2}$.

Билет 9. Проектирование

Определение. Пусть задано два векторных подпространства V_1, V_2 векторного пространства V такие, что $V_1 \cap V_2 = \{\bar{0}\}$ и $V_1 + V_2 = V$ (обозначается $V = V_1 \oplus V_2$). Тогда сумма $\bar{x} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$, где $\bar{x} \in V, \bar{x}_1 \in V_1, \bar{x}_2 \in V_2$, определена единственно. (Следует, например, из того, что в любом базисе V каждый его вектор лежит либо в V_1, либо в V_2, тогда разложение в эту сумму соответствует единственному разложению по базису). Проекцией вектора $\bar{x} \in V$ на V_1 параллельно V_2 называется слагаемое $\bar{x}_1$ этой суммы.

Определение. Пусть задано два аффинных подпространства $\mathbb{A}_1 = (X_1, V_1, +)$, $\mathbb{A}_2 = (X_2, V_2, +)$ аффинного пространства $\mathbb{A} = (X, V, +)$ такие, что $V = V_1 \oplus V_2$. Проекция точки $P \in \mathbb{A}$ на $\mathbb{A}_1$ параллельно $\mathbb{A}_2$ - точка $P_1 = A_1 + \bar{v}$, где A_1 - произвольная точка из X_1, а $\bar{v}$ - проекция $\overrightarrow{A_1P}$ на V_1 параллельно V_2. (Очевидно, что от выбора A_1 расположение проеции не зависит)

Пример. Рассмотрим координаты точки евклидовой плоскости относительно прямоугольной системы координат.
Найдём проекцию точки $A = (x, y)$ на прямую Oy параллельно прямой Ox. По определению это точка (назовём её A_y), равная $O + \bar{v}$, где $\bar{v}$ - проекция $\overrightarrow{OP}$ на векторное пространство прямой Oy параллельно Ox. $\overrightarrow{OP} = \{x, y\} = x\bar{e}_1 + y\bar{e}_2$. Отсюда $\bar{v} = y\bar{e}_2 = \{0, y\}$, то есть $A_y = (0, y)$. Аналогично $A_x = (x, 0)$.

Билет 10. Ортонормированный базис

Определение смотри в пункте 8.1 Пусть $\mathbb{A}^n = (X, V^n, +)$ - n-мерное точечно-евклидово пространство.

10.1 Линейная независимость ортогональных векторов

Утверждение. В V^n любая линейно независимая система из n векторов образует базис.

Доказательство. Предположим, что в V^n существует неполная линейно независимая система из n векторов. Т.к. система не полная, существует вектор из V^n, не выражающийся через векторы этой системы, т.е. этот вектор можно добавить в систему без потери линейной независимости. Но по лемме-аналогу ОЛЛЗ линейно независимая система в V^n не может иметь $> n$ векторов. Противоречие, т.е. любая линейно независимая система из n векторов является полной, а значит и базисом, ч.т.д. □

Утверждение. Если $\bar{e}_1, ..., \bar{e}_n$ - попарно ортогональные ненулевые векторы в евклидовом пространстве, то $\bar{e}_1, ..., \bar{e}_n$ линейно независимы.

Доказательство. Предположим противное. Пусть один из векторов (без ограничения общности $\bar{e}_n$) линейно выражается через остальные: $\bar{e}_n = \lambda_1\bar{e}_1 + ... + \lambda_{n-1}\bar{e}_{n-1}$. Тогда запишем квадрат его длины: $|\bar{e}_n|^2 = (\bar{e}_n, \bar{e}_n) = (\bar{e}_n, \lambda_1\bar{e}_1 + ... + \lambda_{n-1}\bar{e}_{n-1}) = \sum\limits_{i=1}^{n-1} \lambda_i(\bar{e}_n, \bar{e}_i) = 0$ (т.к. $\bar{e}_n$ ортогонален всем остальным векторам). Отсюда $|\bar{e}_n| = 0$, и притом $\bar{e}_n$ ненулевой. Противоречие, т.е. никакой вектор системы не выражается через остальные, а значит система линейно независима. ч.т.д. □

10.2 Теорема о существовании ортонормированного базиса

Теорема. В любом евклидовом пространстве существует ортонормированный базис.

Доказательство. (пер.) Индукция по n - размерности пространства:

База: $n = 1$ - очевидно, что существует вектор длины 1, который составляет ортонормированный базис одномерного пространства;

Шаг: Пусть в любом n-мерном пространстве существует ортонормированный базис. Рассмотрим пространство V размерности $n + 1$ и выберем базис

какого-то n-мерного подпространства W (пусть $(\bar{e}_1, ..., \bar{e}_n)$). Найдём вектор, ортогональный всем выбранным векторам. Так как базис W не полон в V, к нему можно добавить ещё один вектор $x \in V$ без потери линейной независимости $\Rightarrow$ $(\bar{e}_1, ..., \bar{e}_n, \bar{x})$ - базис в V (ЛНЗ система из $n+1$ векторов).
Теперь необходимо представить $\bar{x}$ как следующую сумму: $\bar{x} = \lambda_1\bar{e}_1 + ... + \lambda_n\bar{e}_n + \bar{e}_{n+1}$, где $\bar{e}_{n+1}$ ортогонален $\bar{e}_1, ..., \bar{e}_n$. Тогда $\bar{e}_{n+1} = \bar{x} - \lambda_1\bar{e}_1 - ... - \lambda_n\bar{e}_n$. Рассмотрим $(\bar{e}_{n+1}, \bar{e}_k) = (\bar{x} - \lambda_1\bar{e}_1 - ... - \lambda_n\bar{e}_n, \bar{e}_k) = (\bar{x}, \bar{e}_k) - \lambda_1(\bar{e}_1, \bar{e}_k) - ... - \lambda_n(\bar{e}_n, \bar{e}_k)$. Так как $\bar{e}_k$ ортогонально всем этим векторам, кроме $\bar{e}_k$ и $\bar{x}$, это выражение равно $(\bar{x}, \bar{e}_k) - \lambda_k(\bar{e}_k, \bar{e}_k)$. Отсюда при $\lambda_k = \frac{(\bar{x}, \bar{e}_k)}{(\bar{e}_k, \bar{e}_k)}$ векторы $\bar{e}_{n+1}$ и $\bar{e}_k$ ортогональны (зависит только от λ_k). Составив таким образом все $\lambda_1, ..., \lambda_n$, получим выражение вектора $\bar{e}_{n+1}$, ортогонального всем векторам базиса W. Таким образом, векторы полученной системы $\bar{e}_1, ..., \bar{e}_{n+1}$ попарно ортогональны (по предположению индукции) $\Rightarrow$ линейно независимы $\Rightarrow$ образуют базис в V. Разделив $\bar{e}_{n+1}$ на его длину, получим, что все векторы базиса попарно ортогональны и имеют длину $1 \Rightarrow V$ имеет ортонормированный базис, ч.т.д. $\square$

Следствие. Любую систему ортогональных векторов длины 1 в векторном пространстве можно дополнить до ортонормированного базиса.

Билет 11. Прямые и их уравнения

11.1 Определения прямой и направляющего вектора

Смотри пункт 5.3

11.2 Уравнения прямой

Вывод формул (**уравнения прямой**). Пусть l - прямая на плоскости: $l = \{X : \overrightarrow{OX} = \overrightarrow{OM} + t\bar{v}\}$, где M - точка прямой, $\bar{v}$ - её направляющий вектор. Если $M = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}, \bar{v} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$, то из совпадения координат совпадающих векторов $\overrightarrow{OX}$ и $(\overrightarrow{OM} + t\bar{v})$ верно следующее: (**параметрические уравнения прямой**)

$$\boxed{X \in l : \begin{cases} x = x_0 + at \\ y = y_0 + bt \end{cases}}$$

Выразим t из первого уравнения и подставим во второе уравнение - получим

каноническое уравнение прямой:

$$\boxed{\frac{x-x_0}{a}=\frac{y-y_0}{b}}$$

(Заметим, что данное выражение не определено при нулевых a или b, но очевидно, что они не равны нулю одновременно, а запись, где одна из дробей имеет знаменатель 0, иногда используется, поэтому здесь и далее случай равенства нулю знаменателя может не рассматриваться как отдельный и будет означать, что числитель должен равняться 0)

Если известно, что прямой принадлежат $M=\begin{pmatrix}x_0\\y_0\end{pmatrix}, N=\begin{pmatrix}x_1\\y_1\end{pmatrix}$, то $\overrightarrow{MN}=\begin{pmatrix}x_1-x_0\\y_1-y_0\end{pmatrix}$ - направляющий вектор, т.е. каноническое уравнение имеет вид

$$\boxed{\frac{x-x_0}{x_1-x_0}=\frac{y-y_0}{y_1-y_0}}$$

(**уравнение прямой по двум точкам**).

Домножим каноническое уравнение прямой на знаменатели: $\frac{x-x_0}{a}=\frac{y-y_0}{b}\Rightarrow bx-bx_0=ay-ay_0\Rightarrow bx-ay+(ay_0-bx_0)=0$. Такое уравнение обычно называют **общим уравнением прямой** и записывают как

$$\boxed{Ax+By+C=0}$$

Замечание. Для прямых в пространстве подобным образом выводятся параметрические и каноническое уравнения.

Замечание. Заметим также, что из итоговой формулы вывода общего уравнения ($bx-ay+(ay_0-bx_0)=0\Rightarrow Ax+By+C=0$) следует, что для прямой $Ax+By+C=0$ вектор $(B,-A)$ (а соответственно и $(-B,A)$) является направляющим.

11.3 Критерий уравнения прямой (нет в билете, важно)

Утверждение. $Ax+By+C=0$ является уравнением прямой $\Leftrightarrow$ A и B не равны нулю одновременно.

Доказательство.

$\Rightarrow$ Если $Ax+By+C=0$, то её направляющий вектор ненулевой, а значит вектор $(-B,A)$ ненулевой, то есть одна из его координат $\neq 0$.

$\Leftarrow$ Пусть без ограничения общности $A \neq 0$. Тогда этому уравнению удовлетворяет точка $(x_0, y_0) = (-\frac{C}{A}, 0)$, а значит (нетрудно проверить) все удовлетворяющие ему точки имеют вид $(x_0 + Bt, y_0 - At)$, что соответствует прямой с такими параметрическими уравнениями. $\square$

Билет 12. Взаимное расположение прямых

12.1 Случай общих уравнений

Теорема. Прямые на плоскости параллельны (или совпадают) $\Leftrightarrow$ их направляющие векторы пропорциональны.

Доказательство. Пусть $l_1 : A_1x + B_1y + C_1 = 0; l_2 : A_2x + B_2y + C_2 = 0$ - данные прямые. Рассмотрим систему уравнений, которой удовлетворяют координаты точек, принадлежащих обоим прямым: $\begin{cases} A_1x + B_1y = -C_1 \\ A_2x + B_2y = -C_2 \end{cases}$

Из курса алгебры (форумла Крамера) известно, что система не является определённой $\Leftrightarrow det \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{pmatrix} = 0$. Таким образом, прямые параллельны или совпадают $\Leftrightarrow$ имеют 0 или бесконечно много общих точек $\Leftrightarrow A_1B_2 - A_2B_1 = 0 \Leftrightarrow$ $\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix}$ пропорционален $\begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix}$, ч.т.д. $\square$

Замечание. Из этого также видно, что прямые совпадают $\Leftrightarrow \frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{C_1}{C_2}$.

12.2 Случай параметрических уравнений

Следствие. Прямые $l_1 : \begin{cases} x = x_1 + a_1t \\ y = y_1 + b_1t \end{cases}; l_2 : \begin{cases} x = x_2 + a_2t \\ y = y_2 + b_2t \end{cases}$ пересекаются $\Leftrightarrow \frac{a_1}{a_2} \neq \frac{b_1}{b_2}$. Условие совпадения прямых также можно записать через параметрические уравнения (вектор $(x_2 - x_1 \; y_2 - y_1) = \lambda(a, b)$).

Из этого также следует, что через две различные точки проходит ровно одна прямая (все такие прямые совпадают).

Билет 13. Пучки прямых

13.1 Определение пучка прямых

Определение. Собственным пучком прямых называется множество всех прямых, проходящих через данную точку, называемую центром пучка.

Несобственным пучком прямых называется множество всех прямых, параллельных данной прямой.

13.2 Уравнение собственного пучка прямых

Теорема. Пусть прямые $l_1 : A_1x + B_1y + C_1 = 0$ и $l_2 : A_2x + B_2y + C_2 = 0$ задают собственный пучок (т.е. содержатся в нём и не совпадают). Тогда прямая l принадлежит пучку $\Leftrightarrow$ l задаётся уравнением $\lambda(A_1x + B_1y + C_1) + \mu(A_2x + B_2y + C_2) = 0$ $(*)$ для некоторых $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$.

Доказательство.
$\Leftarrow$ Пусть l задаётся уравнением $(*)$. Тогда, подставив в уравнение l центр пучка (x_0, y_0), получим $\lambda(0) + \mu(0) = 0$ (т.к. центр удовлетворяет уравнениям l_1, l_2).
$\Rightarrow$ Пусть $(x_0, y_0) \in l$. Возьмём произвольную точку $(x_1, y_1) \in l, (x_1, y_1) \neq (x_0, y_0)$. Рассмотрим прямую вида $(*)$ с $\lambda = -(A_2x_1 + B_2y_1 + C_2),\ \mu = (A_1x_1 + B_1y_1 + C_1) : -(A_2x_1 + B_2y_1 + C_2)(A_1x + B_1y + C_1) + (A_1x_1 + B_1y_1 + C_1)(A_2x + B_2y + C_2) = 0$. Заметим, что это уравнение действительно задаёт прямую: в противном случае необходимы условия $\lambda A_1 + \mu A_2 = \lambda B_1 + \mu B_2 = 0$, но тогда (A_1, B_1) и (A_2, B_2) пропорциональны, а исходные прямые непараллельны. Такой прямой, очевидно, принадлежат точки (x_0, y_0) и (x_1, y_1). Так как через две различные точки проходит ровно одна прямая, любая прямая из собственного пучка имеет вид $(*)$, ч.т.д. □

13.3 Уравнение несобственного пучка прямых

Теорема. Пусть прямые $l_1 : A_1x+B_1y+C_1 = 0$ и $l_2 : A_2x+B_2y+C_2 = 0$ задают несобственный пучок (т.е. содержатся в нём и не совпадают). Тогда прямая l принадлежит пучку $\Leftrightarrow$ l задаётся уравнением $\lambda(A_1x+B_1y+C_1)+\mu(A_2x+B_2y+C_2) = 0$ $(*)$ для некоторых $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$.

Доказательство.
$\Leftarrow$ Так как $l_1 \parallel l_2$, $\frac{A_1}{B_1} = \frac{A_2}{B_2}$. Тогда если l имеет вид $(*)$, то $\frac{\lambda A_1+\mu A_2}{A_1} = \lambda + \frac{\mu A_2}{A_1} = \lambda + \frac{\mu B_2}{B_1} = \frac{\lambda B_1 \mu B_2}{B_1} \Rightarrow l \parallel l_1$.
$\Rightarrow$ Пусть l принадлежит пучку. Так как направляющие векторы l, l_1 и l_2; пропорциональны, можем домножить уравнения на числа так, что коэффициенты перед переменными станут равны: пусть $l_1 : Ax + By + C_1 = 0$; $l_2 = Ax + By + C_2 = 0$; $l = Ax + By + C_3 = 0$.Тогда возьмём λ, μ из следующей системы: $\begin{cases} C_1\lambda + C_2\mu = C_3 \\ \lambda + \mu = 1 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \lambda = \frac{C_3-C_2}{C_1-C_2} \\ \mu = \frac{C_1-C_3}{C_1-C_2} \end{cases}$ $(C_1 \neq C_2$, иначе l_1 и l_2 совпа-

дают). Очевидно, что для таких λ, μ уравнение l имеет вид $(*)$ (проверяется несложной подстановкой), ч.т.д. $\square$

Билет 14. Отрезки

14.1 Отрезки на плоскости

Определение. Пусть l - прямая, $X_1(x_1, y_1), X_2(x_2, y_2) \in l$ и $X_1 \neq X_2$. Отрезком с концами X_1, X_2 на плоскости называется множество всех точек, лежащих между X_1 и X_2 (на прямой l). Обозначается $[X_1, X_2]$.

Вывод формулы (Уравнение отрезка)**.** Пусть $X \in [X_1, X_2]$. Тогда знаем, что $\begin{cases} x = x_1 + t(x_2 - x_1) \\ y = y_1 + t(y_2 - y_1) \end{cases} \quad (X \in l) \Rightarrow \begin{pmatrix} x - x_1 \\ y - y_1 \end{pmatrix} = t \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \end{pmatrix} \Rightarrow$ $t\overrightarrow{X_1X_2} = \overrightarrow{X_1X} \Rightarrow \overrightarrow{XX_2} = (1-t)\overrightarrow{X_1X_2}$. Отсюда видно, что $|\overrightarrow{X_1X}|$ и $|\overrightarrow{XX_2}| < |\overrightarrow{X_1X_2}| \Leftrightarrow t \in [0, 1]$. Отсюда

$$\boxed{X \in [X_1, X_2] \Leftrightarrow \begin{cases} x = x_1 + t(x_2 - x_1) \\ y = y_1 + t(y_2 - y_1) \\ t \in [0, 1] \end{cases}}$$

Определение. Отрезком в произвольном аффинном пространстве называется множество точек $[X_1, X_2] = \{X_1 + t\overrightarrow{X_1X_2}, t \in [0, 1]\}$

Билет 15. Полуплоскости

15.1 Выпуклые множества

Определение. Множество X в произвольном аффинном пространстве называется выпуклым, если $\forall\ X_1, X_2 \in X \quad [X_1, X_2] \subset X$.

15.2 Полуплоскости как выпуклые множества

Определение. Пусть в аффинной системе координат $l : Ax + By + C = 0$. Множества $\Pi_0^+ = \{X(x, y) : Ax + By + C \geqslant 0\}$ и $\Pi_0^- = \{X(x, y) : Ax + By + C \leqslant 0\}$ называются замкнутыми полуплоскостями, а множества $\Pi^+ = \{X(x, y) : Ax + By + C > 0\}$ и $\Pi^- = \{X(x, y) : Ax + By + C < 0\}$ - открытыми полуплоскостями.

Теорема. Для любой прямой $l : Ax + By + C = 0$ множества $\Pi_0^+, \Pi_0^-, \Pi^+, \Pi^-$ выпуклы.

Доказательство. Рассмотрим Π_0^+ (остальные аналогично).
Пусть $X_1(x_1, y_1), X_2(x_2, y_2) \in \Pi_0^+$. Знаем, что любая точка $X \in [X_1, X_2]$ имеет координаты $(tx_1 + (1-t)x_2, ty_1 + (1-t)y_2), 0 \leqslant t \leqslant 1$. Тогда:

$$\begin{cases} Ax_1 + By_1 + C \geqslant 0 \\ Ax_2 + By_2 + C \geqslant 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} tAx_1 + tBy_1 + tC \geqslant 0 \\ (1-t)Ax_2 + (1-t)By_2 + (1-t)C \geqslant 0 \end{cases} \Rightarrow$$

$\Rightarrow A(tx_1 + (1-t)x_2) + B(ty_1 + (1-t)y_2) + C \geqslant 0 \Rightarrow X \in \Pi_0^+$, ч.т.д. □

Билет 16. Углы между прямыми

16.1 Определение угла

Определение. Пусть l - прямая, $O \in l, \bar{v}$ - любой направляющий вектор l. Множества $l^+ = \{O + \lambda\bar{v}, \lambda \geqslant 0\}$ и $l^- = \{O + \lambda\bar{v}, \lambda \leqslant 0\}$ называются лучами, на которые O делит l.

Замечание. Если даны два луча с общим началом (обозначим их l_1^+, l_2^+), то они являются подмножествами однозначно определённых прямых l_1, l_2, для которых можно выбрать направляющие векторы так, чтобы лучи соответствовали формуле из определения (назовём эти векторы $\bar{v}_1, \bar{v}_2$).

Определение. Углом на плоскости называется объединение двух лучей с общим началом. Величиной угла $l_1^+ \cap l_2^+$ называется величина угла между векторами $\bar{v}_1, \bar{v}_2$, определёнными как в замечании. Говорят, что один угол меньше другого, если величина первого угла меньше величины второго.

Определение. Угол называется прямым, если его величина равна $\frac{\pi}{2}$($\Leftrightarrow$ направляющие векторы лучей ортогональны). Угол называется развёрнутым, если его величина равна π($\Leftrightarrow$ образующие угол лучи дополняют друг друга до прямой).

Замечание. В дальнейшем будем иногда называть углом величину угла. Также аналогичным образом можно говорить о величине угла между вектором и прямой

16.2 Определение угла между двумя прямыми

Определение. Углом между двумя прямыми называется наименьший из углов, образованных лучами с началом в их точке пересечения этих прямых и лежащих на этих прямых, если прямые пересекаются. Если прямые параллельны или совпадают, то угол между ними равен нулю. Обозначается $\angle(l_1 l_2)$.

Определение. Прямые называются перпендикулярными, если угол между ними равен $\frac{\pi}{2}$.

Определение. Перпендикуляром, опущенным из данной точки на данную прямую, называется прямая, проходящая через точку и перпендикулярная прямой, либо отрезок этой прямой с концами в данной точке и точке пересечения прямой с данной.

16.3 Угол между прямыми в прямоугольной системе координат

Вывод формулы (Угол между прямыми в прямоугольной с.к.). Пусть $l_1 : A_1x + B_1y + C_1 = 0, l_2 : A_2x + B_2y + C_2 = 0$ - прямые в прямоугольной системе координат. Тогда их направляющие векторы равны $\begin{pmatrix} -B_1 \\ A_1 \end{pmatrix} = \bar{v}_1, \begin{pmatrix} -B_2 \\ A_2 \end{pmatrix} = \bar{v}_2$. Отсюда (выражение скалярного произведения): $\cos\angle(l_1, l_2) = |\cos\angle(\bar{v}_1, \bar{v}_2)| \Rightarrow$

$$\boxed{\cos\angle(l_1, l_2) = \frac{|A_1A_2 + B_1B_2|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2} + \sqrt{A_2^2 + B_2^2}}}$$

(модуль в косинусе, а соответственно и в числителе формулы, позволяет сразу взять меньший угол).

16.4 Условие перпендикулярности. Нормаль

Следствие. Прямые $l_1 : A_1x + B_1y + C_1 = 0$ и $l_2 : A_2x + B_2y + C_2 = 0$ перпендикулярны $\Leftrightarrow A_1A_2 + B_1B_2 = 0$.

Определение. Нетрудно проверить, что в прямоугольной системе координат вектор $\bar{n} = \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}$ перпендикулярен вектору $\begin{pmatrix} -B \\ A \end{pmatrix}$, а значит и прямой $l : Ax + By + C = 0$. Вектор $\bar{n}$ называется нормалью (нормальным вектором) прямой l (в прямоугольной с.к.)

Замечание. Любой вектор, коллинеарный нормали, также является нормалью, так как уравнения $Ax + By + C = 0$ и $\lambda Ax + \lambda By + \lambda C = 0$ задают одну и ту же прямую.

Билет 17. Расстояние от точки до прямой

17.1 Определение расстояния между множествами точек

Определение. Пусть A, B - множества в точечно-евклидовом пространстве. Расстоянием от A до B называется число $\inf\{|XY|, X \in A, Y \in B\}$ Расстояние от точки до прямой определяется аналогично. когда $A = \{X\}$ (его часто обозначают $d(X, l)$).

Замечание. У множества из определения существует верхняя грань, т.к. оно является ограниченным снизу подмножеством действительных чисел (принцип полноты Вейерштрасса из курса математического анализа).

17.2 Расстояние от точки до прямой

Теорема. Расстояние от точки до прямой равно длине перпендикуляра, опущенного из этой точки на прямую.

Доказательство. Пусть заданы $l : Ax+By+C = 0$ и X_0 - произвольные прямая и точка. Выберем на l произвольную точку X_1. Проведём через X_0 прямую l' с направляющим вектором $\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}$ - она будет перпендикулярна l, а значит имеет с ней единственную общую точку - назовём её X_2. Имеем: $|\overrightarrow{X_1X_0}|^2 = (\overrightarrow{X_1X_0}, \overrightarrow{X_1X_0}) = (\overrightarrow{X_1X_2} + \overrightarrow{X_2X_0}, \overrightarrow{X_1X_2} + \overrightarrow{X_2X_0}) = |\overrightarrow{X_1X_2}|^2 + |\overrightarrow{X_2X_0}|^2 \geqslant |\overrightarrow{X_2X_0}|^2$. Отсюда $|\overrightarrow{X_2X_0}|^2$ - минимум всех расстояний между X и точкой прямой, т.е. он достигается в точке пересечения l и l', ч.т.д. □

Замечание. Расстояние между двумя прямыми на плоскости $\neq 0 \Leftrightarrow$ они параллельны и не совпадают (у них нет общих точек). В этом случае расстояние между ними равно расстоянию от любой точки одной прямой до другой.

Вывод формулы (Расстояние от точки до прямой в прямоугольной с.к.)**.** Пусть $X_0 = (x_0, y_0), l : Ax+By+C = 0$. Посчитаем $d(X_0, l)$. Проведём через X_0 перпендикуляр l' к прямой l. Направляющий вектор l' - $\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}$, то есть его параметрические уравнения - $\begin{cases} x = x_0 + At \\ y = y_0 + Bt \end{cases}$. Найдём t_1, удовлетворяющее точке пересечения: имеем $A(x_0 + At_1) + B(y_0 + Bt_1) + C = 0 \Rightarrow t_1 = -\frac{Ax_0+By_0+C}{A^2+B^2}$. Отсюда точка пересечения X_1 имеет координаты $(x_0 + At_1, y_0 + Bt_1)$. Тогда

$\overrightarrow{X_0X_1} = \begin{pmatrix} At_1 \\ Bt_1 \end{pmatrix} \Rightarrow |\overrightarrow{X_0X_1}|^2 = A^2t_1^2 + B^2t_1^2 = (A^2+B^2)t_1^2 = \frac{(Ax_0+By_0+C)^2}{A^2+B^2}$, а значит

$$\boxed{d(X,l) = \frac{|Ax_0+By_0+C|}{\sqrt{A^2+B^2}}}$$

Билет 18. Преобразования координат векторов. Матрица перехода

Вывод формулы (Матрица перехода)**.** Пусть $E = (\bar{e}_1, ..., \bar{e}_n)$ и $E' = (\bar{e}'_1, ..., \bar{e}'_n)$ - два базиса в одном и том же евклидовом пространстве V. Будем называть E старым базисом, а E' - новым. Получим формулу для координат в старом базисе вектора $\bar{x} \in V$, заданного в новом базисе координатами $(x'_1, ..., x'_n)$.
Итак, пусть в старом базисе $\bar{x}$ имеет координаты $(x_1, ..., x_n)$. Установим связь между базисами, выразив векторы нового базиса через старый: пусть
$\bar{e}'_i = c_{1i}\bar{e}_1 + ... + c_{ni}\bar{e}_n$, т.е. $\bar{e}'_i = \begin{pmatrix} c_{1i} \\ \vdots \\ c_{ni} \end{pmatrix}$. Подставляя эти выражения, получим:
$\bar{x} = x'_1\bar{e}'_1 + ... + x'_n\bar{e}'_n = x'_1(c_{11}\bar{e}_1 + ... + c_{n1}\bar{e}_n) + ... + x'_n(c_{1n}\bar{e}_1 + ... + c_{nn}\bar{e}_n) =$
$= (c_{11}x'_1 + ... + c_{1n}x'_n)\bar{e}_1 + ... + (c_{n1}x'_1 + ... + c_{nn}x'_n)\bar{e}_n \Rightarrow$ (из равенства координат)

$$\boxed{\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & \dots & c_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix}}$$

Определение. Такая матрица C называется матрицей перехода от базиса E к базису E'.

Замечание. Столбцы матрицы C являются координатами базисных векторов E' в базисе $E \Rightarrow$ столбцы C линейно независимы $\Rightarrow C$ невырожденная (из курса алгебры).

Билет 19. Матрица Грама. Формула скалярного произведения.

Вывод формулы. Рассмотрим также скалярное произведение векторов в случае, когда базис E ортонормированный. Если $\bar{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \bar{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$ (в базисе E), имеем: $(\bar{x},\bar{y}) = \begin{pmatrix} x_1 & \dots & x_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_1 & \dots & x'_n \end{pmatrix} C^T C \begin{pmatrix} y'_1 \\ \vdots \\ y'_n \end{pmatrix}$ (так как $\begin{pmatrix} x_1 & \dots & x_n \end{pmatrix} = \left(C \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix} \right)^T$). Нетрудно видеть, что произведение матриц $C^T C$ имеет вид $G = \begin{pmatrix} (\bar{e}'_1,\bar{e}'_1) & \dots & (\bar{e}'_1,\bar{e}'_n) \\ \vdots & & \vdots \\ (\bar{e}'_n,\bar{e}'_1) & \dots & (\bar{e}'_n,\bar{e}'_n) \end{pmatrix}$ (строки C^T и столбцы C - координаты векторов базиса E' в базисе E)

Такая матрица называется матрицей Грама (матрицей скалярных произведений) для базиса E'. Так как матрица G не зависит от базиса E, получаем формулу для скалярного произведения в произвольном базисе:

$$\boxed{(\bar{x},\bar{y}) = \begin{pmatrix} x'_1 & \dots & x'_n \end{pmatrix} G \begin{pmatrix} y'_1 \\ \vdots \\ y'_n \end{pmatrix}}$$

Билет 20. Выражения матриц перехода

Следствие (1)**.** Если C и C_1 - матрицы перехода от базиса E к E' и от E' к E'' соответственно, то матрица перехода от базиса E к E'' равна CC_1

Следствие (2)**.** Если C - матрица перехода от базиса E к E', то матрица перехода от базиса E' к E равна C^{-1}.

Билет 21. Критерий матрицы перехода

Замечание. Пусть $\bar{e}_1, ..., \bar{e}_n$ - базис векторного пространства V. Тогда векторы $\bar{x}_1, ..., \bar{x}_n \in V$ линейно независимы $\Leftrightarrow$ столбцы их координат линейно независимы. Это очевидно следует из представления линейной комбинации $\lambda_1\bar{x}_1 + ... + \lambda_n\bar{x}_n = 0$ через координаты.

Теорема. Для произвольного данного базиса матрица C является матрицей перехода к некоторому другому базису $\Leftrightarrow \det C \neq 0$.

Доказательство. Следует из утверждения из курса алгебры о том, что матрица невырожденна $\Leftrightarrow$ её столбцы линейно независимы ($\Leftrightarrow$ векторы-столбцы образуют базис). $\square$

Билет 22. Преобразования координат точек

Вывод формулы (Координаты точки при перемене с.к.)**.** Пусть заданы два репера $O\bar{e}_1 ... \bar{e}_n$ и $O'\bar{e}'_1 ... \bar{e}'_n$. Для этого необходимо задать новый репер через старый: пусть C - матрица перехода от $\bar{e}_1, ..., \bar{e}_n$ к $\bar{e}'_1 ... \bar{e}'_n$, а вектор $\overrightarrow{OO'} = \begin{pmatrix} x_{01} \\ \vdots \\ x_{0n} \end{pmatrix}$.

Пусть X - произвольная точка с координатами $(x_1, ..., x_n)$ в старой системе координат и $(x'_1, ..., x'_n)$ в новой. Тогда $\overrightarrow{OX} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$. Также $\overrightarrow{O'X} = \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix}$ в новой с.к. $\Rightarrow C \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix}$ в старой. Осталось заметить, что $\overrightarrow{OX} = \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'X}$, а отсюда (через старую с.к.)

$$\boxed{\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{01} \\ \vdots \\ x_{0n} \end{pmatrix} + C \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix}}$$

Выразим новые координаты, умножив слева на C^{-1}:

$$\boxed{\begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix} = -C^{-1} \begin{pmatrix} x_{01} \\ \vdots \\ x_{0n} \end{pmatrix} + C^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}}$$

(отметим также, что $-C^{-1} \begin{pmatrix} x_{01} \\ \vdots \\ x_{0n} \end{pmatrix}$ - новые координаты вектора $O'O$)

Билет 23. Ортогональные матрицы

23.1 Определение. Критерии ортогональности

Определение. Матрица перехода от одного ортонормированного базиса к другому называется ортогональной.

Теорема. Для $C = \begin{pmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & \dots & c_{nn} \end{pmatrix}$ следующие утверждения равносильны:

1. C - ортогональная;
2. $\sum\limits_{k=1}^{n} c_{ki}c_{kj} = \delta_{ij}$ ("скалярное произведение"столбцов равно δ_{ij});
3. $\sum\limits_{k=1}^{n} c_{ik}c_{jk} = \delta_{ij}$ ("скалярное произведение"строк равно δ_{ij});
4. $CC^T = E$;
5. $C^TC = E$;
6. $C^T = C^{-1}$;

Доказательство. (в конспекте указан "прямой подсчёт")
Для начала заметим равносильность утверждений 4, 5, 6: 4 $\Leftrightarrow$ 5 (получаются друг из друга транспонированием обоих частей равенства), а 6 равносильно им по определению обратной матрицы.
1 $\Rightarrow$ 2: Столбцы матрицы C - координаты векторов ортонормированного базиса E в другом ортонормированном базисе E'. Рассмотрим скалярное произведение $(\bar{e}'_i, \bar{e}'_j)$: с одной стороны оно равно $\sum\limits_{k=1}^{n} c_{ki}c_{kj}$ (так как базис E ортонормирован, можем применять формулу с матрицей Грама, причём $G = E$ из ортонормированности E_1), а с другой стороны - δ_{ij} (из ортонормированности E_1).
1 $\Leftarrow$ 2: Из 2 знаем, что векторы с координатами в столбцах попарно ортогональны и имеют длину 1 в базисе, в котором записаны эти координаты. Значит, применив такое преобразование к векторам ортонормированного базиса, получим также попарно ортогональные векторы длины 1, т.е. C - ортогональная.
2 $\Leftrightarrow$ 5: Оба условия равносильны тому, что элемент C^TC на позиции ij равен δ_{ij}.
Аналогично 3 $\Leftrightarrow$ 4.
Итого 1 $\Leftrightarrow$ 2 $\Leftrightarrow$ 5 $\Leftrightarrow$ 6 $\Leftrightarrow$ 4 $\Leftrightarrow$ 3. $\square$

Следствие. Для ортогональной $C : |C^T| = |C|,\ |C^TC| = |E| = 1 \Rightarrow |C| = \pm 1$

Следствие. (Из определения ортогональной матрицы)
Произведение ортогональных матриц - ортогональная матрица.
Матрица, обратная ортогональной, ортогональна.

23.2 Двумерный случай

Вывод формулы. (Двумерный случай ортогональной матрицы)
$C = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ ортогональна $\Rightarrow a^2 + c^2 = 1 \Rightarrow \exists \varphi : a = \cos\varphi, c = \sin\varphi$.
Из теоремы $a^2 + b^2 = 1,\ c^2 + d^2 = 1 \Rightarrow b = \pm\sin\varphi,\ d = \pm\cos\varphi$.
Из ортогональности столбцов следует, что $ab + cd = 0$, поэтому остаются следующие случаи:

$$\boxed{C = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix};\quad C = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ \sin\varphi & cos\varphi \end{pmatrix}}$$

т.е. для любой ортогональной C найдётся φ такой, что C имеет один из видов выше. Несложно также убедиться, что любая матрица такого вида ортогональна: первая производит поворот на угол φ, а вторая - поворот с отражением.

Билет 24. Ориентация векторных пространств

Определение. Два базиса в конечномерном векторном пространстве называются одинаково ориентированными (одноимёнными), если матрица перехода от одного базиса к другому имеет положительный определитель. В противном случае базисы называются противоположно ориентированными (разноимёнными).

Теорема. Отношение одноимённости является отношением эквивалентности на множестве базисов.

Доказательство. По определению отношения эквивалентности:

- рефлексивность: матрица перехода от базиса в себя равна E, $|E| = 1$;
- симметричность: $C : E \to E' \Rightarrow C^{-1} : E' \to E$, причём $|CC^{-1}| = 1$, т.е. $|C|$ и $|C^{-1}|$ одного знака;
- транзитивность: $C : E \to E',\ C' : E' \to E'', C'' : E \to E'' \Rightarrow C'' = CC'$, т.е. из одноимённостей E с E' и E' с E'' следует одноимённость E с E''.

□

Определение. Ориентацией векторного пространства, а также любого аффинного пространства, с которым оно ассоциировано, называется выбор любого из двух классов эквивалентности по отношению одноимённости и объявления базисов в нём положительными (а остальных - отрицательными).
(Достаточно выбрать один базис и объявить его положительным)

Билет 25. Ориентация пар векторов. Углы с учётом ориентации

25.1 Ориентация на плоскости

Пример. Ориентация на плоскости: Достаточно выбрать пару неколлинеарных векторов (базис), и объявить его положительным. Заметим, что пары $\bar{a}, \bar{b}$ и $\bar{b}, \bar{a}$ разноимённы ($C = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$).

Посмотрим, когда пары $\bar{a}, \bar{b}$ и $\bar{a}, \bar{b}'$ одноимённые. Рассмотрим произвольную прямую l с направляющим вектором $\bar{a}$ и любую точку $O \in l$. В репере $O\bar{a}\bar{b}$ уравнение l имеет вид $y = 0$. Подставив в это уравнение координаты $\bar{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, получим 1.

Пусть $\bar{b}' = \lambda\bar{a} + \mu\bar{b} \Rightarrow$ матрица перехода между парами C равна $\begin{pmatrix} 1 & \lambda \\ 0 & \mu \end{pmatrix}$. $|C| > 0 \Leftrightarrow \mu > 0 \Leftrightarrow$ при подстановке координат $\bar{b}'$ в уравнение l результат будет $> 0 \Leftrightarrow$ точки B, B' с радиус-векторами $\bar{b}, \bar{b}'$ лежат в одной полуплоскости относительно l.

Получили **критерий одноимённости пар $\bar{a}, \bar{b}$ и $\bar{a}, \bar{b}'$: они одноимённы $\Leftrightarrow$ точки, полученные прибавлением векторов $\bar{b}$ и $\bar{b}'$ к произвольной точке произвольной прямой с направляющим вектором $\bar{a}$, лежат относительно неё в одной полуплоскости.**

25.2 Угол от вектора до вектора

Определение. Углом от вектора $\bar{a}$ до вектора $\bar{b}$ в ориентированном двумерном евклидовом пространстве называется угол между $\bar{a}$ и $\bar{b}$, взятый со знаком плюс, если пара $\bar{a}, \bar{b}$ положительно ориентирована, и со знаком минус иначе.

25.3 Угол от прямой до прямой

Определение. Положительным углом от $\bar{a}$ до $\bar{b}$ называется угол φ от $\bar{a}$ до $\bar{b}$, если $\varphi > 0$, и угол $2\pi + \varphi$, если $\varphi < 0$.

Определение. Углом от прямой l_1 до прямой l_2 в ориентированном двумерном евклидовом пространстве называется наименьший положительный угол от направляющего вектора l_1 до направляющего вектора l_2.

25.4 Угол наклона

Вывод формулы. (Известное ранее уравнение прямой. Угол наклона)
Пусть на плоскости задана прямоугольная система координат $O\bar{e}_1\bar{e}_2$ и в ней прямая l определена уравнением $y = kx + b \Leftrightarrow kx - y + b = 0$. Прямая с направляющим вектором e_1 называется **осью абсцисс**, а угол от этой прямой до прямой l - **углом наклона** прямой l.

Подсчитаем угол наклона l. Направляющие векторы l имеют вид $\begin{pmatrix} \lambda \\ \lambda k \end{pmatrix}$, причём φ, очевидно, зависит только от знака λ. Угол от $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ до $\begin{pmatrix} \pm 1 \\ \pm k \end{pmatrix}$ равен углу от $\begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix}$ до $\begin{pmatrix} \mp 1 \\ \mp k \end{pmatrix}$, поэтому выбирать наименьший можем только из положительных углов от вектора $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ - наименьшим, как нетрудно видеть, будет угол до $\begin{pmatrix} 1 \\ k \end{pmatrix}$ при $k > 0$ и до $\begin{pmatrix} -1 \\ -k \end{pmatrix}$ иначе. Обозначив нужный вектор $\bar{k}$, имеем:

$$\cos\varphi = \cos\angle(\bar{e}_1, \bar{k}) = \frac{1}{\sqrt{1+k^2}} \Rightarrow \sin\angle(\bar{e}_1, \bar{k}) = \pm\frac{|k|}{\sqrt{1+k^2}} \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi = \pm k$$

Заметим, что при $k > 0$ необходимый угол должен иметь тангенс, больший нуля, а при $k < 0$ - меньший нуля. Отсюда видно, что вне зависимости от нужного нам вектора верно:

$$\boxed{\operatorname{tg}\varphi = k}$$

Билет 26. Площади

26.1 Определение и следствия

Определение. Фигуры Φ_1, Φ_2 называются конгруэнтными, если $\exists$ отображение $f : \Pi \to \Pi$, сохраняющее расстояния ($|f(A)f(B)| = |AB|\ \forall A, B$) такое, что $f(\Phi_1) = \Phi_2$.

Определение. Площадь(мера) на евклидовой плоскости - численная величина (обозначается S_Φ, Φ - фигура), соответствующая следующим свойствам:

1. Площадь квадрата со стороной 1 равна 1;

2. Площади конгруэнтных фигур равны;

3. Если Φ_1, Φ_2 - фигуры, $\exists\ S_{\Phi_1}, S_{\Phi_2}$ и $\Phi_1 \cap \Phi_2 = \varnothing$, то $\exists S_{\Phi_1 \cup \Phi_2} = S_{\Phi_1} + S_{\Phi_2}$;

4. Если Φ - фигура и существуют такие последовательности фигур $\{\varphi_n\}_{n=1}^{\infty}$ и $\{\Phi_n\}_{n=1}^{\infty}$, что $\varphi_n \subset \varphi_{n+1} \subset \Phi \subset \Phi_{n+1} \subset \Phi n\ \forall n \geqslant 1$, причём $\lim\limits_{n\to\infty} S_{\varphi_n}$ и $\lim\limits_{n\to\infty} S_{\Phi_n}$ существуют и равны, то $S_\Phi = \lim\limits_{n\to\infty} S_{\varphi_n} = \lim\limits_{n\to\infty} S_{\Phi_n}$

Следствие. (Площади некоторых фигур:)

- Площадь отрезка равна 0.

  Доказательство. Из предельного перехода (Площадь отрезка с длиной 1 равна 0, иначе площадь квадрата со стороной 1 не была бы конечной, а из этого можно получить длину любого отрезка). □

- Площадь квадрата со стороной a равна a^2.

  Доказательство. Для $a = \frac{1}{n}$ разбиваем квадрат со стороной 1 на n^2 квадратиков, для $a \in \mathbb{Q}$ складываем квадрат со стороной $\frac{m}{n}$ из предыдущих, для $a \notin \mathbb{Q}$ приближаем квадрат сверху и снизу квадратами с рациональными сторонами и переходим к пределам (по 4 пункту определения). □

- Площадь прямоугольника со сторонами a, b равна ab.

  Доказательство. Рассмотрим квадрат со стороной $a + b$. Его можно разбить на квадрат со стороной a, квадрат со стороной b и два нужных нам прямоугольника. Отсюда $2S = (a+b)^2 - a^2 - b^2 = 2ab \Rightarrow S = ab$. □

Отсюда также выводятся формулы площади параллелограмма (перестановкой треугольника из параллелограмма получается прямоугольник) и треугольника (как половины параллелограмма).

26.2 Площадь параллелограмма

Определение. Говорят. что параллелограмм натянут на векторы $\bar{a}, \bar{b}$, если для одной из вершин A параллелограмма точки $A + \bar{a}$ и $A + \bar{b}$ также являются его вершинами. Площадь параллелограмма, натянутого на векторы $\bar{a}, \bar{b}$, обозначается $S_{\bar{a},\bar{b}}$.

Вывод формулы. (Площадь параллелограмма в прямоугольной с.к.)
Нам уже известно, что $S_{\bar{a},\bar{b}} = |\bar{a}||\bar{b}|\sin\varphi$ (из выражения высоты параллелограмма через угол). В прямоугольной системе координат:

$$S^2_{\bar{a},\bar{b}} = |\bar{a}|^2|\bar{b}|^2\sin\varphi = |\bar{a}|^2|\bar{b}|^2(1-\cos^2\varphi) = |\bar{a}|^2|\bar{b}|^2 - (\bar{a},\bar{b})^2$$

Если $\bar{a} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$, $\bar{b} = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}$, то $S^2_{\bar{a},\bar{b}} = (x_1^2+y_1^2)(x_2^2+y_2^2) - (x_1x_2+y_1y_2) = (x_1y_2 - x_2y_1)^2 \Rightarrow$

$$\boxed{S_{\bar{a},\bar{b}} = |\begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix}|}$$

При этом определитель $> 0 \Leftrightarrow \bar{a},\bar{b}$ одноимённа с базисом.

26.3 Ориентированная площадь

Определение. Ориентированной площадью параллелограмма, натянутого на векторы $\bar{a},\bar{b}$, называется число, равное $S_{\bar{a},\bar{b}}$, если пара $\bar{a},\bar{b}$ положительна, и $-S_{\bar{a},\bar{b}}$ иначе. Обозначается $<\bar{a},\bar{b}>$.

Следствие. В любом положительно ориентированном базисе $<\bar{a},\bar{b}> = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix}$

26.4 Свойства ориентированной площади

Утверждение. Свойства ориентированной площади:

1. $<\bar{a},\bar{b}> = -<\bar{b},\bar{a}>$
2. $<\bar{\lambda a},\bar{b}> = \lambda<\bar{a},\bar{b}> = <\bar{a},\bar{\lambda b}>$
3. $<\bar{a}+\bar{b},\bar{c}> = <\bar{a},\bar{c}> + <\bar{b},\bar{c}>$
   $(<\bar{a},\bar{b}+\bar{c}> = <\bar{a},\bar{b}> + <\bar{a},\bar{c}>; <\bar{a}-\bar{b},\bar{c}> = <\bar{a},\bar{c}> - <\bar{b},\bar{c}>)$

Доказательство. Следует из свойств определителя. □

Билет 27. Плоскость в пространстве

Определение. Плоскость в (трёхмерном) аффинном пространстве - его двумерное аффинное подпространство.

Вывод формулы (Уравнения плоскости)**.** Плоскость π - это множество $X_0 + V^2$, где X_0 - точка и V^2 - двумерное векторное подпространство пространства V, ассоциированного с трёхмерным аффинным пространством. Так как $\dim V^2 = 2 \Rightarrow$ в нём есть базис $\bar{a}, \bar{b} \Rightarrow \pi = \{X_0 + u\bar{a} + v\bar{b} : u, v \in \mathbb{R}\}$. Такие векторы $\bar{a}, \bar{b}$ называются **направляющими векторами плоскости**. В произвольной системе координат: если $X_0 = (x_0, y_0, z_0), \bar{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}, \bar{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}$, то π - мн-во точек с координатами: (**параметрические уравнения плоскости**)

$$\boxed{\begin{cases} x = x_0 + ua_1 + vb_1 \\ y = y_0 + ua_2 + vb_2 \\ z = z_0 + ua_3 + vb_3 \end{cases}}$$

Векторы $\bar{a}, \bar{b}$ называются направляющими векторами плоскости π.
Выражая параметры u, v, получим **общее уравнение плоскости**:

$$\boxed{Ax + By + Cz + D = 0 \quad (|A| + |B| + |C| \neq 0)}$$

Билет 28. Взаимное расположение плоскостей

Определение. Говорят, что вектор $\bar{a}$ параллелен плоскости π (обозначается $\bar{a} \parallel \pi$), если он выражается через направляющие векторы этой плоскости ($\Leftrightarrow$ через любой базис ассоциированного с плоскостью векторного пространства).

Замечание. Ясно, что $X \in \pi \Leftrightarrow \overrightarrow{X_0X} \parallel \pi$ (для любой $X_0 \in \pi$). То же верно и для любой отличной от X_0 точки плоскости: $\overrightarrow{X_1X} = \overrightarrow{X_1X_0} + \overrightarrow{X_0X}$, т.е. $\overrightarrow{X_1X}$ выражается через направляющие векторы $\Leftrightarrow$ $\overrightarrow{X_0X}$ выражается через направляющие векторы.

28.1 Взаимное расположение плоскостей

Вывод формулы. Рассмотрим две плоскости, заданные уравнениями $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0$ и $A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0$. Эти плоскости пересекаются $\Leftrightarrow$ $\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0 \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0 \end{cases}$ имеет решения. Матрица коэффициентов системы $A = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \end{pmatrix}$, а её расширенная матрица $(A|B) =$

$\left(\begin{array}{ccc|c} A_1 & B_1 & C_1 & -D_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & -D_2 \end{array}\right)$. По теореме Кронекера-Капелли из курса алгебры СЛУ совместна $\Leftrightarrow rkA = rk(A|B)$. Так как $1 \leqslant rkA \leqslant 2$, плоскости не пересекаются $\Leftrightarrow$ строки A линейно зависимы ($rkA = 1$), а строки $(A|B)$ - нет. Таким образом, плоскости не пересекаются $\Leftrightarrow$

$$A_1 : A_2 = B_1 : B_2 = C_1 : C_2 \neq D_1 : D_2$$

Очевидно, плоскости совпадают $\Leftarrow$

$$A_1 : A_2 = B_1 : B_2 = C_1 : C_2 = D_1 : D_2$$

Докажем, что плоскости совпадают только в этом случае. Пусть плоскости совпадают. Приведём матрицу $(A|B)$ к ступенчатому виду: $\left(\begin{array}{ccc|c} A_1 & B_1 & C_1 & -D_1 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} \end{array}\right)$ (хотя бы один из коэффициентов первой плоскости $\neq 0$, без ограничения общности - A_1). Так как плоскости совпадают, любая точка, принадлежащая первой плоскости, принадлежит и второй. Тогда для a_{24} из принадлежности плоскости $(-\frac{D_1}{A_1}, 0, 0)$ следует $a_{24} = 0$, для a_{22} аналогично при $B \neq 0$, а при $B = 0$ - из принадлежности точки $(-\frac{D_1}{A_1}, 1, 0)$ (для a_{23} и C аналогично). Отсюда вторая строка ступенчатой матрицы нулевая, то есть строки $(A|B)$ пропорциональны, а отсюда плоскости совпадают $\Leftrightarrow$

$$A_1 : A_2 = B_1 : B_2 = C_1 : C_2 = D_1 : D_2$$

Предположим, что плоскости пересекаются, но не совпадают. Тогда $rkA = 2$. Из курса алгебры знаем, что решение такой системы имеет вид $X_0 + V^1$ (частное решение СЛУ + одномерное пространство решений ОСЛУ). Таким образом:

Плоскости совпадают $\Leftrightarrow$ их уравнения (со свободными коэффициентами) пропорциональны;

Плоскости параллельны $\Leftrightarrow$ их уравнения пропорциональны, а свободные члены - нет;

Плоскости пересекаются и не совпадают (их уравнения не пропорциональны) $\Leftrightarrow$ пересечением плоскостей является множество вида $X_0 + V^1$, где X_0 - точка и $V^1 = \{\lambda \bar{a} : \lambda \in \mathbb{R}\}$ ($\bar{a}$ - решение ОСЛУ $AX = 0$), т.е. их пересечением является прямая.

Билет 29. Пучки плоскостей

29.1 Определения

Определение. Собственным пучком плоскостей называется множество всех плоскостей, проходящих через данную прямую, называемую центром пучка. Несобственным пучком плоскостей называется множество всех плоскостей, параллельных данной плоскости.

29.2 Собственные пучки

Теорема. Пусть плоскости $\pi_1 : A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0$ и $\pi_2 : A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0$ задают собственный пучок (т.е. содержатся в нём и не совпадают). Тогда плоскость π принадлежит пучку $\Leftrightarrow$ π задаётся уравнением $\lambda(A_1x + B_1y + C_1z + D_1) + \mu(A_2x + B_2y + C_2z + D_2) = 0$ $(*)$ для некоторых $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$.

Доказательство.
$\Leftarrow$ Пусть π задаётся уравнением $(*)$. Тогда, подставив в уравнение π любую точку прямой - центра пучка (назовём её l), получим $\lambda(0) + \mu(0) = 0$ (т.к. центр удовлетворяет уравнениям π_1, π_2).
$\Rightarrow$ Пусть $l \subset \pi$. Возьмём произвольную точку $(x_1, y_1, z_1) \in \pi, (x_1, y_1, z_1) \notin l$. Рассмотрим плоскость вида $(*)$ с $\lambda = -(A_2x_1 + B_2y_1 + C_2z_1 + D_2)$, $\mu = (A_1x_1 + B_1y_1 + C_1z_1 + D_1)$: $-(A_2x_1 + B_2y_1 + C_2z_1 + D_2)(A_1x + B_1y + C_1z + D_1) + (A_1x_1 + B_1y_1 + C_1z_1 + D_1)(A_2x + B_2y + C_2z + D_2) = 0$. Заметим, что это уравнение действительно задаёт плоскость: в противном случае необходимы условия $\lambda A_1 + \mu A_2 = \lambda B_1 + \mu B_2 = \lambda C_1 + \mu C_2 = 0$, но тогда (A_1, B_1, C_1) и (A_2, B_2, C_2) пропорциональны, а исходные плоскости непараллельны. Такой плоскости, очевидно, принадлежат точки l и (x_1, y_1, z_1). Так как через прямую и не лежащую на ней точку проходит ровно одна плоскость (она имеет вид $\{X_1 + \bar{v} = X_1 + \lambda\overrightarrow{X_1X_2} + \mu\overrightarrow{X_1X_3}\}$, где X_2, X_3 - произвольные точки на l), любая плоскость из собственного пучка имеет вид $(*)$, ч.т.д. □

29.3 Несобственные пучки

Теорема. Пусть плоскости $\pi_1 : A_1x+B_1y+C_1z+D_1 = 0$ и $\pi_2 : A_2x+B_2y+C_2z+D_2 = 0$ задают несобственный пучок (т.е. содержатся в нём и не совпадают). Тогда плоскость π принадлежит пучку $\Leftrightarrow$ π задаётся уравнением $\lambda(A_1x+B_1y+C_1z + D_1) + \mu(A_2x + B_2y + C_2z + D_2) = 0$ $(*)$ для некоторых $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$.

Доказательство.
$\Leftarrow$ Так как $\pi_1 \parallel \pi_2$, $\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{C_1}{C_2}$. Тогда если π имеет вид $(*)$, то $\frac{\lambda A_1+\mu A_2}{A_1} = \lambda + \frac{\mu A_2}{A_1} = \lambda + \frac{\mu B_2}{B_1} = \frac{\lambda B_1+\mu B_2}{B_1} = \lambda + \frac{\mu B_2}{B_1} = \lambda + \frac{\mu C_2}{C_1} = \frac{\lambda C_1+\mu C_2}{C_1} \Rightarrow \pi \parallel \pi_1$.
$\Rightarrow$ Пусть π принадлежит пучку. Так как уравнения π, π_1 и π_2; пропорциональны (без свободных коэффициентов), можем домножить их на числа так, что коэффициенты перед переменными станут равны: пусть $\pi_1 : Ax + By + Cz + D'_1 = 0$; $\pi_2 = Ax + By + Cz + D'_2 = 0$; $\pi = Ax + By + Cz + D'_3 = 0$.Тогда возьмём λ, μ из следующей системы: $\begin{cases} D'_1\lambda + D'_2\mu = D'_3 \\ \lambda + \mu = 1 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \lambda = \frac{D'_3-D'_2}{D'_1-D'_2} \\ \mu = \frac{D'_1-D'_3}{D'_1-D'_2} \end{cases}$ $(D'_1 \neq D'_2$, иначе π_1 и π_2 совпадают). Очевидно, что для таких λ, μ уравнение π имеет вид $(*)$ (проверяется несложной подстановкой), ч.т.д. $\square$

Билет 30. Полупространства

Определение. Аналогично прямой на плоскости, каждая плоскость π в пространстве V^3 разбивает множество всех не принадлежащих ей точек пространства на два выпуклых подмножества $V_1, V_2 : V_1 \cup \pi \cup V_2 = V^3, V_1 \cap V_2 = V_1 \cap \pi = v_2 \cap \pi = \varnothing$. Такие подмножества называются полупространствами, ограниченными π и определяются однозначно с точностью до обозначения.

Также можем определить полупространства следующим образом: возьмём произвольную точку $X \notin \pi$ и скажем, что $V_1 = \{Y \in V^3 : [X, Y] \cap \pi = \varnothing\}$, а затем выберем $X' \notin \pi \cup V_1$ (такая точка всегда будет существовать) и определим $V_2 = \{Y' \in V^3 : [X', Y'] \cap \pi = \varnothing\}$.

Утверждение. Так определённые множества являются полупространствами и не зависят от выбора точек X, X'.

Доказательство. (Аналогично случаю прямой) Введём любую систему координат. Тогда полупространства $V^{\pm} = \{X(x, y, z) : Ax + By + Cz + D \gtrless 0\}$. Рассмотрим V^+ (остальные аналогично).
Пусть $X_1(x_1, y_1, z_1), X_2(x_2, y_2, z_2) \in V^+$. Знаем, что любая точка $X \in [X_1, X_2]$ имеет координаты $(tx_1 + (1-t)x_2, ty_1 + (1-t)y_2, tz_1 + (1-t)z_2), 0 \leqslant t \leqslant 1$. Тогда:
$$\begin{cases} Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D \geqslant 0 \\ Ax_2 + By_2 + Cz_2 + D \geqslant 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} tAx_1 + tBy_1 + tCz_1 + D \geqslant 0 \\ (1-t)(Ax_2 + By_2 + Cz_2 + D) \geqslant 0 \end{cases} \Rightarrow$$
$\Rightarrow A(tx_1 + (1-t)x_2) + B(ty_1 + (1-t)y_2) + C(tz_1 + (1-t)z_2) + D \geqslant 0 \Rightarrow X \in V^+$.
Таким образом, для $X_1, X_2 \in V^+$ $[X_1, X_2] \subset V^+$ из доказанной выше выпуклости, а для точек $X_1 \in V^+, X_2 \in V^-$ точку пересечения $[X_1, X_2]$ и π можно

найти явно, но её существование очевидно. $\square$

Билет 31. Прямая в пространстве

Вывод формул. (Уравнения прямой) Пусть l - прямая в пространстве: $l = \{X_0 + t\bar{c}\}$, где X_0 - точка прямой, $\bar{c}$ - её направляющий вектор. Если $X_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}, \bar{v} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix}$, то координаты точек на прямой выражаются следующим образом: (**параметрические уравнения прямой**)

$$\boxed{X \in l : \begin{cases} x = x_0 + tc_1 \\ y = y_0 + tc_2 \\ z = z_0 + tc_3 \end{cases}}$$

Выразим t из всех уравнений и приравняем - получим **каноническое уравнение прямой**:

$$\boxed{\frac{x - x_0}{c_1} = \frac{y - y_0}{c_2} = \frac{z - z_0}{c_3}}$$

Если известно, что прямой принадлежат $X_0 = (x_0, y_0, z_0), X_1 = (x_1, y_1, z_1)$, то $\overrightarrow{X_0X_1} = \begin{pmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ z_1 - z_0 \end{pmatrix}$ - направляющий вектор, т.е. каноническое уравнение имеет следующий вид (**уравнение прямой по двум точкам**)

$$\boxed{\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} = \frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{z - z_0}{z_1 - z_0}}$$

Следствие. Любая прямая является пересечением двух плоскостей. (Видно из канонического уравнения: например, плоскостей $\frac{x-x_0}{x_1-x_0} = \frac{y-y_0}{y_1-y_0}$ и $\frac{y-y_0}{y_1-y_0} = \frac{z-z_0}{z_1-z_0}$)

Билет 32. Взаимное расположение плоскости и прямой

Вывод формул. (Случаи расположения) Пусть $l = \{X_0 + t\bar{c} : t \in \mathbb{R}\}, \pi = \{X_1 + u\bar{a} + v\bar{b}\}$. Уже знаем, что для любых других точек прямой и плоскости верны те же выражения множеств точек.

Предположим, что прямая и плоскость пересекаются хотя бы в двух точках:

пусть X_0, X_1 - их различные общие точки.Имеем $\overrightarrow{X_0X_0'} = t_0\bar{c} = u_0\bar{a} + v_0\bar{b}$ (для некоторых $t_0 \neq 0, u_0, v_0$, из принадлежности точек и прямой, и плоскости). Отсюда $\bar{c}$ выражается через $\bar{a}.\bar{b}$, а значит для любой $X \in l : X = X_0 + t\bar{c} = t(\frac{u_0}{t_0}\bar{a} + \frac{v_0}{t_0}\bar{b}) \in \pi$. Таким образом,

$$\underline{l, \pi \text{ имеют две т. пересечения} \Leftrightarrow l \subset \pi \Leftrightarrow l \cap \pi \neq \varnothing \text{ и } \bar{c} \text{ выражается через } \bar{a}, \bar{b}.}$$

Заметим, что $X \in l \cap \pi \Leftrightarrow X = X_0 + t_0\bar{c} = X_1 + u_0\bar{a} + v_0\bar{b} \Rightarrow \overrightarrow{X_0X_1} = u_0\bar{a} + v_0\bar{b} - t_0\bar{c}$. В случае некомпланарности $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$ вектор $\overrightarrow{X_0X_1}$ выражается через них единственным образом, то есть точка пересечения есть и единственная, т.е.

$$\underline{l, \pi \text{ имеют одну т. пересечения} \Leftrightarrow \bar{a}, \bar{b}, \bar{c} \text{ линейно независимы}}$$

(В случае, если $\bar{c}$ выражается через $\bar{a}, \bar{b}$: l, π имеют общую точку $\Rightarrow l \subset \pi$, поэтому т.пересечения одна только в этом случае)

Следствие. $\underline{\bar{c} \text{ выражается через } \bar{a}, \bar{b} \Leftrightarrow \text{либо } l \subset \pi, \text{ либо } l \cup \pi = \varnothing}$ (в этом случае говорят, что **прямая параллельна плоскости**)
$\underline{\bar{c} \text{ не выражается через } \bar{a}, \bar{b} \Leftrightarrow l \cap \pi \text{ - одна точка.}}$

Билет 33. Взаимное расположение двух прямых

Определение. Прямые l_1, l_2 в пространстве называются параллельными, если они либо совпадают, либо лежат в одной плоскости и не пересекаются.

Определение. Прямые l_1, l_2 в пространстве скрещиваются, если они не пересекаются и не параллельны.

Замечание. Если прямые l_1, l_2 с направляющими векторами $\bar{c}_1, \bar{c}_2$ пересекаются в точке X_0 и не совпадают, то $\bar{c}_1 \nparallel \bar{c}_2$ и $l_1, l_2 \subset \pi = \{X_0 + u\bar{c}_1 + v\bar{c}_2 : u, v \in \mathbb{R}\}$.
Отсюда прямые скрещиваются $\Leftrightarrow$ они не лежат в одной плоскости.
Если направляющие векторы $\bar{c}_1, \bar{c}_2$ прямых l_1, l_2 коллинеарны, то прямые либо параллельны, либо совпадают.

Следствие. Прямые l_1, l_2 скрещиваются $\Leftrightarrow$ они не пересекаются и $c_1 \nparallel c_2$.
$l_1 \parallel l_2 \Leftrightarrow c_1 \parallel c_2$ (иначе прямые либо скрещиваются, либо пересекаются).

Мораль в том, что дальше очев...
(по свойствам орбит, с которыми разбирается Viacheslavik122333)