Curs 1

Structura (în mare) a cursului: $\begin{cases} \text{cap. I: Elemente de algebră liniară} \\ \text{cap. II: Elemente de programare liniară} \\ \text{cap. III: Elemente de analiză matematică} \end{cases}$

CAP. I: Elemente de algebră liniară (vectorială)

I.1 Spații liniare (vectoriale)

mulțimea vidă

Obs: i) Numim **produs cartezian** a două mulțimi oarecare nevide A, B $(A, B \neq \emptyset)$, mulțimea **ordonată** a perechilor de elemente definită astfel:

$$A \times B \overset{def}{=} \{x = (a,b) \;/\; a \in A,\ b \in B\}$$

primul element
al doilea element

$x \overset{not}{=} (a,b) \neq y \overset{not}{=} (b,a)$

Ex: $\begin{cases} x = (1,2) \\ y = (2,1) \end{cases} \Rightarrow x \neq y$

ii) Dacă $A \equiv B$ (coincide), avem:

$$A \times A \overset{not}{=} A^2 \overset{def}{=} \{(a,b) \;/\; a, b \in A\}$$

iii) Generalizând definim mulțimile: $A^3, A^4, A^5, \dots, A^n, A^{n+1}, \dots$

Ex: $A^3 \overset{def}{=} A^2 \times A = A \times A \times A \overset{def}{=} \{x = (a,b,c) \;/\; a,b,c \in A\}$ → produs cartezian a 3 mulțimi

Fie $V \neq \emptyset$ o mulțime oarecare nevidă, cu elementele notate cu: $\begin{cases} u, v, w, \dots \\ u_1, u_2, u_3, \dots \\ x, y, z, \dots \\ x_1, x_2, x_3, \dots \end{cases}$ ← vectori (denumire generică)

și mulțimea $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ → corpul comutativ al nr. reale, cu elementele

notate cu: $\begin{cases} a, b, c, \dots \\ a_1, a_2, a_3, \dots \\ \alpha, \beta, \gamma, \dots \\ \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots \end{cases}$ ← scalari

Vom presupune că putem defini pe mulțimea V două operații (legi de compoziție) notate:

$$(*) \begin{cases} \oplus : V \times V \longrightarrow V \\ (u, v) \xrightarrow{\oplus} u \oplus v \overset{not}{=} w \end{cases}$$

– operația de adunare a vectorilor (lege de compoziție internă)

$$(**) \begin{cases} * : \mathbb{R} \times V \longrightarrow V \\ (\alpha, u) \xrightarrow{*} \alpha * u \overset{not}{=} v \end{cases}$$

– operația de înmulțire a vectorilor cu scalari (reali) (lege de compoziție externă)

Def 1 Spunem că mulțimea V formează un spațiu liniar (vectorial), peste corpul nr. reale, în raport cu operațiile definite de relațiile $(*)$ și $(**)$ dacă:

a) $(V, \oplus)$ – grup abelian (comutativ), adică satisface proprietățile:

$a_1)$ $(u \oplus v) \oplus w = u \oplus (v \oplus w)$; $(\forall)\, u, v, w \in V$ → asociativitatea op. de adunare a vectorilor

$a_2)$ $(\exists!)\, u' \overset{not}{=} 0_V \in V$ a.î.: $u \oplus 0_V = 0_V \oplus u = u$, $(\forall)\, u \in V$ {sau: $u \oplus u' = u' \oplus u = u$} → existența elem. neutru

$a_3)$ $(\forall)\, u \in V$, $(\exists!)\, u'' \overset{not}{=} -u$ a.î.: $u \oplus (-u) = (-u) \oplus u = 0_V$ {sau: $u \oplus u'' = u'' \oplus u = 0_V$} → existența elem. opus (simetric)

$a_4)$ $u \oplus v = v \oplus u$; $(\forall)\, u, v \in V$ → comutativitatea op. de adunare a vectorilor

b) $(V_{/\mathbb{R}}, *)$ satisface proprietățile (numite axiomele spațiului liniar)

$$\begin{cases} b_1)\ \alpha*(u\oplus v)=(\alpha*u)\oplus(\alpha*v)\ ;\ (\forall)\alpha\in\mathbb{R} \text{ și } (\forall)u,v\in V \\ b_2)\ (\alpha+\beta)*u=(\alpha*u)\oplus(\beta*u)\ ;\ (\forall)\alpha,\beta\in\mathbb{R} \text{ și } (\forall)u\in V \\ b_3)\ (\alpha\cdot\beta)*u=\alpha*(\beta*u)=\beta*(\alpha*u)\ ;\ (\forall)\alpha,\beta\in\mathbb{R} \text{ și } (\forall)u\in V \\ b_4)\ 1*u=u\ ;\ (\forall)u\in V\quad (1\in\mathbb{R}) \end{cases}$$

Obs:

i) notăm cu: $(V_{/\mathbb{R}},\oplus,*)\equiv(V,\oplus,*)\equiv V \rightarrow$ sp. liniar (vectorial) V

dacă nu există pericol de confuzie asupra operațiilor $\oplus$ și $*$

ii) $0_V \rightarrow$ vectorul nul (față de adunarea vectorilor) al spațiului liniar V;

iii) $-u \rightarrow$ opusul vectorului „u" (vectorul opus vectorului „u")

iv) Atenție: „$(\forall)$" $\rightarrow$ „oricare"; „$(\exists)$" $\rightarrow$ „există"; „$(\exists!)$" $\rightarrow$ „există și este unic"

iv) în definirea noțiunii de „spațiu liniar (vectorial)" apar 4 operații și anume:

pe $\mathbb{R}$: $\begin{cases}\text{„+" - adunarea nr. reale}\\ \text{„·" - înmulțirea nr. reale}\end{cases}$ pe V $\begin{cases}\text{„}\oplus\text{" - adunarea vectorilor}\\ \text{„*" - înmulțirea unui scalar cu un vector}\end{cases}$

dar pentru a nu complica notațiile și scrierea, convenim să notăm operațiile definite pe V cu aceleași simboluri ca și operațiile definite pe $\mathbb{R}$, adică: $\begin{cases}\text{„}\oplus\text{"} \equiv \text{„+"}\\ \text{„*"} \equiv \text{„·"}\end{cases}$

Atunci vom folosi notația: $\begin{cases}(V_{/\mathbb{R}},\oplus,*)\equiv(V_{/\mathbb{R}},\underbrace{+}_{\text{adunarea vectorilor}},\underbrace{\cdot}_{\text{înmulțirea vectorilor cu scalari reali}})\\ \text{sau:}\\ (V,\oplus,*)\equiv(V,+,\cdot)\end{cases}$

v) atunci cele 8 proprietăți ale spațiului liniar din Def 1 se vor scrie mult mai simplu astfel:

$$\begin{cases} a_1)\ (u+v)+w=u+(v+w)\ ;\ (\forall)u,v,w\in V\\ a_2)\ (\forall)u\in V,\ (\exists!)\,0_V\in V \text{ a.î.: } u+0_V=0_V+u=u\\ a_3)\ (\forall)u\in V,\ (\exists!)\,-u\in V \text{ a.î.: } u+(-u)=(-u)+u=0_V\\ a_4)\ u+v=v+u\ ;\ (\forall)u,v\in V\end{cases}$$

respectiv:

$$\begin{cases} b_1)\ \alpha(u+v)=\alpha u+\alpha v\\ b_2)\ (\alpha+\beta)u=\alpha u+\beta u\\ b_3)\ (\alpha\beta)u=\alpha(\beta u)=\beta(\alpha u)\\ b_4)\ 1\cdot u=u\end{cases}\ ;\ (\forall)u,v\in V \text{ și } (\forall)\alpha,\beta\in\mathbb{R}$$

Exemple de spaţii liniare

① $(\vec{V}_3, +, \cdot)$ - spaţiul liniar tridimensional al vectorilor liberi

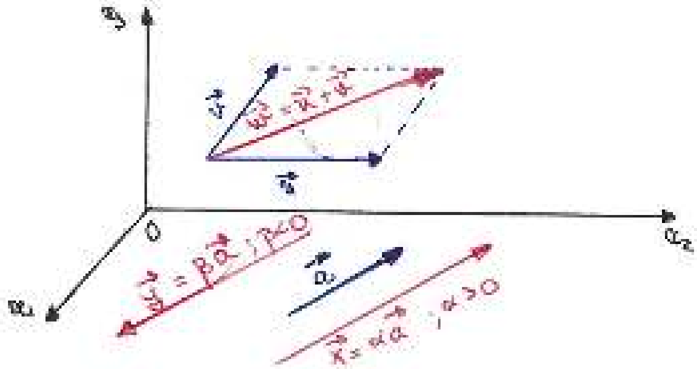
unde:

$$\begin{cases} V \overset{not}{\equiv} \vec{V}_3 \overset{def}{=} \{ \vec{u} = \vec{AB} \ / \ \text{unde } A, B \in \mathbb{R}^3 \text{ - puncte într-un spaţiu (afin) cu 3 dimensiuni} \} \\ „\oplus" \overset{not}{\equiv} „+" \to \text{adunarea a doi vectori liberi (cu regula paralelogramului / triunghiului)} \\ „*" \overset{not}{\equiv} „\cdot" \to \text{înmulţirea unui vector liber cu un scalar real (multiplicarea)} \end{cases}$$

deci:

$$(*) \begin{cases} „+": \vec{V}_3 \times \vec{V}_3 \to \vec{V}_3 \\ (\vec{u}, \vec{v}) \xrightarrow{„+"} \vec{u} + \vec{v} \overset{not}{=} \vec{w} \end{cases}$$

$$(**) \begin{cases} „\cdot": \mathbb{R} \times \vec{V}_3 \to \vec{V}_3 \\ (\alpha, \vec{u}) \xrightarrow{„\cdot"} \alpha \vec{u} \overset{not}{=} \vec{v} \end{cases}$$



② $(P_n(X), +, \cdot)$ - sp. lin. (n+1 dimensional) al polinoamelor de grad cel mult „n"

unde:

$$\begin{cases} V \equiv P_n(X) \overset{def}{=} \{ P(x) \in \mathbb{R}[X] \ / \ P(x) = a_n X^n + a_{n-1} X^{n-1} + \dots + a_2 X^2 + a_1 X + a_0 ; \ a_i \in \mathbb{R}, i = \overline{0,n} \} \\ „\oplus" \overset{not}{\equiv} „+" \to \text{adunarea a două polinoame (cu coeficienţi reali)} \\ „*" \overset{not}{\equiv} „\cdot" \to \text{înmulţirea unui polinom cu un scalar (număr) real} \end{cases}$$

deci:

$$(*) \begin{cases} „+": P_n(X) \times P_n(X) \to P_n(X) \\ (P(X), Q(X)) \xrightarrow{„+"} P(X) + Q(X) \overset{not}{=} R(X) \end{cases}$$

$$\underline{P(X) + Q(X)} \equiv (a_n X^n + \dots + a_1 X + a_0) + (b_n X^n + \dots + b_1 X + b_0) \overset{def}{=} \overbrace{(a_n + b_n)}^{\overset{not}{=} c_n} X^n + \dots + \overbrace{(a_1 + b_1)}^{\overset{not}{=} c_1} X + \overbrace{(a_0 + b_0)}^{\overset{not}{=} c_0}$$

$$= c_n X^n + \dots + c_1 X + c_0 \overset{not}{=} \underline{R(X)}$$

$$(**) \begin{cases} „\cdot": \mathbb{R} \times P_n(X) \to P_n(X) \\ (\alpha, P(X)) \xrightarrow{„\cdot"} \alpha \cdot P(X) \overset{not}{=} Q(X) \end{cases}$$

$$\alpha \cdot P(X) \equiv \alpha \cdot (a_n X^n + \dots + a_1 X + a_0) \overset{def}{=} \underbrace{(\alpha a_n)}_{\overset{not}{=} b_n} X^n + \dots + \underbrace{(\alpha a_1)}_{\overset{not}{=} b_1} X + \underbrace{(\alpha \cdot a_0)}_{\overset{not}{=} b_0} = b_n X^n + \dots + b_1 X + b_0 \overset{not}{=} Q(X)$$

③ $(\mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R}), +, \cdot)$ - sp. lin. (m·n dimensional) al matricelor cu „m" linii şi „n" coloane

unde:

$$\begin{cases} V \equiv \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R}) = \{ A = (a_{ij})_{\substack{i=\overline{1,m} \\ j=\overline{1,n}}} \ / \ a_{ij} \in \mathbb{R} \} \\ „\oplus" \equiv „+" \to \text{op. de adunare a două matrici (de acelaşi tip)} \\ „*" \equiv „\cdot" \to \text{op. de înmulţire a unei matrici cu un scalar (număr) real} \end{cases}$$

Deci:

$$(*)\begin{cases} "+" : \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R}) \times \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R}) \longrightarrow \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R}) \\ (A,B) \xrightarrow{"+"} A+B \overset{not}{=} C \end{cases}$$

$$\underline{A+B} \equiv (a_{ij})_{\substack{i=\overline{1,m}\\ j=\overline{1,n}}} + (b_{ij})_{\substack{i=\overline{1,m}\\ j=\overline{1,n}}} \overset{def}{=} (\underbrace{a_{ij}+b_{ij}}_{\overset{not}{=} c_{ij}})_{\substack{i=\overline{1,m}\\ j=\overline{1,n}}} \overset{not}{=} (c_{ij})_{\substack{i=\overline{1,m}\\ j=\overline{1,n}}} = \underline{C}$$

$$(**)\begin{cases} "\cdot" : \mathbb{R} \times \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R}) \longrightarrow \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R}) \\ (\alpha, A) \xrightarrow{"\cdot"} \alpha \cdot A \overset{not}{=} B \end{cases}$$

$$\underline{\alpha \cdot A} \equiv \alpha \cdot (a_{ij})_{\substack{i=\overline{1,m}\\ j=\overline{1,n}}} \overset{def}{=} (\underbrace{\alpha \cdot a_{ij}}_{\overset{not}{=} b_{ij}})_{\substack{i=\overline{1,m}\\ j=\overline{1,n}}} \overset{not}{=} (b_{ij})_{\substack{i=\overline{1,m}\\ j=\overline{1,n}}} = \underline{B}$$

4) !!! $\underline{(\mathbb{R}^n, +, \cdot)}$ **- sp. lin. $\mathbb{R}^n$** (în acest spațiu vom lucra pe tot parcursul acestui curs!!!)

unde:

$$V \equiv \mathbb{R}^n = \underbrace{\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \dots \times \mathbb{R}}_{n \text{ ori}} \overset{def}{=} \{x = (x_1, x_2, \dots, x_n) / x_i \in \mathbb{R}, i=\overline{1,n}\} \equiv \{x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T / x_i \in \mathbb{R}, i=\overline{1,n}\}$$

$x_1, x_2, \dots, x_n$ — componentele vectorului x

$x = (x_1, \dots, x_n)$ — vector linie din $\mathbb{R}^n$ (sau: n-uplu)

$x = (x_1, \dots, x_n)^T$ — vector coloană din $\mathbb{R}^n$

Obs. - în cap. I (algebră liniară) și cap. II (programare liniară) vom folosi pentru vectori din $\mathbb{R}^n$ scrierea (notația) lor sub formă de vectori coloană (așa apar în aplicații, pe coloană) adică vectorii vor fi de forma: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \equiv \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$

- în cap. III (analiză matematică) vom folosi scrierea vectorilor din $\mathbb{R}^n$ ca vectori linie, adică de forma: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

Operațiile:

„$\oplus$" $\overset{not}{\equiv}$ „+" și „$*$" $\overset{not}{\equiv}$ „$\cdot$" sunt definite astfel:

$$(*)\begin{cases} "+" : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n \\ (x,y) \xrightarrow{"+"} x+y \overset{not}{=} z \end{cases}$$

definită astfel: $x+y \equiv (x_1, x_2, \dots, x_n)^T + (y_1, y_2, \dots, y_n)^T \overset{def}{=}$
$\overset{def}{=} (\underbrace{x_1+y_1}_{\overset{not}{=} z_1}, \underbrace{x_2+y_2}_{\overset{not}{=} z_2}, \dots, \underbrace{x_n+y_n}_{\overset{not}{=} z_n})^T = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T = z$

Ex. Fie vectorii $\begin{cases} x = (1,1,3)^T \\ y = (-2,0,2)^T \end{cases} \in \mathbb{R}^3$ și $\begin{cases} u = (2,-3)^T \\ v = (0,-3)^T \end{cases} \in \mathbb{R}^2$ ~~și scalarii~~. Atunci:

$$\begin{cases} \underline{x+y} = (1,1,3)^T + (-2,0,2)^T \overset{def}{=} (1-2, 1+0, 3+2)^T = \underline{(-1,1,5)^T} \in \mathbb{R}^3 \\ \underline{u+v} = (2,-3)^T + (0,-3)^T \overset{def}{=} (2+0, -3-3)^T = \underline{(2,-6)^T} \in \mathbb{R}^2 \\ \underline{x+v} = (1,1,3)^T + (0,-3)^T = \underset{\text{nu are sens (operația nu este definită cf. (*))}}{???} \text{ (nu se pot aduna vectori din spații diferite } \left(\begin{smallmatrix} x \in \mathbb{R}^3 \\ v \in \mathbb{R}^2 \end{smallmatrix}\right) \text{ !!!)} \end{cases}$$

Deci, dacă $x \in \mathbb{R}^n$ și $y \in \mathbb{R}^m$ cu $m \neq n$, operația de adunare a lor $x+y = ?$ nu are sens!!!

$(**)\begin{cases} \text{"}\cdot\text{"}: \mathbb{R}\times\mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n \\ (\alpha, x) \xrightarrow{\text{"}\cdot\text{"}} \alpha\cdot x \overset{\text{not}}{=} y \end{cases}$ definită astfel: $\alpha\cdot x = \alpha\cdot(x_1, x_2, \dots, x_n)^T \overset{\text{def}}{=} (\underbrace{\alpha x_1}_{\overset{\text{not}}{=} y_1}, \underbrace{\alpha x_2}_{\overset{\text{not}}{=} y_2}, \dots, \underbrace{\alpha x_n}_{\overset{\text{not}}{=} y_n})^T \overset{\text{not}}{=} (y_1, y_2, \dots, y_n)^T = y$

<u>Ex</u> Fie vectorii: $\begin{cases} x = (2,1,-1,3)^T \in \mathbb{R}^4 \\ y = (0,2,0,-4)^T \in \mathbb{R}^4 \\ z = (1,1,-1)^T \in \mathbb{R}^3 \end{cases}$ și scalarii $\alpha = 2$, $\beta = -3$

Atunci: $\begin{cases} \alpha x = 2x = 2(2,1,-1,3)^T = (4,2,-2,6)^T \\ \beta y = -3y = -3(0,2,0,-4)^T = (0,-6,0,12)^T \\ \alpha x + \beta y = 2x - 3y = (4,2,-2,6)^T + (0,-6,0,12)^T = (4,-4,-2,18)^T \\ \alpha z = 2z = 2(1,1,-1)^T = (2,2,-2)^T \\ \alpha x + \beta z = 2x - 3z = 2(2,1,-1,3)^T - 3(1,1,-1)^T = (4,2,-2,6)^T + (-3,-3,3)^T = ??? \end{cases}$

<u>Obs</u>:

i) $0_{\mathbb{R}^n} \overset{\text{not}}{=} 0_n \overset{\text{def}}{=} (0,0,\dots,0)^T \to$ vectorul nul al spațiului $\mathbb{R}^n$

ii) $(\forall)\ x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n \to$ opusul său este vectorul $-x \overset{\text{def}}{=} (-x_1, -x_2, \dots, -x_n)^T \in \mathbb{R}^n$

<u>Ex</u> $x = (3,-2,4)^T \Rightarrow -x = (-3,2,-4)^T$

iii) doi vectori $x, y \in \mathbb{R}^n$ <u>coincid</u> (sunt egali) $\Leftrightarrow$ toate componentele lor coincid (sunt egale) și au aceeași ordine!!

adică, dacă:

$\begin{cases} x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T \end{cases} \in \mathbb{R}^n$, atunci $x = y \Leftrightarrow (x_1, x_2, \dots, x_n)^T = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T \Leftrightarrow \begin{cases} x_1 = y_1 \\ x_2 = y_2 \\ \dots \\ x_n = y_n \end{cases} \Leftrightarrow x_i = y_i,\ i = \overline{1,n}$

<u>Ex</u>: $\begin{cases} x = (2,0,2)^T \\ y = (2,2,0)^T \end{cases} \Rightarrow \underline{x \neq y}$ (au aceleași componente dar <u>nu</u> în aceeași ordine)

I.2 Dependență și independență liniară a vectorilor

Teorema 1 Fie $(\mathcal{V},+,\cdot)$ un spațiu liniar (vectorial) oarecare. Atunci au loc relațiile:

$$(1.1)\begin{cases} i)\ 0\cdot u = 0_{\mathcal{V}} & ; (\forall) u\in\mathcal{V}\ (0\in\mathbb{R}) \\ ii)\ \alpha\cdot 0_{\mathcal{V}} = 0_{\mathcal{V}} & ; (\forall)\alpha\in\mathbb{R} \\ iii)\ 0_{\mathcal{V}}+0_{\mathcal{V}}=0_{\mathcal{V}} \end{cases}$$

Def 2 Numim combinație liniară a „m" vectori din sp. lin. $\mathcal{V}$, expresia:

$$(1.2)\ \text{"}\alpha_1u_1+\alpha_2u_2+\dots+\alpha_mu_m\text{"}\ ;\ \alpha_i\in\mathbb{R},\ u_i\in\mathcal{V},\ i=\overline{1,m}$$

Obs:

i) combinația liniară a unui nr. oarecare de vectori din $\mathcal{V}$ este tot un vector din $\mathcal{V}$, adică:

$$\alpha_1u_1+\alpha_2u_2+\dots+\alpha_mu_m \overset{not}{=} v\in\mathcal{V}$$

ii) dacă $\alpha_i=0,\ i=\overline{1,m} \Rightarrow \alpha_1u_1+\dots+\alpha_mu_m=0_{\mathcal{V}},\ (\forall)u_i\in\mathcal{V}$

Dem: $\alpha_1u_1+\alpha_2u_2+\dots+\alpha_mu_m = 0\cdot u_1+0\cdot u_2+\dots+0\cdot u_m \overset{(1.1)i}{=} 0_{\mathcal{V}}+0_{\mathcal{V}}+\dots+0_{\mathcal{V}} \overset{(1.1)iii}{=} 0_{\mathcal{V}}$

iii) reciproca nu este adevărată, adică dacă: $\alpha_1u_1+\alpha_2u_2+\dots+\alpha_mu_m=0_{\mathcal{V}} \not\Rightarrow \alpha_i=0,\ (\forall)i=\overline{1,m}$

Dem: dăm un exemplu: fie vectorii $\begin{cases}u_1=(2,2,-1)^T\\u_2=(1,0,-3)^T\\u_3=(1,2,2)^T\end{cases}\in\mathbb{R}^3$ și scalarii $\begin{cases}\alpha_1=1\\\alpha_2=-1\\\alpha_3=-1\end{cases}$

Atunci avem:

$$\alpha_1u_1+\alpha_2u_2+\alpha_3u_3=u_1-u_2-u_3=(2,2,-1)^T-(1,0,-3)^T-(1,2,2)^T=(0,0,0)^T\overset{not}{=}0_{\mathcal{V}}$$ și totuși cei 3 scalari nu sunt egali cu zero.

!

Def 3:

Fie vectorii: $u_1,u_2,\dots,u_m\in\mathcal{V}$ sp. lin. oarecare. Spunem că acești vectori sunt:

a) liniar independenți (L.I.) dacă combinația liniară a lor este vectorul nul $0_{\mathcal{V}}$, doar dacă toți scalarii din combinație sunt nuli ($=0$), adică are loc relația:

$$(1.3)\ \text{din}\ \alpha_1u_1+\alpha_2u_2+\dots+\alpha_mu_m=0_{\mathcal{V}} \Rightarrow \alpha_1=\alpha_2=\dots=\alpha_m=0$$

b) liniar dependenți (L.D) dacă combinația liniară a lor este vectorul nul $0_{\mathcal{V}}$ și pentru scalari nenuli ($\neq 0$ măcar unul dintre scalari), adică:

$$(1.4)\ (\exists)\alpha_i\in\mathbb{R},\ i=\overline{1,m}\ \text{nu toți nuli a.î.}:\ \alpha_1u_1+\alpha_2u_2+\dots+\alpha_mu_m=0_{\mathcal{V}}$$

Obs:

i) $A=\{u_1,u_2,\dots,u_m\}$ - L.I $\Leftrightarrow$ "$\alpha_1u_1+\alpha_2u_2+\dots+\alpha_mu_m=0_{\mathcal{V}} \Rightarrow \alpha_1=\alpha_2=\dots=\alpha_m=0$"

ii) $A=\{u_1,u_2,\dots,u_m\}$ - L.D $\Leftrightarrow$ "$\alpha_1u_1+\alpha_2u_2+\dots+\alpha_mu_m=0_{\mathcal{V}} \not\Rightarrow \alpha_1=\alpha_2=\dots=\alpha_m=0$"

iii) pentru a studia natura (sunt L.D sau L.I) unei mulțimi (set) de vectori cunoscuți $u_1,u_2,\dots,u_m$ se impune condiția (cu scalarii $\alpha_i,\ i=\overline{1,m}$ necunoscuți inițial (apriori)):

$\alpha_1u_1+\alpha_2u_2+\dots+\alpha_mu_m=0_{\mathcal{V}}$. Dacă din această condiție (ec. vectorială) $\Rightarrow \alpha_i=0,\ i=\overline{1,m} \Rightarrow$ vectorii sunt L.I

iv) vectorii u_1,u_2,u_3 din ex. de mai sus sunt L.D (deoarece $(\exists)$ scalari $\neq 0$ în comb. lin.) $\Rightarrow (\exists)\alpha_i\neq 0 \Rightarrow$ vectorii sunt L.D

Proprietăți ale vectorilor L.D și L.i

T_1: O mulțime de vectori este L.D. $\Leftrightarrow$ cel puțin un vector se exprimă ca o combinație liniară de ceilalți vectori, adică:

(1.5) $A=\{u_1,u_2,\dots,u_m\}$ – L.D. $\Leftrightarrow (\exists)\, u_i \in A\ (1\le i\le m)$ a.î.: $(*)\ \underline{u_i=\beta_1 u_1+\dots+\beta_{i-1}u_{i-1}+\beta_{i+1}u_{i+1}+\dots+\beta_m u_m}$

Dem: ($\overset{nec}{\Longrightarrow}$) $\underline{A\text{-}L.D \Rightarrow (*)\ \text{adev}}$

Dacă A–LD $\underset{(1.4)}{\overset{def}{\Longrightarrow}} (\exists)\, \alpha_i \in \mathbb{R},\ i=\overline{1,m}$ nu toți nuli, a.î.: (1) $\alpha_1 u_1+\alpha_2 u_2+\dots+\alpha_{i-1}u_{i-1}+\alpha_i u_i+\alpha_{i+1}u_{i+1}+\dots+\alpha_m u_m=0_V$

Fie $\underline{\alpha_i\neq 0} \overset{(1)}{\Longrightarrow} \alpha_i u_i=-\alpha_1 u_1-\alpha_2 u_2-\dots-\alpha_{i-1}u_{i-1}-\alpha_{i+1}u_{i+1}-\dots-\alpha_m u_m \,/\cdot \frac{1}{\alpha_i}\neq 0 \Leftrightarrow$

$$(2)\ u_i=\underbrace{-\frac{\alpha_1}{\alpha_i}}_{\overset{not}{=}\beta_1}u_1\underbrace{-\frac{\alpha_2}{\alpha_i}}_{\overset{not}{=}\beta_2}u_2-\dots\underbrace{-\frac{\alpha_{i-1}}{\alpha_i}}_{\overset{not}{=}\beta_{i-1}}u_{i-1}\underbrace{-\frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i}}_{\overset{not}{=}\beta_{i+1}}u_{i+1}-\dots\underbrace{-\frac{\alpha_m}{\alpha_i}}_{\overset{not}{=}\beta_m}u_m \Longleftrightarrow \overset{not}{:}\ \beta_k=-\frac{\alpha_k}{\alpha_i},\ k=\overline{1,m},\ k\neq i$$

$$(2')\ u_i=\beta_1 u_1+\beta_2 u_2+\dots+\beta_{i-1}u_{i-1}+\beta_{i+1}u_{i+1}+\dots+\beta_m u_m \Leftrightarrow (*)$$

($\overset{suf}{\Longleftarrow}$) $\underline{(*)\ \text{adev} \Rightarrow A\text{-}L.D}$

Din rel. $(*) \Rightarrow \beta_1 u_1+\beta_2 u_2+\dots+\beta_{i-1}u_{i-1}-u_i+\beta_{i+1}u_{i+1}+\dots+\beta_m u_m=0_V$

$\overset{not}{=}\ \alpha_1=\beta_1;\dots;\alpha_{i-1}=\beta_{i-1};\ \alpha_i=-1;\ \alpha_{i+1}=\beta_{i+1};\dots;\alpha_m=\beta_m \quad \Bigg] \Leftrightarrow$

$\Leftrightarrow \alpha_1 u_1+\alpha_2 u_2+\dots+\alpha_{i-1}u_{i-1}+\alpha_i u_i+\alpha_{i+1}u_{i+1}+\dots+\alpha_m u_m=0_V \underset{cf\ def(1.4)}{\overset{(\exists)\alpha_i=-1\neq 0}{\Longleftrightarrow}} A=\{u_1,u_2,\dots,u_m\}$–L.D

q.e.d

Obs:

i) evident: $\underline{A=\{u_1,\dots,u_m\}-L.i} \Leftrightarrow$ <u>niciunul dintre vectori nu se poate scrie ca și comb. lin. de restul vectorilor</u>

ii) relația $(*)$ (din (1.5)) se numește <u>relație de dependență liniară</u> (vectorul „u_i" depinde liniar de ceilalți „m-1" vectori)

T_2: O mulțime de vectori $A\subset V$ care conține vectorul nul este L.D., adică:

„dacă $0_V\in A \Rightarrow A$–L.D."

Dem Fie $0_V\in A=\{u_1,u_2,\dots,u_m\}$ – oarecare. Fără a restrânge generalitatea pp. că: $(*)\ u_1=0_V$

Fie scalarii: $(**)\begin{cases}\alpha_1=1\\ \alpha_2=\dots=\alpha_m=0\end{cases}\in\mathbb{R}$.

Atunci din $(*)$ și $(**)$ avem: $\underline{\alpha_1 u_1+\alpha_2 u_2+\dots+\alpha_m u_m}=1\cdot 0_V+0\cdot u_2+\dots+0\cdot u_m=0_V+0_V+\dots+0_V=0_V$

$\Rightarrow$ A–L.D (cf. (1.4), există și scalari nenuli)

q.e.d.

Obs:

i) reciproca T_2 nu este adevărată, adică: „dacă A–L.D $\not\Rightarrow 0_V\in A$" (o mulțime poate fi L.D. și fără a conține vectorul nul 0_V);

ii) cu alte cuvinte, dacă: $\begin{cases}(a)\ 0_V\in A \Rightarrow A\text{–LD}\\ (b)\ 0_V\notin A \Rightarrow A < \begin{matrix}L.D\\ L.i\end{matrix}\end{cases}$

iii) evident, dacă mulțimea A–L.i $\Rightarrow 0_V\notin A$

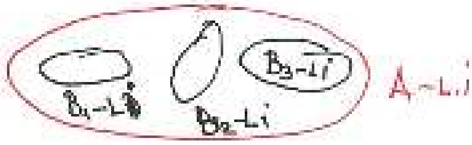
A – LD

$A < \begin{matrix}L.D\\ L.i\end{matrix}$

T_3: Orice submulțime nevidă ($\neq \phi$) a unei mulțimi de vectori L.i. este tot L.i., adică:

„dacă: $A \subset V$ - L.i. ; $B \subseteq A$; $B \neq \phi$ $\Big| \Rightarrow B$ - L.i „

„este inclusă"



Dem: (m.r.a → metoda reducerii la absurd)

Fie $A = \{u_1, u_2, \dots, u_k, u_{k+1}, \dots, u_m\} \subset V$ - L.i și $B = \{u_1, u_2, \dots, u_k\} \subset A$

Vom pp. că B - L.D $\underset{def}{\overset{(1.1)}{\Longleftrightarrow}}$ $(\exists)\, \alpha_i \in \mathbb{R}$, $i = \overline{1,k}$, nu toți nuli, a.î.: $\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 + \dots + \alpha_k u_k = 0_V$ (1)

Fie scalarii $\alpha_{k+1} = \dots = \alpha_m = 0 \in \mathbb{R}$, deci avem: $\alpha_{k+1} u_{k+1} + \dots + \alpha_m u_m = 0_V$ (cf. (1.1)) (2)

Din (1) + (2) obținem: $\underbrace{\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 + \dots + \alpha_k u_k}_{\overset{(1)}{=} 0_V \, \{(\exists)\alpha_i \neq 0\}} + \underbrace{\alpha_{k+1} + \dots + \alpha_m u_m}_{\overset{(2)}{=} 0_V \, \{(\forall)\alpha_i = 0\}} = 0_V + 0_V = 0_V \Leftrightarrow A$ - L.D (F)

Deci pp. făcută (B - L.D) este falsă $\Leftrightarrow$ B - L.i

q.e.d.

Obs:

i) o mulțime formată dintr-un unic vector nenul este L.i ($B = \{u\}$ - L.i $\Leftrightarrow u \neq 0_V$)

Dem: Fie $A = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_m\}$ - L.i $\Rightarrow 0_V \notin A$, deci $(\forall)\, u_i \neq 0_V$, $i = \overline{1,m}$

Fie $B = \{u_i\} \subset A$; A - L.i $\Big| \overset{T_3}{\Longrightarrow} B = \{u_i\}$ - L.i

q.e.d.

ii) T_3 nu este adevărată în cazul mulțimilor de vectori L.D., adică:

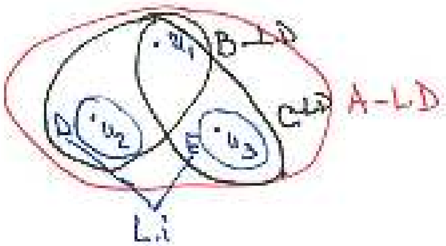
„dacă A - L.D ; $B \subset A$ $\Big| \Rightarrow B <$ L.D / L.i „

Ex: a) Fie vectorii $\begin{cases} u_1 = (1,1)^T \\ u_2 = (2,2)^T \\ u_3 = (3,3)^T \end{cases} \in \mathbb{R}^2$

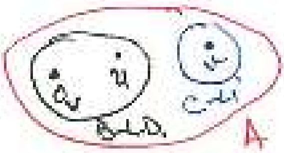
Se observă imediat că:

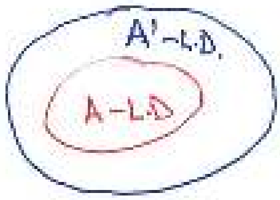
$\begin{cases} \text{i) } u_2 = 2u_1 \Leftrightarrow 2u_1 - u_2 = 0_2 \Leftrightarrow u_1, u_2 \text{ - L.D.} \\ \text{ii) } u_3 = 3u_1 \Leftrightarrow 3u_1 - u_3 = 0_2 \Leftrightarrow u_1, u_3 \text{ - L.D} \\ \text{iii) } u_3 = u_1 + u_2 \Leftrightarrow u_1 + u_2 - u_3 = 0_2 \Leftrightarrow u_1, u_2, u_3 \text{ - L.D} \end{cases}$ cf. def. (1.1) avem comb. lin. de vectori cu scalari nenuli egale cu „0_2".

Fie $\begin{cases} A = \{u_1, u_2, u_3\} \text{ - L.D} \\ B = \{u_1, u_2\} \text{ - L.D} \subset A \\ C = \{u_1, u_3\} \text{ - L.D} \subset A \\ D = \{u_2\} \text{ ; } E = \{u_3\} \text{ - L.i (cf. obs. i))} \end{cases}$



b) Fie $\begin{cases} A = \{0_V, u, v\} \subset V \text{ - L.D (conține } 0_V) \\ B = \{0_V, u\} \subset A \text{ - L.D (conține } 0_V) \\ C = \{v\} \subset A \text{ - L.i (cf. obs. i))} \end{cases}$





iii) dacă A - L.D, atunci $(\forall)\, A' \supseteq A$ este tot L.D.

„include"