

Part I

Алгебра

Chapter 1

Линейная алгебра. Векторные пространства

1.1 Лекция 1

X - множество

$*$: $X \times X \rightarrow X$

$(x, y) \mapsto x * y$

Аксиомы:

1. $\forall x, y, z \in X : x * (y * z) = (x * y) * z$ (ассоциативность)
2. $\exists e \in X \forall a \in X : e * a = a * e = a$ (нейтральный элемент)
3. $\forall a \in X \exists a' \in X : a * a' = a' * a = e$ (обратный элемент)
4. $\forall a, b \in X : a * b = b * a$ (коммутативность)

Определение 1. Множество X с операцией $*$, удовлетворяющее аксиоме 1, называется **полугруппой**

Определение 2. Множество X с операцией $*$, удовлетворяющее аксиомам 1-2, называется **моноидом**

Определение 3. Множество X с операцией $*$, удовлетворяющее аксиомам 1-3, называется **группой**

Определение 4. Множество X с операцией $*$, удовлетворяющее аксиомам 1-4, называется **коммутативной** или **абелевой группой**

Примеры.

1. $(\mathbb{Z}, +)$ – группа
2. $(\mathbb{N}, +)$ – полугруппа
3. $(\mathbb{N}_0, +)$ – моноид

4. $(\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot)$ – группа

5. Пусть A – множество

$X :=$ множество биективных отображений $A \rightarrow A$

id_A – нейтральный элемент

Если $f(x) = y$, то $\tilde{f}(y) = x$ – обратная функция ($f \circ \tilde{f} = \tilde{f} \circ f = id_A$).

$f(x) = x + 1$, $g(x) = 2x$, $id_A(x) = x$

$f \circ g(x) = f(g(x)) = f(2x) = 2x + 1$

$g \circ f(x) = g(f(x)) = g(x + 1) = 2x + 2 \neq 2x + 1$

Следовательно, (X, \circ) – не коммутативная группа

Обозначение.

- \cdot – мультипликативность, 1 , x^{-1}
- $+$ – аддитивность, 0 , $-x$
- \circ – относительно композиции, id , x^{-1}
- $*$ – абстрактная операция, e , x^{-1}

Пусть $(R, +)$ – абелева группа

Определим отображение

$$\cdot : R \times R \rightarrow R$$

$$(a, b) \mapsto a \cdot b$$

Для $(R, +, \cdot)$ могут быть верны следующие аксиомы:

5. $a(b + c) = ab + ac$

$(b + c)a = ba + ca$ (дистрибутивность)

6. $a(bc) = (ab)c$ (ассоциативность)

7. $\exists 1_R \forall a \in R : 1_R \cdot a = a \cdot 1_R = a$ (нейтральный элемент)

8. $ab = ba$ (коммутативность)

9. $0_R \neq 1_R$

10. $\forall a \neq 0_R \exists a^{-1} : a \cdot a^{-1} = a^{-1} \cdot a = 1_R$ (обратный элемент)

Определение 5. $(R, +, \cdot)$, удовлетворяющее аксиоме 5, называется **не ассоциативным кольцом без единицы**.

Определение 6. $(R, +, \cdot)$, удовлетворяющее аксиомам 5-6, называется **ассоциативным кольцом без единицы**.

Определение 7. $(R, +, \cdot)$, удовлетворяющее аксиоме 5-7, называется **ассоциативным кольцом с единицей**.

Определение 8. $(R, +, \cdot)$, удовлетворяющее аксиомам 5-8, называется **коммутативным кольцом**.

Примеры.

1. \mathbb{Z} – коммутативное кольцо
2. $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ – поля
3. Рассмотрим $\mathbb{Z}_n = 0, \dots, n-1$ с операциями $+_n, \cdot_n$:
 $a +_n b = (a + b) \% n$
 $a \cdot_n b = (a \cdot b) \% n$
 Обратимые элементы:
 $ax = 1 + ny$
 $ax - ny = 1$
 Если $(a, n) = 1$, есть решение, иначе – нет. \mathbb{Z}_p – поле $\Leftrightarrow p \in \mathbb{P}$

Определение 9. V – векторное пространство над полем F , если $(V, +)$ – абелева группа, задано отображение $V \times F \rightarrow V$

$(x, \alpha) \mapsto x \cdot \alpha$, удовлетворяющее аксиомам $\forall x, y \in V, \forall a, b \in F$:

5. $x \cdot (\alpha \cdot \beta) = (x \cdot \alpha) \cdot \beta$
6. $(x + y) \cdot \alpha = x \cdot \alpha + y \cdot \alpha$
 $x \cdot (\alpha + \beta) = x \cdot \alpha + x \cdot \beta$
7. $x \cdot 1_F = x$

$$A \in M_n(F), \alpha \in F$$

$$(A, \alpha)_{ij} = a_{ij} \cdot \alpha$$

$$(AB)\alpha = A(B\alpha)$$

Примеры.

1. Множество векторов в \mathbb{R}^3

$$2. F^n = \left\{ \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \mid a_i \in F \right\}$$

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + b_1 \\ \vdots \\ a_n + b_n \end{pmatrix}$$

3. X – множество, $F^X = \{f \mid f : X \rightarrow F\}$
 $f, g : X \rightarrow F$
 $(f + g)(x) = f(x) + g(x)$
 $(f\alpha)(x) = f(x)\alpha$

4. $F[t]$ – многочлены от одной переменной t

5. V - абелева группа, в которой $\forall a \in V : \underbrace{a + a + \dots + a}_{p \in \mathbb{P}} = 0$ Тогда V - векторное пространство над \mathbb{Z}_p $k \cdot a = \underbrace{a + \dots + a}_k$

1.2 Лекция 3

Определение 10. Алгебра A над полем F – кольцо, являющееся векторным пространством над F ("+" - операция в кольце и в векторном пространстве), такое что $(ab)\alpha = a(b\alpha) \quad a, b \in A, \alpha \in F$

Пример. $(\mathbb{R}^3, +, \times)$ - не ассоциативная алгебра на \mathbb{R}

Определение 11. Матрица размера $I \times J$ (I, J - множества индексов) над множеством X - это функция

$$A : I \times J \rightarrow X, \quad (i, j) \rightarrow a_{ij}.$$

Пусть определено умножение $X \times Y \rightarrow Z, \quad (x, y) \rightarrow xy$
(Z - коммутативный моноид относительно "+")

Определение 12. Строка - матрица размера $\{1\} \times J$
Столбец - матрица размера $J \times \{1\}$

A - строка длины J над X

B - строка длины J над Y

Тогда произведение $AB = \sum_{j \in J} a_{1j} b_{j1} \in Z$

$x \rightarrow x_e$ - координаты вектора x

$$\underbrace{x \cdot y}_{\text{скалярное произведение}} = x_e^T \cdot y_e$$

скалярное произведение

Определение 13. Транспонирование матрицы.

D - матрица $I \times J$ над X

D^T - матрица $J \times I$ над $X : (D^T)_{ij} = (D)_{ji}$

Замечание. Пусть в X есть элемент $0 : 0 \cdot y = 0 \quad \forall y \in Y$. Все кроме конечного числа $a_j = 0$. Тогда AB имеет смысл, даже когда $|J| = \infty$.

"почти все" = кроме конечного количества

Обозначение.

a_{i*} - i -я строка матрицы A

a_{*j} - j -й столбец матрицы A

1.2.1 Произведение матриц

A - матрица $I \times J$ над X .

B - матрица $J \times K$ над Y .

AB - матрица $I \times K$ над $Z = X \cdot Y$, $(AB)_{ik} = a_{i*} \cdot b_{*k} = \sum_{j \in J} a_{ij} \cdot b_{jk}$.

$$(x_1, \dots, x_n) \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = va, \quad v \in V, a \in F.$$

1.3 Лекция 4

Определение 14. $(G, *)$, $(H, \#)$ - группа

$\varphi : G \rightarrow H$ - гомоморфизм, если:

$$\varphi(g_1 * g_2) = \varphi(g_1) \# \varphi(g_2)$$

Определение 15. R, S - кольца

$\varphi : R \rightarrow S$ - гомоморфизм, если:

$$\varphi(r_1 + r_2) = \varphi(r_1) + \varphi(r_2)$$

$$\varphi(r_1 \cdot r_2) = \varphi(r_1) \cdot \varphi(r_2)$$

Для колец с 1: $\varphi(1) = 1$

Определение 16. U, V - векторные пространства над F

$\varphi : U \rightarrow V$ - линейное отображение, если:

$$\varphi(u_1 + u_2) = \varphi(u_1) + \varphi(u_2)$$

$$\varphi(u\alpha) = \varphi(u)\alpha$$

Замечание. Изоморфизм – биективный гомоморфизм.

Определение 17. V - векторное пространство над полем F

v - строка элементов "длины" I над V

a - столбец "высоты" I , почти все элементы которого равны 0.

Тогда va - линейная комбинация набора v с коэффициентами.

Замечание. $U \subset V$

U является векторным пространством относительно тех же операций, которые заданы в V . Тогда U - подпространство V

Лемма. $U \subseteq V$

$\forall u_1, u_2 \in U, \alpha \in F :$

$u_1 + u_2 \in U, u_1\alpha \in U$ Тогда U - подпространство. Если U - подпространство в V , то пишут $U \subseteq V$.

Определение 18. $v = \{v_i | i \in I\}$, где $v_i \in V \forall i \in I$

$\langle v \rangle$ - наименьшее подпространство, содержащее все v_i

Лемма. $\langle v \rangle = \{va | a - \text{столбец высоты } I \text{ над } F, \text{ где почти всюду элементы равны нулю}\} = U$

Доказательство. $v_i \in \langle v \rangle \Rightarrow v_i a_i \in \langle v \rangle$

$\Rightarrow v_{i_1} a_{i_1} + \dots + v_{i_k} a_{i_k} \in \langle v \rangle$

$\Rightarrow \langle v \rangle$ содержит все варианты комбинаций. $va + vb = v(a + b) \in U$

$(va)\alpha = v(a\alpha) \in U$

\Rightarrow множество линейных комбинаций – подпространство U - подпространство, содержащее $v_i \forall i \in I$

$\langle v \rangle$ – наименьшее подпространство, содержащее v_i

$\Rightarrow \langle v \rangle \subseteq U$ тогда $\langle v \rangle = U$ □

Определение 19. Если $\langle v \rangle = V$, то v – система образующих пространство V

Базис – система образующих.

Обозначение. F^I – множество функций из I в F = множество столбцов высоты I

${}^I V$ – множество строк длины I

Набор элементов из V , заиндексированных множеством I – это функция $f : I \rightarrow V$
 $i \mapsto f_i$

Определение 20. $v \in {}^I V$

v – **линейно независим**, если $\forall a \in F^I, a \neq 0 \Rightarrow va \neq 0$

Теорема 1.3.1. $v \subseteq V$ (можно считать, что v – строка длины v)

Следующие утверждения эквивалентны:

1. v – линейно независимая система образующих

2. v – максимальная линейно-независимая система

3. v – минимальная система образующих

4. $\forall x \in V \exists! a \in F^v : x = va = \sum_{t \in v} t \cdot a_t$ (почти все элементы равны 0)

Доказательство. (1) \Rightarrow (4) – доказали ранее (1) \Rightarrow (2)

$x \in V \setminus v$

$x = va (a \in F^v)$

$va = x \cdot 1 = 0$ – линейная зависимость набора $v \cup x$

Т.о. любой набор, строго содержащий v , линейно зависим $\Rightarrow v$ – максимальный.

(1) \Rightarrow (2)

$x \in V \setminus v$

$v \subseteq V \cup x$ – линейно зависим

$va + xa_x = 0$

$a \neq 0$

Если $a_x = 0 \Rightarrow va = 0 \Rightarrow a = 0$?!

Значит $a_x \neq 0$

$$va = c \cdot (-a_x)$$

$$x = v \cdot \frac{a}{-a_x} \Rightarrow v \text{ - система образующих.}$$

□

Лемма. (Цорн) Пусть \mathbb{A} – набор подмножеств (не всех) множества X .

Если объединение любой цепи из \mathbb{A} , принадлежащей \mathbb{A} , то в \mathbb{A} существует максимальный элемент.

$$M \in \mathbb{C} \text{ - максимальная, если } M \subseteq M' \subseteq \mathbb{A} \Rightarrow M = M'$$

Теорема 1.3.2. (о существовании базиса) V – векторное пространства

X – линейное независимое подмножество V

Y – система образующих V

$$X \leq Y$$

Тогда существует базис Z пространства $V : X \leq Z \leq Y$

Доказательство. \mathbb{A} – множество всех линейно независимых подмножеств, лежащих между

X и Y . $X \in \mathbb{A}$

$$\mathbb{C} \leq \mathbb{A}$$

$$X \leq \cup \mathbb{C} \in \mathbb{C} \leq Y$$

Пусть $\cup \mathbb{C} \in \mathbb{C}$ – линейно зависимый. То есть $\exists u_1, \dots, u_2 \in / \dots$

\dots

Пусть v – базис V .

$$\forall x \in V \exists! x_v \in F^v : x = v \cdot x_v$$

$$v = (v_1, \dots, v_n), \quad x_v = \text{матрица столцов альфа};$$

$$x = v_1 \alpha_1 + \dots = v \cdot x_v$$

□

1.4 Лекция 5

1.5 Лекция 6

1.6 Лекция 7

Утверждение.

$$U \leq W \quad \exists V \leq W : W = U \oplus V$$

Доказательство. Выберем базис u в U . Дополним до базиса $u \cup v$ пространства W и положим $V = \langle v \rangle$.

$$\langle u \rangle = U \quad \langle v \rangle = V \quad \langle u \cup v \rangle = \langle u \rangle + \langle v \rangle = U \oplus V = W$$

$x \in U \cap V \Rightarrow x = ua = vb \Leftrightarrow ua - vb = 0 \Rightarrow a = 0, b = 0$ ($u \cup v$ — линейно независимый

□

Следствие.

u — базис U, v — базис $V, U, V \leq W$

$u \cup v$ — базис $W \Leftrightarrow U \oplus V$

25.09.2019

1.7 Лекция 8

$v = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in n^V$

$M_n(F)$ — алгебра матриц размера $n \times n$ над F

$GL_n(F) = M_n(F)^*$ — полная линейная группа степени n над F

Лемма.

$v \in n^V, A \in GL_n(F)$

v — линейно независимый $\Leftrightarrow vA$ — линейно независимый

$\langle v \rangle = \langle vA \rangle$

Доказательство. $(vA)A^{-1} = v(AA^{-1}) = vE = v$, поэтому можно доказывать только в одну сторону.

v — линейно независимый.

$vAb = 0 \Rightarrow A^{-1}Ab = 0 \Rightarrow b = 0$, т.е. vA — линейно независимый.

$(vA)b = v(Ab) \in \langle v \rangle, \langle vA \rangle \leq \langle v \rangle$

□

Утверждение. u, v — два разных базиса пространства V .

Тогда $\exists!$ матрица $A \in GL_n(F) : u = vA$

При этом $a_{*k} = (u_k)_v \quad \forall k = 1, \dots, n$. Такая матрица обозначается $C_{v \rightarrow u}$ и называется матрицей перехода от v к u .

$$C_{v \rightarrow u} C_{u \rightarrow v} = C_{v \rightarrow u} C_{u \rightarrow v} = E$$

Доказательство. Положим $a_{*k} = (u_k)_v \Rightarrow u_k = va_{*k} \Rightarrow u = vA$.

$vA = vB \Leftrightarrow A = B$ то есть A — единственно.

Далее:

$$\left. \begin{aligned} u &= vC_{v \rightarrow u} \\ v &= uC_{u \rightarrow v} \end{aligned} \right\}$$

$$uE = uC_{v \rightarrow u}C_{u \rightarrow v}$$

$$E = C_{u \rightarrow v}C_{v \rightarrow u}$$

□

Следствие. v - базис V

$f : GL_n(F) \rightarrow$ множество базисов пространства V

$f(A) = vA$ - биекция.

Доказательство.

$$|F| = q \quad \dim V = u$$

$$(q^n - 1)(q^n - q) \dots (q^n - q^{n-1}) - \text{количество базисов}$$

\mathbb{F} - поле из q элементов. □

Утверждение. Если матрица двусторонне обратима, то она квадратная.

Следствие. u, v - базисы V

$$x = C_{u \rightarrow v} x_v$$

Доказательство.

$$x = ux_u = vx_v$$

$$v = uC_{u \rightarrow v}$$

$$ux_u = uC_{u \rightarrow v}x_v \Rightarrow x_u = C_{u \rightarrow v}x_v$$

□

Следствие. (Матричные линейные отображения)

$$L : U \rightarrow V, \quad u - \text{базис } U, v - \text{базис } V$$

Тогда $\exists!$ матрица $L_{v,u}(L_u^v : \forall x \in U L(x)_v = L_u^v x_u)$

При этом $(L_u^v)_{*k} = L(u_k)_v$

Замечание.

$$u = (u_1, \dots, u_n) \in n^U$$

$$L : U \rightarrow V$$

$$L(a) := (L(u_1), \dots, L(u_n))$$

$$L(ua) = L(u)a \quad a \in F^n$$

$$\varphi_v : V \rightarrow F^n$$

$$\varphi_v(g) = y_v \quad \forall g \in V$$

φ_v - линейно $\Rightarrow (L(u)a)_v = L(u)_v a$

$$L(u)_v := (L(u_1)_v, \dots, L(u_n)_v)$$

Доказательство.

$$x = ux_u$$

$$L(x) = L(u)x_u$$

$$L(x)_v = L(u)_v x_u$$

Положим $L_u^v := L(u)_v$.

$$\forall x \in U : L(x)_v = L_u^v x_u$$

$$\text{При } x = u_k : L(u_k)_v = L_u^v(u_k)_u = (L_u^v)_k$$

□

Замечание. Если $Ax = Bx \quad \forall x \in F^n$, то $A = B$

26.09.2019

1.8 Лекция 9

Примеры.

1. $V = \mathbb{R}[t]_3$ - многочлены степени не более 3

$$D(p) = p' \quad V \rightarrow V$$

$$v = (1, t, t^2, t^3).$$

$$D(1) = 0, D(t) = 1, D(t^2) = 2t.$$

$$D_v = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$v^{(1)} = (1, \frac{t}{1!}, \frac{t^2}{2!}, \frac{t^3}{3!}).$$

2. $V = \mathbb{R}[t]$

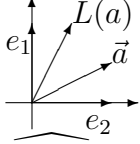
$$v = (1, t, \frac{t^2}{2}, \dots, \frac{t^n}{n!}, \dots).$$

$$D(v_0) = 0, D(v_k) = v_{k-1}.$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & & \dots \\ & 0 & 1 & \dots \\ & & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & & \ddots \end{pmatrix}$$

3. $V = \mathbb{R}^3$

$$|L(a)| = |a|$$



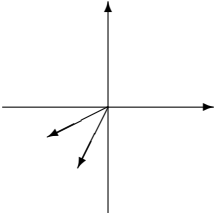
$$\widehat{a, L(a)} = \varphi$$

$e = (e_1, e_2)$ - базис

$$L(e_1)_e = \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix}$$

$$L(e_2)_e = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix}$$

$$L_e = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}.$$



$$a_e = \begin{pmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \end{pmatrix}$$

$$L(a)_e = \begin{pmatrix} \cos(\psi + \varphi) \\ \sin(\psi + \varphi) \end{pmatrix}.$$

$$L(a)_e = L_e \cdot a_e = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi \\ \cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \cos \psi \end{pmatrix}.$$

Утверждение. $L : U \rightarrow V$

u, u' — базис U

v, v' — базис V

Тогда $L_{u'}^{v'} = C_{v' \rightarrow v} L_u^v C_{u \rightarrow u'}$

Доказательство.

$$L(x)_v = L_u^v x_u.$$

$$C_{v' \rightarrow v} L(x)_v = L(x)_{v_1} = L_{u'}^{v'} x_{u'} = L_{u'}^{v'} C_{u' \rightarrow u} x_u.$$

$$\forall x_u \in F^{\dim U}$$

$$L(x)_v = C_{v \rightarrow v'} L_{u'}^{v'} C_{u' \rightarrow u} x_k.$$

$$L_u^v = C_{v \rightarrow v'} L_{u'}^{v'} C_{u' \rightarrow u}.$$

□

Замечание.

Если $U = V \quad u = v, u' = v'.$

$$L_{u'} = C_{u' \rightarrow u} L_u C_{u \rightarrow u'}.$$

Утверждение. *Линейное отображение однозначно определяется образом базисных векторов.*

$u = (u_1, \dots, u_n)$ — базис U

Для любого векторного пространства V :

$$\forall v_1, \dots, v_n = V$$

$$\exists! \text{ линейное отображение } ({}^*)L : U \rightarrow V : L(u_k) = v_k \quad \forall k$$

Доказательство.

$$L(ua) := va$$

$$\forall L^* : L(ua) = L(u)a = va$$

□

При этом L - инъективно тогда и только тогда, когда v - линейно независимый

L - сюръективно тогда и только тогда, когда v - система образующих

L - изоморфизм тогда и только тогда, когда v - базис.

Утверждение. $V, \quad v, v' - \text{базис } V$

$L : V \rightarrow V - \text{линейно}$

$$L(v_k) = v'_k \quad \forall k$$

$$(L_v)_k = L(v_k)_v = (v'_k)_v$$

$$L_v = C_{v \rightarrow v'}.$$

по другому

$$(Id_{v'}^v)_k = Id(v'_k)_v = (v'_k)_v.$$

$$\text{Тогда } L_v = C_{v \rightarrow v'} = Id_{v'}^v$$

Определение 21. $f : X \rightarrow Y$

$$Im f = \{f(x) \mid x \in X\}$$

$L : U \rightarrow V$ - линейное отображение

$$Im L = \{L(x) \mid x \in U\}$$

$$Ker L = L^{-1}(0) = \{x \in U \mid L(x) = 0\}$$

Лемма.

$$Im L \leq V$$

$$Ker L \leq U$$

Пусть $L(x) = y$

$$\forall y \in V : L^{-1} = x + Ker L$$

$$L^{-1}(y) = \{z \in U \mid L(z) = y\}$$

$$x + Ker L = \{x + z \mid z \in Ker L\}$$

1.9 Лекция 9

Теорема 1.9.1. $L : U \rightarrow V$

$$\dim U = \dim \text{Ker} L + \dim \text{Im} L.$$

Доказательство. $u = (u_1, \dots, u_k)$ – базис $\text{Ker} L$

$v = (v_1, \dots, v_m)$ Дополним базис ядра до базиса U : $u \cup v$ – базис U

$L(v) = (L(v_1), L(v_2), \dots, L(v_m))$ – базис образа. $\forall x \in \text{Im} L \exists y \in U : L(y) = x$. $y = ua + vb$, $a \in F^k, b \in F^m$

$$x = L(y) = \underbrace{L(u)}_{(L(u_1), \dots, L(u_k)) = (0, \dots, 0)} + L(v).$$

Следовательно, $L(v)$ – система образующих.

$$L(v)c = 0, \quad c \in F^m.$$

$$L(vc) = 0 \Rightarrow vc \in \text{Ker} L \Rightarrow vc = ud \quad \text{для некоторого } d \in F^k.$$

Тогда $vc - ud = 0$, но v и u – два базисных вектора. Следовательно, $c = d = 0$ и $L(v)$ – линейно независимый. \square

Теорема 1.9.2. (формула Грассмана о размерности суммы и пересечения)

$U, V \leq W$

$$\dim U \cap V + \dim U + V = \dim U + \dim V.$$

Доказательство. \forall внешнюю сумму $U \oplus V$, $L(u, v) = u + v$

Тогда $\text{Im} L = U + V$. $(u, v) \in \text{Ker} L \Leftrightarrow u + v = 0 \Leftrightarrow u = -v \subset U \cap V$

$\text{Ker} L = (u, -u) \mid u \in U \cap V \cong U \cap V$

$$\dim(U \oplus V) = \dim \text{Ker} L + \dim \text{Im} L = \dim U \cap V + \dim U + V \quad \text{AB} \quad \square$$