

LIEJEVE ALGEBRE

Prof. dr. sc. Hrvoje Kraljević

Predavanja održana u okviru diplomskog studija Teorijska matematika
na PMF—Matematičkom odjelu Sveučilišta u Zagrebu
u ljetnom semestru akademske godine 2009./2010.

Zagreb, lipanj 2010.

Sadržaj

1	OSNOVNI POJMOVI	5
1.1	Definicije, osnovna svojstva i primjeri	5
1.2	Reprezentacije i moduli	17
1.3	Fittingova, korijenska i Jordanova dekompozicija	21
2	NEKE KLASSE LIEJEVIH ALGEBRI	31
2.1	Nilpotentne Liejeve algebre	31
2.2	Rješive Liejeve algebre. Radikal	37
2.3	Proste i poluproste Liejeve algebre	42
2.4	Weylov teorem potpune reducibilnosti	47
2.5	Reduktivne Liejeve algebre	53
2.6	Dodatak: bilinearne forme	58
3	TEŽINE I KORIJENI	63
3.1	Nilpotentne Liejeve algebre operatora	63
3.2	Cartanove podalgebre	71
3.3	Polinomijalna preslikavanja i topologija Zariskog	77
3.4	Konjugiranost Cartanovih podalgebri	84
4	KOMPLEKSNE POLUPROSTE LIEJEVE ALGEBRE	87
4.1	Cartanove podalgebre	87
4.2	Trodimenzijska prosta Liejeva algebra	89
4.3	Korijenski rastav	93
4.4	Sistemi korijena	99
4.5	Klasifikacija kompleksnih prostih Liejevih algebri	122

Poglavlje 1

OSNOVNI POJMOVI

1.1 Definicije, osnovna svojstva i primjeri

Algebra nad poljem K je vektorski prostor $\mathcal{A}$ nad poljem K na kome je zadana K -bilinearna operacija $\mathcal{A} \times \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$, $(a, b) \mapsto ab$, $a, b \in \mathcal{A}$, koju obično zovemo **množenje**. Bilinearnost naravno znači **biaditivnost** ili **obostranu distributivnost** i K -**bihomogenost**:

$$a(b + c) = ab + ac, \quad (a + b)c = ac + bc, \quad \forall a, b, c \in \mathcal{A}$$

$$\lambda(ab) = (\lambda a)b = a(\lambda b), \quad \forall a, b \in \mathcal{A}, \quad \forall \lambda \in K.$$

Jedinica u algebri $\mathcal{A}$ je element $e \in \mathcal{A}$ sa svojstvom

$$ea = ae = a \quad \forall a \in \mathcal{A}.$$

Ako jedinica u algebri $\mathcal{A}$ postoji ona je jedinstvena i tada kažemo da je $\mathcal{A}$ **algebra s jedinicom**.

Za algebru $\mathcal{A}$ kažemo da je **asocijativna**, ukoliko vrijedi zakon asocijativnosti:

$$(ab)c = a(bc), \quad a, b, c \in \mathcal{A}.$$

Unitalna algebra je asocijativna algebra s jedinicom. Držat ćemo se dogovora da naziv *unitalna algebra* podrazumijeva da se radi o *asocijativnoj* algebri, iako to nije standardno pravilo u literaturi.

Potprostor $\mathcal{B}$ algebre $\mathcal{A}$ zove se **podalgebra** od $\mathcal{A}$ ako vrijedi

$$a, b \in \mathcal{B} \quad \implies \quad ab \in \mathcal{B}.$$

Ako je $\mathcal{B}$ podalgebra algebre $\mathcal{A}$ s jedinicom e , kažemo da je $\mathcal{B}$ **podalgebra s jedinicom**. Naravno, može se dogoditi da je $\mathcal{B}$ podalgebra s jedinicom $e_{\mathcal{B}}$ ali da $e_{\mathcal{B}}$ nije jedinica algebre $\mathcal{A}$. Tada se $\mathcal{B}$ ne zove podalgebra s jedinicom.

Lijevi ideal u algebri $\mathcal{A}$ je potprostor $\mathcal{I}$ od $\mathcal{A}$ takav da vrijedi

$$a \in \mathcal{A}, \quad b \in \mathcal{I} \quad \implies \quad ab \in \mathcal{I}.$$

Desni ideal u algebri $\mathcal{A}$ je potprostor $\mathcal{R}$ od $\mathcal{A}$ takav da vrijedi

$$a \in \mathcal{A}, \quad b \in \mathcal{R} \quad \implies \quad ba \in \mathcal{R}.$$

Naravno, svaki bilo lijevi bilo desni ideal je i podalgebra. **Obostrani ideal** u algebri $\mathcal{A}$ je potprostor $\mathcal{I}$ od $\mathcal{A}$ koji je i lijevi i desni ideal. Ako je $\mathcal{I}$ obostrani ideal u algebri $\mathcal{A}$ onda na kvocijentnom vektorskom prostoru $\mathcal{A}/\mathcal{I}$ možemo definirati množenje sa

$$(a + \mathcal{I})(b + \mathcal{I}) = ab + \mathcal{I}, \quad a, b \in \mathcal{A}.$$

Tako dobivena algebra zove se **kvocijentna algebra**. Ako je $\mathcal{A}$ algebra s jedinicom e onda je i kvocijentna algebra $\mathcal{A}/cI$ algebra s jedinicom i njena je jedinica $e + \mathcal{I}$. Ako je $\mathcal{A}$ asocijativna algebra, onda je i kvocijentna algebra $\mathcal{A}/\mathcal{I}$ asocijativna.

Neka su $\mathcal{A}$ i $\mathcal{B}$ algebre nad istim poljem K . Preslikavanje $\varphi : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ zove se **homomorfizam algebri** ako je φ K -linearan operator sa svojstvom

$$\varphi(ab) = \varphi(a)\varphi(b) \quad \forall a, b \in \mathcal{A}.$$

Skup svih homomorfizama $\mathcal{A}$ u $\mathcal{B}$ označavat ćemo sa $Hom(\mathcal{A}, \mathcal{B})$; ako postoji dvojba oko polja K nad kojim su algebre definirane, pisat ćemo $Hom_K(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ umjesto $Hom(\mathcal{A}, \mathcal{B})$. Kompozicija homomorfizama algebri ponovo je homomorfizam algebri; tj. ako su $\mathcal{A}$, $\mathcal{B}$ i $\mathcal{C}$ algebre nad poljem K onda vrijedi

$$\varphi \in Hom(\mathcal{A}, \mathcal{B}), \quad \psi \in Hom(\mathcal{B}, \mathcal{C}) \quad \implies \quad \psi \circ \varphi \in Hom(\mathcal{A}, \mathcal{C}).$$

Homomorfizam $\varphi : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ zove se **epimorfizam** ako je surjekcija, **monomorfizam** ako je injekcija, **izomorfizam** ako je i jedno i drugo, tj. bijekcija. Kompozicija epimorfizama je epimorfizam, kompozicija monomorfizama je monomorfizam, pa je i kompozicija izomorfizama izomorfizam. Nadalje, inverzno preslikavanje $\varphi^{-1} : \mathcal{B} \rightarrow \mathcal{A}$ izomorfizma $\varphi : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ je također izomorfizam. Napokon, identiteta $I_{\mathcal{A}}$ na algebri $\mathcal{A}$ ($I_{\mathcal{A}}(a) = a \quad \forall a \in \mathcal{A}$) je izomorfizam $\mathcal{A}$ na $\mathcal{A}$. Prema tome, izomorfizmi definiraju relaciju ekvivalencije, koja se zove **izomorfnost algebri**: kažemo da je algebra $\mathcal{A}$ **izomorfna** algebri $\mathcal{B}$, i tada pišemo $\mathcal{A} \simeq \mathcal{B}$, ako postoji izomorfizam $\varphi : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$.

Homomorfizam algebre $\mathcal{A}$ u samu sebe zove se **endomorfizam** algebre $\mathcal{A}$. Umjesto $Hom(\mathcal{A}, \mathcal{A})$ pišemo $End(\mathcal{A})$. Očito je za svaku algebru $\mathcal{A}$ uz kompoziciju kao operaciju množenja $End(\mathcal{A})$ monoid s jedinicom $I_{\mathcal{A}}$. Endomorfizam algebre $\mathcal{A}$ koji je ujedno bijekcija, tj. izomorfizam, zove se **automorfizam** algebre $\mathcal{A}$. Skup svih automorfizama od $\mathcal{A}$ označavamo $Aut(\mathcal{A})$; to je upravo grupa svih invertibilnih elemenata monoida $End(\mathcal{A})$.

Ako je $\varphi : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ homomorfizam algebri, onda je njegova jezgra $\text{Ker } \varphi = \{a \in \mathcal{A}; \varphi(a) = 0\}$ obostrani ideal u algebri $\mathcal{A}$ i njegova slika $\text{Im} \varphi = \varphi(\mathcal{A}) = \{\varphi(a); a \in \mathcal{A}\}$ je podalgebra od $\mathcal{B}$. Nadalje, preslikavanje $\Phi : \mathcal{A}/\text{Ker } \varphi \rightarrow \text{Im} \varphi = \varphi(\mathcal{A})$, definirano sa $\Phi(a + \text{Ker } \varphi) = \varphi(a)$, $a \in \mathcal{A}$, je izomorfizam kvocijentne algebre $\mathcal{A}/\text{Ker } \varphi$ na podalgebru $\text{Im} \varphi$ algebre $\mathcal{B}$.

Neka je $\mathcal{A}$ algebra nad poljem K . Linearan operator $D : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ zove se **derivacija algebre** $\mathcal{A}$ ako vrijedi

$$D(ab) = D(a)b + aD(b) \quad \forall a, b \in \mathcal{A}.$$

Skup svih derivacija algebre $\mathcal{A}$ označavat ćemo sa $Der(\mathcal{A})$. Primijetimo da je $Der(\mathcal{A})$ potprostor vektorskog prostora $L(\mathcal{A}) = L(\mathcal{A}, \mathcal{A})$ svih linearnih operatora $\mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$. Prostor $L(\mathcal{A})$ je unitalna algebra, ali $Der(\mathcal{A})$ općenito nije podalgebra, budući da kompozicija derivacija ne mora biti (i obično nije) derivacija. Međutim, vrijedi:

Propozicija 1.1.1. *Ako je $\mathcal{A}$ algebra i $D, E \in Der(\mathcal{A})$ onda je $DE - ED \in Der(\mathcal{A})$.*

Zadatak 1.1.1. *Dokažite propoziciju 1.1.1.*

Liejeva algebra nad poljem K je algebra $\mathfrak{g}$, u kojoj se množenje obično označava sa $(x, y) \mapsto [x, y]$ i zove **komutator**, ukoliko su ispunjena sljedeća dva uvjeta:

$$(L1) \quad [x, x] = 0 \quad \forall x \in \mathfrak{g}.$$

$$(L2) \quad [x, [y, z]] + [y, [z, x]] + [z, [x, y]] = 0 \quad \forall x, y, z \in \mathfrak{g}.$$

Svojstvo $(L2)$ zove se **Jacobijev identitet**. Iz svojstva $(L1)$ slijedi

$$0 = [x + y, x + y] = [x, x] + [x, y] + [y, x] + [y, y] = [x, y] + [y, x],$$

dakle,

$$(L1') \quad [x, y] = -[y, x] \quad \forall x, y \in \mathfrak{g}.$$

Napomenimo da i $(L1')$ povlači $(L1)$ ukoliko je karakteristika polja K različita od 2 :

$$[x, x] = -[x, x] \quad \implies \quad 2[x, x] = 0 \quad \implies \quad [x, x] = 0.$$

U slučaju Liejevih algebri zbog svojstva antikomutativnosti $(L1')$ nema razlike među lijevim i desnim idealima, pa kažemo samo **ideal**. Ako je $\mathfrak{i}$ ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$, kvocijentna algebra je također Liejeva algebra.

Važan primjer Liejevih algebri dobiva se iz asocijativnih algebri:

Zadatak 1.1.2. *Neka je $\mathcal{A}$ asocijativna algebra. Definiramo*

$$[x, y] = xy - yx, \quad x, y \in \mathcal{A}.$$

Dokažite da s operacijom $[\cdot, \cdot]$ $\mathcal{A}$ postaje Liejeva algebra.

Liejevu algebru iz zadatka 1.1.2. označavat ćemo sa $Lie(\mathcal{A})$. Ako je $\mathfrak{g}$ algebra i $\mathcal{A}$ asocijativna algebra onda ćemo preslikavanje $\varphi : \mathfrak{g} \rightarrow \mathcal{A}$, koje je homomorfizam Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ u Liejevu algebru $Lie(\mathcal{A})$, zvati **Liejev morfizam** Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ u asocijativnu algebru $\mathcal{A}$. Posebni slučaj je kad je $\mathcal{A}$ zapravo asocijativna algebra $L(V)$ svih linearnih operatora na vektorskom prostoru V . U tom slučaju Liejev homomorfizam $\pi : \mathfrak{g} \rightarrow L(V)$ zove se **reprezentacija** Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na vektorskom prostoru V . Dakle, reprezentacija Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ (nad poljem K) na vektorskom prostoru V (nad poljem K) je preslikavanje π koje svakom elementu $x \in \mathfrak{g}$ pridružuje linearni operator $\pi(x) : V \rightarrow V$ ukoliko su zadovoljeni uvjeti:

$$\pi(x + y) = \pi(x) + \pi(y), \quad \pi(\lambda x) = \lambda \pi(x), \quad \pi([x, y]) = \pi(x)\pi(y) - \pi(y)\pi(x), \quad \forall x, y \in \mathfrak{g}, \quad \forall \lambda \in K.$$

Istaknimo, da je prema propoziciji 1.1.1. za svaku (ne nužno asocijativnu) algebru $\mathcal{A}$ skup svih derivacija $Der(\mathcal{A})$ Liejeva podalgebra Liejeve algebre $Lie(L(\mathcal{A}))$.

Mi ćemo se u ovom kolegiju gotovo isključivo baviti konačnodimenzionalnim Liejevim algebrama. Međutim, vektorski prostori koje ćemo promatrati (pa ni asocijativne algebre) ne će uvijek biti konačnodimenzionalni.

Neka je V konačnodimenzionalan vektorski prostor nad poljem K i $n = \dim V$. Liejevu algebru $Lie(L(V))$ označavat ćemo sa $\mathfrak{gl}(V)$. Naravno, $\dim \mathfrak{gl}(V) = n^2$. Izaberemo li bazu prostoru V dobivamo izomorfizam Liejeve algebre $\mathfrak{gl}(V)$ s Liejevom algebrom $Lie(M_n(K))$ svih kvadratnih matrica $n \times n$; ova posljednja se obično označava $\mathfrak{gl}(n, K)$. **Linearna Liejeva algebra** je bilo koja Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$ za konačnodimenzionalan vektorski prostor V . Dakle, linearna Liejeva algebra izomorfna je Liejevoj podalgebri od $\mathfrak{gl}(n, K)$. Napomenimo, da se Liejeva algebra $\mathfrak{gl}(V)$, pa i $\mathfrak{gl}(n, K)$, često zove **opća linearna Liejeva algebra**.

Lako je zapisati tablicu množenja Liejeve algebre $\mathfrak{gl}(n, K)$. Naime, ako sa e_{ij} označimo $n \times n$ matricu kojoj su svi elementi 0 osim broja 1 na presjecištu i -tog retka i j -tog stupca, onda je $e_{ij}e_{kl} = \delta_{jk}e_{il}$, pa imamo

$$[e_{ij}, e_{kl}] = \delta_{jk}e_{il} - \delta_{il}e_{kj}.$$

Razmotrimo sada neke serije linearnih Liejevih algebri, koje se obično zovu **klasične Liejeve algebre**.

1. Za konačnodimenzionalan prostor V sa $\mathfrak{sl}(V)$ označavamo skup svih linearnih operatora kojima je trag jednak nuli; analogno, sa $\mathfrak{sl}(n, K)$ označavamo skup svih matrica $n \times n$ traga 0. Budući da je trag komutatora dvaju operatora, odnosno, dviju matrica, uvijek jednak nuli $\mathfrak{sl}(V)$ je Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$ i $\mathfrak{sl}(n, K)$ je Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(n, K)$. Ta se Liejeva algebra zove se **specijalna linearna Liejeva algebra**. Trag je netrivialni linearni funkcional na prostoru $\mathfrak{gl}(V)$ (odnosno, na prostoru $\mathfrak{gl}(n, K)$) i $\mathfrak{sl}(V)$ (odnosno, $\mathfrak{sl}(n, K)$) je njegova jezgra. Dakle, $\dim \mathfrak{sl}(V) = \dim \mathfrak{sl}(n, K) = n^2 - 1$. Lako je napisati bazu od $\mathfrak{sl}(n, K)$: to je npr.

$$\{e_{ij}; i, j \in \{1, \dots, n\} i \neq j\} \cup \{h_i = e_{ii} - e_{i+1, i+1}; i \in \{1, \dots, n-1\}\}.$$

Tu ćemo bazu zvati *standardna baza od $\mathfrak{sl}(n, K)$* .

2. Neka je V vektorski prostor nad poljem K i neka je $F : V \times V \rightarrow K$ nedegenerirana bilinearna forma na V koja je antisimetrična, tj.

$$F(v, w) = -F(w, v) \quad \forall v, w \in V.$$

Nedegeneriranost znači da vrijedi

$$v \in V, \quad F(v, w) = 0 \quad \forall w \in V \quad \implies \quad v = 0.$$

Zadatak 1.1.3. Neka je F nedegenerirana antisimetrična bilinearna forma na vektorskom prostoru V . Dokažite da je tada dimenzija prostora V paran broj $2n$ i da postoji baza $\{e_1, \dots, e_{2n}\}$ od V takva da vrijedi:

$$v = \sum_{i=1}^{2n} \alpha_i e_i, \quad w = \sum_{i=1}^{2n} \beta_i e_i \quad \implies \quad F(v, w) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_{n+i} - \sum_{i=1}^n \alpha_{n+i} \beta_i.$$

Stavimo

$$\mathfrak{sp}(V) = \{x \in \mathfrak{gl}(V); F(x(v), w) + F(v, x(w)) = 0 \quad \forall v, w \in V\}.$$

Zadatak 1.1.4. Dokažite da je $\mathfrak{sp}(V)$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$ sadržana u $\mathfrak{sl}(V)$.

$\mathfrak{sp}(V)$ zove se **simplektska Liejeva algebra**.

Pomoću baze iz zadatka 1.1.3. lako se vidi da je $\mathfrak{sp}(V)$ izomorfna Liejevoj algebri matrica

$$\mathfrak{sp}(2n, K) = \{x \in \mathfrak{gl}(2n, K); sx = -x^t s\}, \quad \text{gdje je} \quad s = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ -I_n & 0 \end{bmatrix},$$

pri čemu je I_n oznaka za jediničnu matricu $n \times n$.

Zadatak 1.1.5. * Dokažite da je $\dim \mathfrak{sp}(2n, K) = 2n^2 + n$.

Uputa: Matricu $x \in \mathfrak{gl}(2n, K)$ pišite u obliku $\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$, gdje su $a, b, c, d \in \mathfrak{gl}(n, K)$, i zatim napišite uvjet $sx = -x^t s$ pomoću matrica a, b, c, d . Pomoću toga pokažite da je jedna baza od $\mathfrak{sp}(2n, K)$ dana sa

$$\begin{aligned} &\{e_{ii} - e_{n+i, n+i}; 1 \leq i \leq n\} \cup \{e_{ij} - e_{n+j, n+i}; 1 \leq i, j \leq n, i \neq j\} \cup \{e_{i, n+i}; 1 \leq i \leq n\} \cup \\ &\cup \{e_{i, n+j} + e_{j, n+i}; 1 \leq i < j \leq n\} \cup \{e_{n+i, i}; 1 \leq i \leq n\} \cup \{e_{n+i, j} + e_{n+j, i}; 1 \leq i < j \leq n\}. \end{aligned}$$

Baza iz ove upute zove se *standardna baza od $\mathfrak{sp}(2n, K)$* .

Neka je sada V konačnodimenzionalan vektorski prostor nad poljem K i neka je $F : V \times V \rightarrow K$ nedegenerirana bilinearna forma na V koja je simetrična, tj.

$$F(v, w) = F(w, v) \quad \forall v, w \in V.$$

Stavimo

$$\mathfrak{o}_F(V) = \{x \in \mathfrak{gl}(V); F(xv, w) + F(v, xw) = 0 \quad \forall v, w \in V\}.$$

Zadatak 1.1.6. Dokažite da je $\mathfrak{o}_F(V)$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$ sadržana u $\mathfrak{sl}(V)$.

Zadatak 1.1.7. * Ako je $n = \dim V$, dokažite da je $\dim \mathfrak{o}_F(V) = \frac{n(n-1)}{2}$.

$\mathfrak{o}_F(V)$ zove se **ortogonalna Liejeva algebra** na prostoru V u odnosu na formu F . Kao što će se vidjeti u sljedećih nekoliko zadataka, ako je polje K algebarski zatvoreno, gubi se razlika među Liejevim algebrama $\mathfrak{o}_F(V)$ za različite nedegenerirane simetrične bilinearne forme F . Stoga ćemo tada izostavljati oznaku F i pisati samo $\mathfrak{o}(V)$. Razmatrat ćemo odvojeno prostore neparne i prostore parne dimenzije.

3. Pretpostavljamo da je V neparnodimenzionalan vektorski prostor ($\dim V = 2n + 1$) nad algebarski zatvorenim poljem K i da je F nedegenerirana simetrična bilinearna forma na V .

Zadatak 1.1.8. Dokažite da u V postoji baza $\{e_0, e_1, \dots, e_{2n}\}$ takva da je

$$v = \sum_{i=0}^{2n} \alpha_i e_i, \quad w = \sum_{i=0}^{2n} \beta_i e_i \quad \implies \quad F(v, w) = \alpha_0 \beta_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_{n+i} + \sum_{i=1}^n \alpha_{n+i} \beta_i.$$

Kao i malo prije, pomoću baze iz zadatka 1.1.8. lako se vidi da je $\mathfrak{o}_F(V)$ izomorfna Liejevoj algebri matrica

$$\mathfrak{o}(2n+1, K) = \{x \in \mathfrak{gl}(2n+1, K); sx = -x^t s\}, \quad \text{gdje je} \quad s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_n \\ 0 & I_n & 0 \end{bmatrix}.$$

Zadatak 1.1.9. * Dokažite da je $\dim \mathfrak{o}(2n+1, K) = 2n^2 + n$ i da je jedna baza od $\mathfrak{o}(2n+1, K)$ dana sa

$$\begin{aligned} & \{e_{ii} - e_{n+i, n+i}; 1 \leq i \leq n\} \cup \{e_{0, n+i} - e_{i, 0}; 1 \leq i \leq n\} \cup \{e_{0, i} - e_{n+i, 0}; 1 \leq i \leq n\} \cup \\ & \cup \{e_{ij} - e_{n+j, n+i}; 1 \leq i, j \leq n, i \neq j\} \cup \{e_{i, n+j} - e_{j, n+i}; 1 \leq i < j \leq n\} \cup \{e_{n+j, i} - e_{n+i, j}; 1 \leq i < j \leq n\}. \end{aligned}$$

Baza iz ovog zadatka zove se *standardna baza* od $\mathfrak{o}(2n+1, K)$.

4. Neka je sada V vektorski prostor parne dimenzije $2n$ i neka je F simetrična nedegenerirana bilinearna forma na V .

Zadatak 1.1.10. Dokažite da u prostoru V postoji baza $\{e_1, \dots, e_{2n}\}$ takva da je

$$v = \sum_{i=1}^{2n} \alpha_i e_i, \quad w = \sum_{i=1}^{2n} \beta_i e_i \quad \implies \quad F(v, w) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_{n+i} + \sum_{i=1}^n \alpha_{n+i} \beta_i.$$

Pomoću baze iz zadatka 1.1.10. nalazimo da je u ovom slučaju $\mathfrak{o}_F(V)$ izomorfna Liejevoj algebri matrica

$$\mathfrak{o}(2n, K) = \{x \in \mathfrak{gl}(2n, K); sx = -x^t s\}, \quad \text{gdje je} \quad s = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ I_n & 0 \end{bmatrix}.$$

Zadatak 1.1.11. * *Dokažite da je $\dim \mathfrak{o}(2n, K) = 2n^2 - n$ i da je jedna baza od $\mathfrak{o}(2n, K)$ dana sa*

$$\begin{aligned} & \{e_{ii} - e_{n+i, n+i}; 1 \leq i \leq n\} \cup \{e_{ij} - e_{n+j, n+i}; 1 \leq i, j \leq n, i \neq j\} \cup \\ & \cup \{e_{i, n+j} - e_{j, n+i}; 1 \leq i < j \leq n\} \cup \{e_{n+j, i} - e_{n+i, j}; 1 \leq i < j \leq n\}. \end{aligned}$$

I u ovom se slučaju baza iz prethodnog zadatka zove *standardna baza od $\mathfrak{o}(2n, K)$* .

Navedimo još nekoliko Liejevih algebri matrica s kojima ćemo se susretati. Sa $\mathfrak{t}(n, K)$ označavamo Liejevu algebru svih **gornje trokutastih matrica** $n \times n$:

$$\mathfrak{t}(n, K) = \{a = [\alpha_{ij}] \in \mathfrak{gl}(n, K); \alpha_{ij} = 0 \text{ ako je } i > j\}.$$

Nadalje, $\mathfrak{n}(n, K)$ je Liejeva algebra svih **striktno gornje trokutastih matrica** $n \times n$:

$$\mathfrak{n}(n, K) = \{a = [\alpha_{ij}] \in \mathfrak{gl}(n, K); \alpha_{ij} = 0 \text{ ako je } i \geq j\}.$$

Napokon, $\mathfrak{d}(n, K)$ označava Liejevu algebru svih **dijagonalnih matrica** $n \times n$:

$$\mathfrak{d}(n, K) = \{a = [\alpha_{ij}] \in \mathfrak{gl}(n, K); \alpha_{ij} = 0 \text{ ako je } i \neq j\}.$$

Lako se vidi da je

$$\dim \mathfrak{t}(n, K) = \frac{n(n+1)}{2}, \quad \dim \mathfrak{n}(n, K) = \frac{n(n-1)}{2}, \quad \dim \mathfrak{d}(n, K) = n.$$

Nadalje, vrijedi

$$\mathfrak{t}(n, K) = \mathfrak{d}(n, K) + \mathfrak{n}(n, K), \quad [\mathfrak{d}(n, K), \mathfrak{d}(n, K)] = \{0\}, \quad [\mathfrak{d}(n, K), \mathfrak{n}(n, K)] = \mathfrak{n}(n, K),$$

dakle,

$$[\mathfrak{t}(n, K), \mathfrak{t}(n, K)] = \mathfrak{n}(n, K).$$

Pri tome, za bilo koju Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ i za bilo koje podskupove $A, B \subseteq \mathfrak{g}$ sa $[A, B]$ označavamo potprostor od $\mathfrak{g}$ razapet svim elementima oblika $[a, b]$, $a \in A$, $b \in B$:

$$[A, B] = \text{span}_K \{[a, b]; a \in A, b \in B\}.$$

Kao što smo već spomenuli, za svaku algebru $\mathcal{A}$ njene derivacije tvore Liejevu podalgebru $\text{Der}(\mathcal{A})$ od $\text{Lie}(L(\mathcal{A}))$. Posebno je tako u slučaju Liejeve algebre $\mathfrak{g}$. Tada je

$$\text{Der}(\mathfrak{g}) = \{D \in \mathfrak{gl}(\mathfrak{g}); D([x, y]) = [D(x), y] + [x, D(y)] \quad \forall x, y \in \mathfrak{g}\}.$$

Za bilo koji element $x \in \mathfrak{g}$ definiramo preslikavanje $\text{ad } x : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}$ na sljedeći način:

$$(\text{ad } x)(y) = [x, y], \quad y \in \mathfrak{g}.$$

Iz bilinearnosti preslikavanja $(x, y) \mapsto [x, y]$ neposredno slijedi da su svi operatori $\text{ad } x$ linearni i da je $\text{ad} : \mathfrak{g} \rightarrow L(\mathfrak{g})$, $x \mapsto \text{ad } x$, linearno preslikavanje. Štoviše, vrijedi:

Propozicija 1.1.2. *Za svaku Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ preslikavanje ad je homomorfizam Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ u Liejevu algebru $Der(\mathfrak{g})$. Posebno, ad je reprezentacija Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na vektorskom prostoru $\mathfrak{g}$.*

Dokaz: Iz Jacobijevog identiteta ($L2$) i iz antikomutativnosti ($L1'$) imamo redom za bilo koje $x, y, z \in \mathfrak{g}$

$$(ad x)([y, z]) = [x, [y, z]] = -[z, [x, y]] - [y, [z, x]] = [[x, y], z] + [y, [x, z]] = [(ad x)(y), z] + [y, (ad x)(z)],$$

što pokazuje da je $ad x \in Der(\mathfrak{g})$. Nadalje, koristeći ista pravila izvodimo i

$$\begin{aligned} (ad [x, y])(z) &= [[x, y], z] = -[z, [x, y]] = [x, [y, z]] + [y, [z, x]] = \\ &= [x, [y, z]] - [y, [x, z]] = (ad x)((ad y)(z)) - (ad y)((ad x)(z)), \end{aligned}$$

dakle,

$$ad [x, y] = (ad x)(ad y) - (ad y)(ad x) = [ad x, ad y],$$

što pokazuje da je $ad : \mathfrak{g} \rightarrow Der(\mathfrak{g})$ homomorfizam Liejevih algebri, i, posebno, ad je reprezentacija Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na vektorskom prostoru $\mathfrak{g}$.

Derivacije Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ oblika $ad x$ za neki $x \in \mathfrak{g}$ zovu se **unutarnje derivacije** Liejeve algebre. Svi ostali elementi od $Der(\mathfrak{g})$ zovu se **vanjske derivacije** Liejeve algebre $\mathfrak{g}$.

Propozicija 1.1.3. *Skup $ad \mathfrak{g}$ svih unutarnjih derivacija Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ je ideal u Liejevoj algebri $Der(\mathfrak{g})$.*

Dokaz: Za $x, y \in \mathfrak{g}$ i $D \in Der(\mathfrak{g})$ imamo

$$[D, ad x](y) = D([x, y]) - [x, D(y)] = [D(x), y] + [x, D(y)] - [x, D(y)] = [D(x), y] = (ad D(x))(y).$$

Dakle, $[D, ad x] = ad D(x) \in ad \mathfrak{g}$.

Primjetimo da je jezgra homomorfizma $ad : \mathfrak{g} \rightarrow Der(\mathfrak{g})$, koja je naravno ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$, jednaka

$$Z(\mathfrak{g}) = \{x \in \mathfrak{g}; ad x = 0\} = \{x \in \mathfrak{g}; [x, y] = 0 \ \forall y \in \mathfrak{g}\}.$$

Taj se ideal u $\mathfrak{g}$ zove **centar** Liejeve algebre $\mathfrak{g}$. Liejeva algebra $Z(\mathfrak{g})$ ima svojstvo da je u njoj komutator trivijalan: $[x, y] = 0 \ \forall x, y \in Z(\mathfrak{g})$. Općenito, za Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ kažemo da je **komutativna** ili **Abelova** ako je $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] = \{0\}$, tj. $[x, y] = 0 \ \forall x, y \in \mathfrak{g}$. Naravno, Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je komutativna ako i samo ako je $Z(\mathfrak{g}) = \mathfrak{g}$.

Uočimo da je definicija komutativnosti za Liejeve algebre malo različita od uobičajene definicije komutativnosti. Naime, ako je $\mathcal{A}$ bilo koja algebra, ona se obično zove komutativna ili Abelova ako je $xy = yx \ \forall x, y \in \mathcal{A}$. U slučaju Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ zbog antikomutativnosti to je ekvivalentno uvjetu $2[x, y] = 0 \ \forall x, y \in \mathfrak{g}$, a to je ekvivalentno našoj definiciji komutativnosti Liejeve algebre ukoliko je $char K \neq 2$. Međutim, ako je $char K = 2$, onda je svaka algebra s antikomutativnim množenjem ujedno i komutativna, jer je $-1 = 1$. Ipak, kod Liejeve algebre postavljamo jači zahtjev (inače bi svaka Liejeva algebra nad poljem karakteristike 2 bila komutativna).

Naravno, ako je V bilo koji vektorski prostor, onda uz definiciju $[x, y] = 0 \ \forall x, y \in V$ prostor V postaje komutativna Liejeva algebra.

Općenito, neka je $\mathfrak{g}$ konačnodimenzionalna Liejeva algebra i neka je $\{e_1, \dots, e_n\}$ baza vektorskog prostora $\mathfrak{g}$. Tada možemo pisati

$$[e_i, e_j] = \sum_{k=1}^n c_{i,j,k} e_k, \quad c_{i,j,k} \in K, \quad 1 \leq i, j, k \leq n.$$

Skalari $c_{i,j,k}$ zovu se **strukturne konstante** Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ u odnosu na bazu $\{e_1, \dots, e_n\}$. Iz svojstava (L1) i (L2) jednostavno se izvodi koji su nužni i dovoljni uvjeti da bi zadanih n^3 skalara mogli biti strukturne konstante:

Zadatak 1.1.12. * Neka je V vektorski prostor nad poljem K , $\{e_1, \dots, e_n\}$ baza od V i $c_{i,j,k} \in K$, $i, j, k \in \{1, \dots, n\}$. Dokažite da na V postoji struktura Liejeve algebre takva da vrijedi

$$[e_i, e_j] = \sum_{k=1}^n c_{i,j,k} e_k \quad \forall i, j \in \{1, \dots, n\}$$

ako i samo ako skalari $c_{i,j,k}$ zadovoljavaju

$$c_{i,i,k} = 0 \quad \forall i, k \in \{1, \dots, n\}$$

i

$$\sum_{k=1}^n (c_{i,j,k} c_{k,\ell,m} + c_{j,\ell,k} c_{k,i,m} + c_{\ell,i,k} c_{k,j,m}) = 0 \quad \forall i, j, \ell, m \in \{1, \dots, n\}.$$

Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra i $S \subseteq \mathfrak{g}$ bilo koji podskup. Tada stavljamo

$$C_{\mathfrak{g}}(S) = \{x \in \mathfrak{g}; [x, y] = 0 \quad \forall y \in S\}.$$

Iz Jacobijevog identiteta lako slijedi da je $C_{\mathfrak{g}}(S)$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{g}$; ona se zove **centralizator** skupa S u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$. Naravno, $Z(\mathfrak{g}) = C_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{g})$.

Neka je sada $\mathfrak{h}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{g}$. Tada definiramo

$$N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h}) = \{x \in \mathfrak{g}; [x, \mathfrak{h}] \subseteq \mathfrak{h}\}.$$

$N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h})$ je Liejeva podalgebra od $\mathfrak{g}$ koja sadrži $\mathfrak{h}$ i $\mathfrak{h}$ je ideal u $N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h})$. Štoviše, $N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h})$ je najveća takva Liejeva podalgebra: ako je $\mathfrak{k}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{g}$ koja sadrži $\mathfrak{h}$ i ako je $\mathfrak{h}$ ideal u $\mathfrak{k}$, onda je $\mathfrak{k} \subseteq N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h})$. Liejeva algebra $N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h})$ zove se **normalizator** od $\mathfrak{h}$ u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$.

Neka svojstva Liejevih algebri vrijedit će samo ako je polje algebarski zatvoreno. Neka druga svojstva vrijedit će za Liejeve algebre nad proizvoljnim poljem, ali bit će ih lakše dokazati ako je polje algebarski zatvoreno. Zbog toga je važna konstrukcija tzv. *proširenje polja skalara*.

Općenito, neka je V vektorski prostor nad poljem k i neka je K proširenje polja k . **Vektorski prostor dobiven iz V proširenjem polja skalara** sa k na K je uređen par (W, φ) sa svojstvima:

(ES1) W je vektorski prostor nad poljem K .

(ES2) φ je k -linearan operator sa V u W .

(ES3) Vrijedi tzv. *univerzalno svojstvo*: ako je U vektorski prostor nad poljem K i ako je $\psi : V \rightarrow U$ k -linearan operator, onda postoji jedinstven K -linearan operator $\chi : W \rightarrow U$ takav da je $\psi = \chi \circ \varphi$.

Teorem 1.1.4. *Neka je K proširenje polja k i V vektorski prostor nad k .*

- (a) **Egzistencija:** *Postoji vektorski prostor dobiven iz prostora V proširenjem polja skalara sa k na K .*
- (b) **Jedinstvenost:** *Ako su (W_1, φ_1) i (W_2, φ_2) vektorski prostori dobiveni iz V proširenjem polja skalara sa k na K , onda je jedinstven K –linearan operator $\chi : W_1 \rightarrow W_2$ sa svojstvom $\varphi_2 = \chi \circ \varphi_1$ izomorfizam.*

Neka (W, φ) prostor dobiven iz V proširenjem polja skalara sa k na K . Tada vrijedi:

- (c) *Operator $\varphi : V \rightarrow W$ je injektivan.*
- (d) *Ako je podskup $S \subseteq V$ linearno nezavisan nad poljem k , onda je $\varphi(S)$ linearno nezavisan nad poljem K .*
- (e) *Ako podskup $S \subseteq V$ razapinje prostor V (nad poljem k) onda $\varphi(S)$ razapinje prostor W (nad poljem K).*
- (f) *Ako je $(v_i)_{i \in I}$ baza prostora V onda je $(\varphi(v_i))_{i \in I}$ baza prostora W .*

Dokaz: (a) Neka je $(v_i)_{i \in I}$ baza prostora V i neka je W vektorski prostor nad poljem K s bazom $(w_i)_{i \in I}$, dakle, indeksiranom s istim skupom I . Definiramo $\varphi : V \rightarrow W$ kao jedinstven k –linearan operator takav da je $\varphi(v_i) = w_i \ \forall i \in I$. Dakle, za bilo koji konačan podskup $J \subseteq I$ i bilo koje $\alpha_j \in k, j \in J$, je

$$\varphi \left(\sum_{j \in J} \alpha_j v_j \right) = \sum_{j \in J} \alpha_j w_j.$$

Tvrdimo da je tada uređen par (W, φ) vektorski prostor dobiven iz V proširenjem polja skalara sa k na K . Doista, neka je U vektorski prostor nad K i neka je $\psi : V \rightarrow U$ k –linearan operator. Tada postoji jedinstven K –linearan operator $\chi : W \rightarrow U$ takav da je $\chi(w_i) = \psi(v_i) \ \forall i \in I$. Tada vrijedi

$$\psi(v_i) = \chi(w_i) = \chi(\varphi(v_i)) = (\chi \circ \varphi)(v_i) \quad \forall i \in I.$$

Budući da se k –linearni operatori $\psi, \chi \circ \varphi : V \rightarrow U$ podudaraju na bazi prostora V , oni su jednaki: $\psi = \chi \circ \varphi$.

Napokon, ako je i $\chi' : W \rightarrow U$ K –linearan operator takav da je $\psi = \chi' \circ \varphi$, onda je

$$\chi'(w_i) = \chi'(\varphi(v_i)) = (\chi' \circ \varphi)(v_i) = \psi(v_i) = (\chi \circ \varphi)(v_i) = \chi(\varphi(v_i)) = \chi(w_i) \quad \forall i \in I.$$

Budući da se K –linearni operatori $\chi, \chi' : W \rightarrow U$ podudaraju na bazi prostora W , oni su jednaki, $\chi' = \chi$.

Time smo dokazali da uređen par (W, φ) zadovoljava univerzalno svojstvo (ES3), dakle, (W, φ) je vektorski prostor dobiven iz V proširenjem polja skalara sa k na K .

(b) Budući da je i (W_2, φ_2) zadovoljava univerzalno svojstvo (ES3) postoji (jedinstven) K –linearan operator $\vartheta : W_2 \rightarrow W_1$ takav da je $\varphi_1 = \vartheta \circ \varphi_2$. Sada je $\vartheta \circ \chi : W_1 \rightarrow W_1$ K –linearan operator i vrijedi

$$(\vartheta \circ \chi) \circ \varphi_1 = \vartheta \circ (\chi \circ \varphi_1) = \vartheta \circ \varphi_2 = \varphi_1.$$

Dakle, $\vartheta \circ \chi$ i I_{W_1} su K –linearni operatori sa W_1 u W_1 koji zadovoljavaju $(\vartheta \circ \chi) \circ \varphi_1 = \varphi_1$ i $I_{W_1} \circ \varphi_1 = \varphi_1$. Sada iz jedinstvenosti u univerzalnom svojstvu (ES3) za (W_1, φ_1) slijedi da je $\vartheta \circ \chi = I_{W_1}$. Sasvim analogno se dokazuje da je $\chi \circ \vartheta = I_{W_2}$. Prema tome, $\chi : W_1 \rightarrow W_2$ je izomorfizam vektorskih prostora nad K .

Uočimo da tvrdnja (c) slijedi neposredno iz tvrdnje (f). Nadalje, svaki linearno nezavisan podskup vektorskog prostora sadržan je u nekoj bazi, dakle, i tvrdnja (d) slijedi iz tvrdnje (f). Napokon, svaki podskup vektorskog prostora koji ga razapinje sadrži neku bazu tog prostora, pa i (e) slijedi iz (f).

Za dokaz tvrdnje (f), neka je (W, φ) prostor dobiven iz V proširenjem polja skalara i neka je (W', φ') upravo onaj prostor dobiven iz V proširenjem polja skalara koji je konstruiran u dokazu tvrdnje (a). Dakle, W' je vektorski prostor nad K s bazom $(w_i)_{i \in I}$ i $\varphi' : V \rightarrow W'$ je jedinstven k -linearan operator takv da je $\varphi'(v_i) = w_i \ \forall i \in I$. Zbog univerzalnog svojstva postoji K -linearan operator $\chi : W' \rightarrow W$ takav da vrijedi $\varphi = \chi \circ \varphi'$. Prema tvrdnji (b) tada je χ izomorfizam vektorskih prostora. Vrijedi

$$\chi(w_i) = \chi(\varphi'(v_i)) = (\chi \circ \varphi')(v_i) = \varphi(v_i) \quad \forall i \in I.$$

No izomorfizam vektorskih prostora prevodi bazu u bazu, pa zaključujemo da je $(\varphi(v_i))_{i \in I}$ baza vektorskog prostora W .

Neka je (W, φ) vektorski prostor dobiven iz prostora V proširenjem polja skalara sa k na K . Zbog tvrdnje (c) u prethodnom teoremu, operator $\varphi : V \rightarrow W$ možemo upotrijebiti kao identifikaciju i shvaćati V kao podskup od W . Tada univerzalno svojstvo znači da se svaki k -linearan operator sa V u K -vektorski prostor U jedinstveno proširuje do K -linearnog operatora sa W u U . Nadalje, baza od V (nad k) je ujedno baza od W (nad K). Uz takvu identifikaciju obično ćemo pisati V^K za prostor W . Dualna konstrukcija od proširenja polja skalara sa k na K je **suženje polja skalara** sa K na k : ako je W vektorski prostor nad proširenjem K polja k , možemo ga shvaćati kao vektorski prostor nad poljem k zaboravivši da znamo vektore iz W množiti i sa skalarima iz $K \setminus k$. Taj se k -vektorski prostor označava sa W_k . Primijetimo da ove konstrukcije nisu međusobno inverzne. Npr. ako je $k = \mathbb{R}$ i $K = \mathbb{C}$, i ako je V konačnodimenzijsan realan vektorski prostor, a W konačnodimenzijsan kompleksan vektorski prostor, onda je

$$\dim_{\mathbb{C}} V^{\mathbb{C}} = \dim_{\mathbb{R}} V, \quad \text{ali} \quad \dim_{\mathbb{R}} W_{\mathbb{R}} = 2 \dim_{\mathbb{C}} W,$$

dakle,

$$\dim_{\mathbb{R}} (V^{\mathbb{C}})_{\mathbb{R}} = 2 \dim_{\mathbb{R}} V \quad \text{i} \quad \dim_{\mathbb{C}} (W_{\mathbb{R}})^{\mathbb{C}} = 2 \dim_{\mathbb{C}} W.$$

Zadatak 1.1.13. *Neka su V, W i U vektorski prostori nad poljem k , neka je K proširenje polja k i neka je $A : V \times W \rightarrow U$ k -bilinearni operator. Dokažite da se A jedinstveno proširuje do K -bilinearnog operatora $A^K : V^K \times W^K \rightarrow U^K$.*

Posebno, ako je $\mathcal{A}$ algebra nad poljem k onda se množenje $\mathcal{A} \times \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ jedinstveno proširuje do K -bilinearnog preslikavanja sa $\mathcal{A}^K \times \mathcal{A}^K$ u $\mathcal{A}^K$ i $\mathcal{A}^K$ postaje algebra nad poljem K . Tada kažemo da je algebra $\mathcal{A}^K$ dobivena iz algebre $\mathcal{A}$ proširenjem polja skalara sa k na K .

Ako je V vektorski prostor nad poljem k i K proširenje od k onda se za potprostor U od V potprostor koji je u K -prostoru V^K razapet sa U može identificirati sa U^K . Dakle, možemo shvaćati da je $U^K \subseteq V^K$. Ako je $\mathcal{I}$ ideal (lijevi, desni ili obostrani) u k -algebri $\mathcal{A}$ onda se lako vidi da je $\mathcal{I}^K$ ideal iste vrste u algebri $\mathcal{A}^K$. Ako je ideal $\mathcal{I}$ obostrani, kvocijentna algebra $\mathcal{A}^K / \mathcal{I}^K$ identificira se s algebrom $(\mathcal{A} / \mathcal{I})^K$. Nadalje, homomorfizam $\varphi : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ k -algebri jedinstveno se proširuje do homomorfizma $\varphi^K : \mathcal{A}^K \rightarrow \mathcal{B}^K$ i pridruživanje $\varphi \mapsto \varphi^K$ je injekcija sa $\text{Hom}_k(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ u $\text{Hom}_K(\mathcal{A}^K, \mathcal{B}^K)$. Tu ćemo injekciju obično shvaćati kao identifikaciju $\text{Hom}_k(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ s podskupom $\{\varphi \in \text{Hom}_K(\mathcal{A}^K, \mathcal{B}^K); \varphi(\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{B}\}$.

Ako je $\mathcal{A}$ algebra (nad k) s jedinicom (odnosno, asocijativna algebra, unitalna algebra, Liejeva algebra) lako se vidi da je i $\mathcal{A}^K$ algebra s jedinicom (odnosno, asocijativna algebra, unitalna algebra, Liejeva algebra).

Zadatak 1.1.14. Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra nad poljem k i K proširenje polja k . Dokažite:

- (a) Ako su X i Y potprostori od $\mathfrak{g}$ onda je $[X^K, Y^K] = [X, Y]^K$.
- (b) Ako je S podskup od $\mathfrak{g}$ onda je $C_{\mathfrak{g}^K}(S) = C_{\mathfrak{g}}(S)^K$.
- (c) Ako je $\mathfrak{h}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{g}$ onda je $N_{\mathfrak{g}^K}(\mathfrak{h}^K) = N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h})^K$.

Ovaj ćemo odjeljak završiti još jednom definicijom vezanom uz pojam proširenjem polja skalara. Neka je i dalje K proširenje polja k i neka je V vektorski prostor nad K . k -**forma vektorskog prostora** V je potprostor W prostora V_k takav da je V vektorski prostor dobiven iz W proširenjem polja skalara sa k na K . Drugim riječima, potprostor W ima bazu koja je ujedno baza prostora V . Ako je $\mathcal{A}$ algebra nad K , k -**forma algebre** $\mathcal{A}$ je podalgebra $\mathcal{B}$ od $\mathcal{A}_k$ koja je k -forma vektorskog prostora $\mathcal{A}$.

Neka je fiksirana neka k -forma W vektorskog prostora W nad K . Za **potprostor** U prostora V kažemo da je **definiran nad k** ako je $W \cap U$ k -forma od U . To je ispunjeno ako i samo ako je $\text{span}_K(W \cap U) = U$.

Propozicija 1.1.5. Neka je V vektorski prostor nad poljem K i neka je fiksirana njegova k -forma W . Ako je $\mathcal{S}$ skup potprostora V koji su definirani nad k onda je i potprostor $\sum \mathcal{S}$ definiran nad k . Ako je prostor V konačnodimenzijski, onda je i potprostor $\bigcap \mathcal{S}$ definiran nad k .

Dokaz: Iz $\text{span}_K(W \cap Z) = Z \ \forall Z \in \mathcal{S}$ dobivamo

$$\sum \mathcal{S} \supseteq \text{span}_K(W \cap \sum \mathcal{S}) \supseteq \text{span}_K \left(\sum_{Z \in \mathcal{S}} (W \cap Z) \right) = \sum_{Z \in \mathcal{S}} \text{span}_K(W \cap Z) = \sum_{Z \in \mathcal{S}} Z = \sum \mathcal{S}.$$

Dakle, potprostor $\sum \mathcal{S}$ je definiran nad k .

Pretpostavimo sada da je prostor V konačnodimenzijski. Tada je $\bigcap \mathcal{S}$ jednak presjeku konačno mnogo potprostora iz skupa $\mathcal{S}$. Zbog toga u dokazu možemo pretpostavljati da je skup $\mathcal{S}$ konačan, a indukcijom po broju elemenata od $\mathcal{S}$ dokaz se svodi na slučaj dvaju potprostora X i Y od V definiranih nad k . Već znamo da je potprostor $X + Y$ definiran nad k , pa možemo pretpostavljati da je $V = X + Y$ i $W = W \cap X + W \cap Y$. Sada je

$$\dim_k W = \dim_K V, \quad \dim_k(W \cap X) = \dim_K X, \quad \dim_k(W \cap Y) = \dim_K Y,$$

pa slijedi

$$\begin{aligned} \dim_k(W \cap (X \cap Y)) &= \dim_k((W \cap X) \cap (W \cap Y)) = \dim_k(W \cap X) + \dim_k(W \cap Y) - \dim_k W = \\ &= \dim_K X + \dim_K Y - \dim_K V = \dim_K(X \cap Y). \end{aligned}$$

Dakle, potprostor $X \cap Y$ je definiran nad k .

Neka su sada V_1 i V_2 vektorski prostori nad K i neka su fiksirane njihove k -forme W_1 i W_2 . Za **linearan operator** $A \in L(V_1, V_2)$ kažemo da je **definiran nad k** , ako je $AW_1 \subseteq W_2$.

Propozicija 1.1.6. Ako su prostori V_1 i V_2 konačnodimenzijski i ako je operator $A \in L(V_1, V_2)$ definiran nad k onda su potprostori $\text{Ker } A$ i $\text{Im } A$ definirani nad k .

Dokaz: Vrijedi

$$\text{Im } A \supseteq \text{span}_K((\text{Im } A) \cap W_2) \supseteq \text{span}_K AW_1 = A \text{span}_K W_1 = AW_1 = \text{Im } A.$$

Dakle, potprostor $\text{Im } A$ prostora V_2 je definiran nad k i $\text{Im } (A|W_1)$ je k -forma potprostora $\text{Im } A$. Nadalje, dvostruka primjena teorema o rang i defektu daje

$$\begin{aligned}\dim_K \text{Ker } A &= \dim_K V_1 - \dim_K \text{Im } A = \dim_k W_1 - \dim_k \text{Im } (A|W_1) = \\ &= \dim_k \text{Ker } (A|W_1) = \dim_k (\text{Ker } A) \cap W_1.\end{aligned}$$

Dakle, $(\text{Ker } A) \cap W_1$ je k -forma potprostora $\text{Ker } A$, dakle, taj je potprostor definiran nad k .

Propozicija 1.1.7. *Neka su V_1 i V_2 konačnodimenzionalni vektorski prostori nad K i neka su fiksirane njihove k -forme W_1 i W_2 . Tada je*

$$L(V_1, V_2)_{W_1, W_2} = \{A \in L(V_1, V_2); A \text{ je definiran nad } k\}$$

k -forma vektorskog prostora $L(V_1, V_2)$ i $A \mapsto A|W_1$ je izomorfizam k -vektorskih prostora sa $L(V_1, V_2)_{W_1, W_2}$ na $L(W_1, W_2)$.

Zadatak 1.1.15. * *Dokažite propoziciju 1.1.7.*

1.2 Reprezentacije i moduli

Ako je S skup, S -**modul nad poljem** K je vektorski prostor V nad poljem sa zadanim preslikavanjem $S \times V \rightarrow V$, $(s, v) \mapsto sv$, takvim da je $v \mapsto sv$, $v \in V$, linearan operator na prostoru $V \forall s \in S$:

$$s(\alpha v + \beta w) = \alpha sv + \beta sw, \quad \forall \alpha, \beta \in K, \quad \forall v, w \in V, \quad \forall s \in S.$$

Reprezentacija skupa S na vektorskom prostoru V je preslikavanje $\pi : S \rightarrow L(V)$. Naravno, S -moduli i reprezentacije od S su u biti jedno te isto: ako je π reprezentacija od S na prostoru V onda je sa $sv = \pi(s)v$, $s \in S$, $v \in V$, zadano preslikavanje $S \times V \rightarrow V$ koje V čini S -modulom; s druge strane, ako je V S -modul, onda je sa $\pi(s)v = sv$, $s \in S$, $v \in V$, zadana reprezentacija π skupa S na prostoru V .

U daljnjem je V S -modul nad poljem K i π pripadna reprezentacija skupa S na prostoru V . S -**podmodul** od V je potprostor $W \subseteq V$ takav da je $sw \in W \forall s \in S$ i $\forall w \in W$. Naravno, s restrikcijom preslikavanja $(s, v) \rightarrow sv$ sa $S \times V \rightarrow V$ na $S \times W \rightarrow W$ i sam W postaje S -modul. Potprostor W od V je S -podmodul ako i samo ako je taj potprostor invarijantan s obzirom na sve operatore $\pi(s)$, $s \in S$. Reprezentacija pridružena S -podmodulu W označava se π_W i zove **subreprezentacija** reprezentacije π . **Pravi S -podmodul** od V je S -podmodul W koji je različit od V . W je **netrivijalan S -podmodul** od V ako je $W \neq V$ i $V \neq \{0\}$. **Maksimalan S -podmodul** od V je pravi S -podmodul od V koji nije pravi S -podmodul nijednog pravog S -podmodula od V . Za pripadnu subreprezentaciju kažemo da je **maksimalna subreprezentacija** od π .

Presjek bilo kojeg skupa S -podmodula od V je očito S -podmodul od V . Ako je T podskup S -modula V , postoji najmanji S -podmodul od V koji sadrži skup T : to je presjek svih S -podmodula koji sadrže skup T . Taj se S -podmodul označava sa ST i za njega kažemo da je **generiran skupom** T . Očito je

$$ST = \text{span}_K(T \cup \{s_1 \cdots s_n v; n \in \mathbb{N}, s_1, \dots, s_n \in S, v \in T\}).$$

Ako je W S -podmodul S -modula V , kvocijentni vektorski prostor V/W možemo snabdjeti strukturom S -modula ovako:

$$s(v + W) = sv + W, \quad s \in S, \quad v \in V.$$

S tom strukturom V/W se zove **kvocijentni S -modul** (S -modula V po S -podmodulu W). Pripadna reprezentacija označava se sa $\pi_{V/W}$ i zove **kvocijentna reprezentacija** reprezentacije π . Kvocijentni S -modul S -podmodula od V ili, ekvivalentno, S -podmodul kvocijentnog S -modula od V , zove se **subkvocijentni S -modul** ili kraće **subkvocijent S -modula** V . Dakle, subkvocijent od V je S -modul oblika W/U , gdje su W i U S -podmoduli od V i $U \subseteq W$. Pripadna reprezentacija označava se sa $\pi_{W/U}$ i zove **subkvocijentna reprezentacija** ili **subkvocijent reprezentacije** π .

Ako su V i W S -moduli nad poljem K , S -**homomorfizam** (ili homomorfizam S -modula) V u W je linearan operator $A : V \rightarrow W$ sa svojstvom

$$Asv = sAv \quad \forall s \in S \quad \text{ i } \quad \forall v \in V.$$

Skup svih S -homomorfizama V u W označavamo sa $\text{Hom}_S(V, W)$ i to je potprostor prostora $L(V, W)$ svih linearnih operatora sa V u W . Ako su π i ρ pripadne reprezentacije od S na prostorima V i W S -homomorfizmi se zovu i **preplitanja** reprezentacije π s reprezentacijom ρ . Surjektivni (odn., injektivni, bijektivni) S -homomorfizam zove se S -epimorfizam (odn., S -monomorfizam, S -izomorfizam). Kažemo da je S -modul V izomorfan S -modulu W ako

postoji S -izomorfizam sa V na W , tj. ako u $\text{Hom}_S(V, W)$ postoji bijekcija. Kako je kompozicija S -homomorfizama S -homomorfizam, očito je relacija izomorfnosti među S -modulima tranzitivna. Ona je i simetrična jer invers S -izomorfizma je S -izomorfizam. Napokon, kako je identiteta I_V na V izomorfizam S -modula, izomorfnost S -modula je relacija ekvivalencije.

Vrijede sljedeća dva standardna rezultata:

Teorem 1.2.1. *Ako je $A : V \rightarrow W$ homomorfizam S -modula onda je $\text{Ker } A$ S -podmodul od V , $\text{Im } A$ je S -podmodul od W i sa*

$$v + \text{Ker } A \mapsto Av, \quad v \in V,$$

je zadan izomorfizam S -modula sa $V/(\text{Ker } A)$ na $\text{Im } A$.

Suma bilo kojeg skupa S -podmodula od V je S -podmodul od V . Posebno, ako su W i U S -podmoduli od V onda je i $W + U$ S -podmodul od V .

Teorem 1.2.2. *Ako su W i U S -podmoduli S -modula V , onda je sa*

$$w + (W \cap U) \mapsto w + U, \quad w \in W,$$

zadan izomorfizam S -modula $W/(W \cap U)$ na S -modul $(W + U)/U$.

Kažemo da je V **prost S -modul** ako je $V \neq \{0\}$ i V nema netrivialnih S -podmodula; tj. V i $\{0\}$ su jedini S -podmoduli od V . U tom se slučaju pripadna **reprezentacija** zove **ireducibilna**. Kažemo da je π **reducibilna reprezentacija** ako ona nije ireducibilna. V je **poluprost S -modul**, ako za svaki S -podmodul W od V postoji S -podmodul U od V takav da je $V = W \dot{+} U$. Za pripadnu reprezentaciju u tom slučaju kažemo da je **potpuno reducibilna**.

Propozicija 1.2.3. *Ako je W S -podmodul poluprostog S -modula V , onda su S -moduli W i V/W poluprosti.*

Zadatak 1.2.1. *Dokažite propoziciju 1.2.3.*

Lema 1.2.4. *Svaki poluprost S -modul $V \neq \{0\}$ ima prost S -podmodul.*

Dokaz: Neka je $v \in V$, $v \neq 0$. Primjenom Zornove leme lako se vidi da skup $\mathcal{S}$ svih S -podmodula koji ne sadrže vektor v ima bar jedan maksimalni element W u odnosu na inkluziju. Kako je V poluprost, postoji S -podmodul U takav da je $V = W \dot{+} U$. Tada je $U \neq \{0\}$, jer $v \notin W$. Pretpostavimo da je U' netrivialan podmodul od U . Prema teoremu 1.2.1. U je poluprost pa on ima podmodul U'' takav da je $U = U' \dot{+} U''$. Kako je W maksimalan podmodul sa svojstvom $v \notin W$, vrijedi $v \in W \dot{+} U'$ i $v \in W \dot{+} U''$. No tada slijedi da je $v \in (W \dot{+} U') \cap (W \dot{+} U'') = W$ suprotno svojstvu od W . Ova kontradikcija pokazuje da U nema netrivialnih podmodula, odnosno, S -modul U je prost.

Teorem 1.2.5. *Sljedeća su tri svojstva S -modula V međusobno ekvivalentna:*

- (a) *Modul V je poluprost.*
- (b) *Modul V je suma svojih prostih podmodula.*
- (c) *Modul V je direktna suma nekog skupa svojih prostih podmodula.*

Dokaz: (a) $\Rightarrow$ (b). Neka je V poluprost i neka je W suma svih njegovih prostih podmodula. Tada je $V = W \dot{+} U$ za neki podmodul U . Prema lemi 1.2.4. ako je $U \neq \{0\}$ onda U sadrži neki prost podmodul Z . No po definiciji W tada je $Z \subseteq W$, a to je nemoguće. Ova kontradikcija pokazuje da je $U = \{0\}$, tj. $W = V$.

(b) $\Rightarrow$ (c). Pretpostavimo da je V suma svojih prostih podmodula. Primjenom Zornove leme nalazimo da postoji maksimalan skup $\mathcal{S}$ prostih podmodula u odnosu na svojstvo da im je suma direktna. Neka je $W = \sum \mathcal{S}$. Pretpostavimo da je $W \neq V$. Tada postoji prost podmodul U od V takav da $U \subsetneq W$. Tada je $U \cap W \neq U$, dakle, $U \cap W = \{0\}$. Odatle slijedi da je suma $\sum(\mathcal{S} \cup \{U\})$ direktna i vrijedi $\mathcal{S} \subsetneq \mathcal{S} \cup \{U\}$, a to je nemoguće zbog izbora $\mathcal{S}$. Ova kontradikcija pokazuje da je $W = V$.

(c) $\Rightarrow$ (a). Pretpostavimo da je V direktna suma skupa $\mathcal{S}$ prostih podmodula od V i neka je W podmodul od V . Primjenom Zornove leme nalazimo da u skupu svih podmodula U od V takvih da je $U \cap W = \{0\}$ postoji bar jedan maksimalan element U . Za svaki $Z \in \mathcal{S}$ tada ne može biti $Z \cap (W \dot{+} U) = \{0\}$; u protivnom bi $U \dot{+} Z$ bio podmodul od V sa svojstvom $(U \dot{+} Z) \cap W = \{0\}$ i imali bismo da je $U \subsetneq U \dot{+} Z$, a to je suprotno izboru podmodula U . Kako je Z prost i $Z \cap (W \dot{+} U) \neq \{0\}$, vrijedi $Z = Z \cap (W \dot{+} U)$, tj. $Z \subseteq W \dot{+} U$. Kako to vrijedi za svaki $Z \in \mathcal{S}$, slijedi $V = \sum \mathcal{S} \subseteq W \dot{+} U$, odnosno, $V = W \dot{+} U$.

Sokl S -modula V je suma svih njegovih prostih S -podmodula. Očito je sokl od V najveći poluprost S -podmodul od V .

Za S -modul V pišemo $\text{End}_S(V)$ umjesto $\text{Hom}_S(V, V)$. $\text{End}_S(V)$ je unitalna podalgebra od $L(V)$.

Teorem 1.2.6. (Dixmier–Schurova lema) *Neka su V i W prosti S -moduli nad poljem K .*

- (a) *Ako je $\text{Hom}_S(V, W) \neq \{0\}$, S -moduli V i W su izomorfni.*
- (b) *Unitalna algebra $\text{End}_S(V)$ je tijelo, tj. svaki $A \in \text{End}_S(V) \setminus \{0\}$ je invertibilan.*
- (c) *Ako je polje K algebarski zatvoreno i ako je $\dim V$ manja od $\text{Card } K$, posebno ako je prostor V konačnodimenzijski, onda je $\text{End}_S(V) = \{\lambda I_V; \lambda \in K\}$.*

Dokaz: (a) Pretpostavimo da je $A \in \text{Hom}_S(V, W) \setminus \{0\}$. Tada je $\text{Ker } A$ S -podmodul od V :

$$v \in \text{Ker } A, \quad s \in S \quad \Longrightarrow \quad Asv = sAv = 0 \quad \Longrightarrow \quad sv \in \text{Ker } A.$$

Kako je $A \neq 0$, vrijedi $\text{Ker } A \neq V$, a kako je V prost S -modul, zaključujemo da je $\text{Ker } A = \{0\}$, odnosno, A je injekcija. Nadalje, $\text{Im } A$ je S -podmodul od W :

$$s \in S, \quad w \in \text{Im } A, \quad v \in V \quad \text{takav da je} \quad w = Av \quad \Longrightarrow \quad sw = sAv = Asv \in \text{Im } A.$$

Kako je $A \neq 0$ to je $\text{Im } A \neq \{0\}$. Budući da je W prost S -modul, slijedi $\text{Im } A = W$. Dakle, A je i surjekcija, dakle, izomorfizam.

(b) Iz dokaza tvrdnje (a) vidi se da je svaki $A \in \text{End}_S(V) \setminus \{0\}$ invertibilan.

(c) Neka je $A \in L(V)$. Dokazat ćemo da je tada njegov spektar

$$\text{Sp}(A) = \{\lambda \in K; A - \lambda I_V \notin GL(V)\}$$

neprazan. Pretpostavimo suprotno da je operator $A - \lambda I_V$ invertibilan za svaki $\lambda \in K$. Tada je operator $P(A)$ invertibilan za svaki polinom $P \in K[T] \setminus \{0\}$. Dakle, ako je $R = P/Q$ racionalna funkcija, možemo definirati $R(A) = P(A)Q(A)^{-1}$. Tako smo došli do linearnog preslikavanja

$R \mapsto R(A)$ polja $K(T)$ racionalnih funkcija jedne varijable u $L(V)$. Neka je $v \in V$, $v \neq 0$. Tada je $R \mapsto R(A)v$ injektivan linearan operator sa $K(T)$ u V . No to je nemoguće jer je dimenzija prostora $K(V) \geq \text{Card } K$. Naime, lako se vidi da je skup

$$\left\{ \frac{1}{T - \lambda}; \lambda \in K \right\}$$

linearno nezavisan. Ova kontradikcija pokazuje da za svaki $A \in L(V)$ postoji $\lambda \in K$ takav da operator $A - \lambda I_V$ nije invertibilan. Posebno, ako je $A \in \text{End}_S(V)$, onda su $\text{Ker}(A - \lambda I_V)$ i $\text{Im}(A - \lambda I_V)$ podmoduli od V . Ako je $\text{Ker}(A - \lambda I_V) \neq \{0\}$, onda zbog prostote od V vrijedi $\text{Ker}(A - \lambda I_V) = V$, što znači da je $A = \lambda I_V$. Ako je pak $\text{Ker}(A - \lambda I_V) = \{0\}$, tj. ako je $A - \lambda I_V$ injekcija, onda taj operator nije surjekcija. To znači da je $\text{Im}(A - \lambda I_V) \neq V$, pa iz prostote od V slijedi $\text{Im}(A - \lambda I_V) = \{0\}$. No to opet znači da je $A = \lambda I_V$.

Neka je S skup, V S -modul nad poljem k i K proširenje polja k . Za svaki $s \in S$ operator $v \mapsto sv$, $v \in V$, je k -linearan pa se on jedinstveno proširuje do K -linearnog operatora na prostoru V^K . Na taj način dobivamo na V^K strukturu S -modula nad poljem K . Kažemo da je s tom strukturom S -modul nad K dobiven iz S -modula V nad k proširenjem polja skalara sa k na K .

Ako skup S ima strukturu grupe, asocijativne algebre, unitalne algebre ili Liejeve algebre, i s tom strukturom ga označimo sa $\mathcal{S}$, među svim S -modulima uočit ćemo one koji nose odgovarajuću dodatnu strukturu i takve ćemo zvati $\mathcal{S}$ -modulima:

- Ako je G grupa, G -modul nad poljem K je vektorski prostor V nad poljem K koji je modul nad skupom G i vrijedi $(ab)v = a(bv) \forall a, b \in G$ i $\forall v \in V$ i za jedinicu $e \in G$ je $ev = v \forall v \in V$. Tada je svaki operator $v \mapsto av$ invertibilan i njegov je invers $v \mapsto a^{-1}v$.
- Ako je $\mathcal{A}$ asocijativna algebra nad poljem k i K je proširenje polja k , $\mathcal{A}$ -modul nad poljem K je vektorski prostor nad K koji je modul nad skupom $\mathcal{A}$ i vrijedi $(a + b)v = av + bv$, $(\lambda a)v = \lambda av$ i $(ab)v = a(bv) \forall a, b \in \mathcal{A}, \forall \lambda \in k$ i $\forall v \in V$. Struktura $\mathcal{A}$ -modula nad poljem K jedinstveno se proširuje do strukture $\mathcal{A}^K$ -modula nad K .
- Ako je $\mathcal{A}$ unitalna algebra s jedinicom e , pored prethodnog zahtijevamo još da je $ev = v \forall v \in V$.
- Ako je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra nad poljem k i K proširenje polja k , $\mathfrak{g}$ -modul nad poljem K je vektorski prostor V nad poljem K koji je modul nad skupom $\mathfrak{g}$ i vrijedi $(a + b)v = av + bv$, $(\lambda a)v = \lambda av$ i $[a, b]v = a(bv) - b(av) \forall a, b \in \mathfrak{g}, \forall \lambda \in k$ i $\forall v \in V$. I u ovom slučaju struktura $\mathfrak{g}$ -modula nad poljem K se jedinstveno proširuje do strukture $\mathfrak{g}^K$ -modula nad poljem K .

Pripadne reprezentacije zovu se reprezentacije te strukture:

- **Reprezentacija grupe** G na vektorskom prostoru V nad poljem K je homomorfizam grupa $\pi : G \rightarrow GL(V)$.
- **Reprezentacija asocijativne algebre** $\mathcal{A}$ nad poljem k na vektorskom prostoru V nad poljem K (koje je proširenje polja k) je homomorfizam asocijativnih algebri $\pi : \mathcal{A} \rightarrow L(V)_k$.
- **Reprezentacija unitalne algebre** $\mathcal{A}$ nad k na vektorskom prostoru V nad $K \supseteq k$ je homomorfizam unitalnih algebri $\pi : \mathcal{A} \rightarrow L(V)_k$.
- **Reprezentacija Liejeve algebre** $\mathfrak{g}$ nad poljem k na vektorskom prostoru V nad poljem $K \supseteq k$ je homomorfizam Liejevih algebri $\pi : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{gl}(V)_k$.

1.3 Fittingova, korijenska i Jordanova dekompozicija

Neka je A linearan operator na ne nužno konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru V nad poljem K . Promatrat ćemo sljedeće monotone (rastući i padajući) nizove potprostora od V :

$$\{0\} = \text{Ker } A^0 \subseteq \text{Ker } A \subseteq \text{Ker } A^2 \subseteq \dots \quad \text{i} \quad V = \text{Im } A^0 \supseteq \text{Im } A \supseteq \text{Im } A^2 \supseteq \dots$$

Lema 1.3.1. (a) Ako je $\text{Ker } A^k = \text{Ker } A^{k+1}$ za neki $k \in \mathbb{Z}_+$ onda je $\text{Ker } A^k = \text{Ker } A^m \ \forall m \geq k$.

(b) Ako je $\text{Im } A^k = \text{Im } A^{k+1}$ za neki $k \in \mathbb{Z}_+$ onda je $\text{Im } A^k = \text{Im } A^m \ \forall m \geq k$.

Dokaz: (a) Dovoljno je dokazati da je $\text{Ker } A^{k+1} \supseteq \text{Ker } A^{k+2}$. Neka je $v \in \text{Ker } A^{k+2}$. Tada je $Av \in \text{Ker } A^{k+1} = \text{Ker } A^k$, pa slijedi $A^{k+1}v = 0$, odnosno, $v \in \text{Ker } A^{k+1}$.

(b) Analogno, dovoljno je dokazati da je $\text{Im } A^{k+1} \subseteq \text{Im } A^{k+2}$. Neka je $v \in \text{Im } A^{k+1}$ i neka je $w \in V$ takav da je $v = A^{k+1}w$. Sada je $A^k w \in \text{Im } A^k = \text{Im } A^{k+1}$, pa postoji $u \in V$ takav da je $A^k w = A^{k+1}u$. Slijedi $v = AA^k w = AA^{k+1}u = A^{k+2}u \in \text{Im } A^{k+2}$.

Prema lemi 1.3.1. niz $(\text{Ker } A^k)_{k \in \mathbb{Z}_+}$ je striktno rastući dok se na nekom mjestu ne stabilizira. Ako se to dogodi, najmanji $k \in \mathbb{Z}_+$ takav da je $\text{Ker } A^k = \text{Ker } A^{k+1}$ označavamo sa $\text{asc}(A)$. Ako takav $k \in \mathbb{Z}_+$ ne postoji, pišemo $\text{asc}(A) = +\infty$. Isto tako, niz $(\text{Im } A^k)_{k \in \mathbb{Z}_+}$ je striktno padajući dok se na nekom mjestu ne stabilizira. Ako se to dogodi, najmanji $k \in \mathbb{Z}_+$ takav da je $\text{Im } A^k = \text{Im } A^{k+1}$ označavamo sa $\text{desc}(A)$. Ako takav $k \in \mathbb{Z}_+$ ne postoji, pišemo $\text{desc}(A) = +\infty$.

Teorem 1.3.2. Pretpostavimo da za linearan operator $A : V \rightarrow V$ vrijedi $p = \text{asc}(A) < +\infty$ i $q = \text{desc}(A) < +\infty$. Tada je:

(a) $p = q$.

(b) $V = \text{Ker } A^p \dot{+} \text{Im } A^p$.

(c) Operator $A|_{\text{Ker } A^p}$ je nilpotentan indeksa p .

(d) Ako je W potprostor od V koji je A -invarijantan i ako je operator $A|_W$ nilpotentan, onda je $W \subseteq \text{Ker } A^p$.

(e) Operator $A|_{\text{Im } A^p}$ je invertibilan, tj. element grupe $GL(\text{Im } A^p)$.

(f) Ako je W potprostor od V sa svojstvom $AW = W$, onda je $W \subseteq \text{Im } A^p$.

Dokaz: (a) Pretpostavimo da je $p > q \leq 0$ i neka je $v \in \text{Ker } A^p \setminus \text{Ker } A^{p-1}$. Dakle, $A^p v = 0$ i $A^{p-1}v \neq 0$. Po pretpostavci je $q \leq p - 1$, dakle, vrijedi $\text{Im } A^{p-1} = \text{Im } A^p$. Stoga postoji $w \in V$ takav da je $A^{p-1}v = A^p w$. Tada je $A^{p+1}w = A^p v = 0$, dakle, $w \in \text{Ker } A^{p+1} = \text{Ker } A^p$. Slijedi $0 = A^p w = A^{p-1}v$ suprotno izboru vektora v . Ova kontradikcija pokazuje da je pretpostavka $p > q$ nemoguća, odnosno, dokazano je da je $p \leq q$.

Pretpostavimo sada da je $q > p \geq 0$ i neka je $v \in (\text{Im } A^{q-1}) \setminus (\text{Im } A^q)$. Neka je $w \in V$ takav da je $A^{q-1}w = v$. Stavimo $u = Av$. Tada je $u = A^q w \in \text{Im } A^q = \text{Im } A^{q+1}$, pa postoji $x \in V$ takav da je $u = A^{q+1}x$. Stavimo $y = Ax - w$. Tada je $A^q y = A^{q+1}x - A^q w = u - u = 0$. Dakle, $y \in \text{Ker } A^q$. Po pretpostavci je $q - 1 \geq p$, dakle, $\text{Ker } A^{q-1} = \text{Ker } A^q$, pa slijedi $y \in \text{Ker } A^{q-1}$. To znači da je $0 = A^{q-1}y = A^q x - A^{q-1}w = A^q x - v$. No to je nemoguće, jer po pretpostavci $v \notin \text{Im } A^q$. Ova kontradikcija pokazuje da je pretpostavka $q > p$ nemoguća, odnosno, dokazana je i obrnuta nejednakost $p \geq q$.

(b) Neka je $v \in (\text{Ker } A^p) \cap (\text{Im } A^p)$ i neka je $u \in V$ takav da je $v = A^p u$. Tada je $0 = A^p v = A^{2p} u$, dakle, $u \in \text{Ker } A^{2p} = \text{Im } A^p$, a odatle slijedi da je $v = A^p u = 0$. Time je dokazano da je

$(\text{Ker } A^p) \cap (\text{Im } A^p) = \{0\}$, odnosno, suma potprostora $\text{Ker } A^p$ i $\text{Im } A^p$ je direktna. Neka je sada $v \in V$ proizvoljan. Tada je $A^p v \in \text{Im } A^p = \text{Im } A^{2p}$, pa postoji $u \in V$ takav da je $A^p v = A^{2p} u$. Stavimo sada $w = v - A^p u$. Tada je $v = w + A^p u$, gdje je $A^p u \in \text{Im } A^p$ i $A^p w = A^p v - A^{2p} u = 0$, dakle, $w \in \text{Ker } A^p$. Time je dokazano da je direktna suma $\text{Ker } A^p \dot{+} \text{Im } A^p$ jednaka čitavom prostoru V .

Tvrdnja (c) je očita.

(d) Ako je $AW \subseteq W$ i $(A|W)^k = 0$, onda je $W \subseteq \text{Ker } A^k \subseteq \text{Ker } A^p$.

(e) Stavimo $W = \text{Im } A^p$. Tada je $AW = \text{Im } A^{p+1} = \text{Im } A^p = W$, dakle, $A|W$ je surjekcija W na W . Nadalje, $\text{Ker } A|W = (\text{Ker } A) \cap W \subseteq (\text{Ker } A^p) \cap W = \{0\}$. Dakle, $A|W$ je i injekcija.

(f) Iz $AW = W$ slijedi da je $W = A^p W \subseteq \text{Im } A^p$.

Uz pretpostavke teorema 1.3.2. broj $p = q$ zove se **nil–indeks operatora** A , a rastav

$$V = \text{Ker } A^p \dot{+} \text{Im } A^p$$

zove se **Fittingova dekompozicija** prostora V u odnosu na operator A . Pisat ćemo

$$V_{(0)}(A) = \text{Ker } A^p \quad \text{i} \quad V_*(A) = \text{Im } A^p.$$

Potprostor $V_{(0)}(A)$ zove se **Fittingova 0–komponenta**, a potprostor $V_*(A)$ **Fittingova *–komponenta prostora** V u odnosu na operator A . Restrikcija $A|_{V_{(0)}(A)}$ zove se **Fittingova 0–komponenta operatora** A i označava sa $A_{(0)}$, a restrikcija $A|_{V_*(A)}$ zove se **Fittingova *–komponenta operatora** A i označava sa A_* .

Sve ovo ima smisla samo ako je $\text{asc}(A) < +\infty$ i $\text{desc}(A) < +\infty$. To je sigurno ispunjeno ako je prostor V konačnodimenzijski.

Zadatak 1.3.1. Neka je A linearan operator na konačnodimenzijskom prostoru V . Dokažite jednakost $\text{asc}(A) = \text{desc}(A)$ pomoću teorema o rang i defektu.

Neka je sada A linearan operator na konačnodimenzijskom prostoru V nad poljem K i $\mu_A \in K[T]$ njegov minimalan polinom. Rastav polinoma μ_A na relativno proste faktore tada vodi na rastav prostora V na A –invarijantne potprostore:

Teorem 1.3.3. Neka je A linearan operator na konačnodimenzijskom prostoru V nad poljem K i $\mu_A \in K[T]$ njegov minimalan polinom. Pretpostavimo da su $\mu_1, \dots, \mu_s$ normirani polinomi takvi da su μ_i i μ_j relativno prosti ako je $i \neq j$ i da je $\mu_A = \mu_1 \cdots \mu_s$. Stavimo $V_j = \text{Ker } \mu_j(A)$, $j = 1, \dots, s$. Tada vrijedi:

(a) Vrijedi $V = V_1 \dot{+} \cdots \dot{+} V_s$.

(b) Za svaki $j \in \{1, \dots, s\}$ potprostor V_j je A –invarijantan i μ_j je minimalni operator restrikcije $A_j = A|_{V_j}$.

(c) Za $j \in \{1, \dots, s\}$ stavimo $\nu_j = \mu_1 \cdots \mu_{j-1} \mu_{j+1} \cdots \mu_s$, tj. $\mu_A = \mu_j \nu_j$. Tada je $V_j = \text{Im } \nu_j(A)$.

(d) Ako je W A –invarijantan potprostor od V onda je

$$W = \sum_{j=1}^s \dot{+} W \cap V_j.$$

Dokaz: Ako su polinom P relativno prost sa svakim od polinoma $P_1, \dots, P_k$ onda je P relativno prost s njihovim produktom $P_1 \cdots P_k$. Odatle vidimo da je dokaz teorema dovoljno provesti u slučaju $s = 2$.

Dakle, pretpostavljamo da je $\mu_A = \mu_1\mu_2$, gdje su μ_1 i μ_2 relativno prosti normirani polinomi, i stavljamo $V_1 = \text{Ker } \mu_1(A)$ i $V_2 = \text{Ker } \mu_2(A)$. Budući da operatori $\mu_1(A)$ i $\mu_2(A)$ komutiraju s operatorom A , potprostori V_1 i V_2 su A -invarijantni. Kako su μ_1 i μ_2 relativno prosti, postoje polinomi $P, Q \in K[T]$ takvi da je $\mu_1P + \mu_2Q = 1$. Tada vrijedi

$$v = \mu_1(A)P(A)v + \mu_2(A)Q(A)v \quad \forall v \in V. \quad (1.1)$$

Za $v \in V$ stavimo $v_1 = \mu_2(A)Q(A)v$ i $v_2 = \mu_1(A)P(A)v$. Tada je $\mu_1(A)v_1 = \mu_A(A)Q(A)v = 0$, pa je $v_1 \in V_1$. Analogno je $v_2 \in V_2$. Iz (1.1) slijedi da je $v = v_1 + v_2$. Time je dokazano da je $V = V_1 + V_2$. Ako je $v \in V_1 \cap V_2$, onda je $\mu_1(A)v = \mu_2(A)v = 0$, pa iz (1.1) slijedi da je $v = 0$. Dakle, suma je direktna: $V = V_1 \dot{+} V_2$. Time je dokazana tvrdnja (a).

Već smo spomenuli da su potprostori V_1 i V_2 A -invarijantni. Stavimo $A_1 = A|_{V_1}$ i $A_2 = A|_{V_2}$. Za svaki $v \in V_1$ je $\mu_1(A_1)v = \mu_1(A)v = 0$. To pokazuje da je $\mu_1(A_1) = 0$, pa slijedi da je polinom μ_1 djeljiv s minimalnim polinomom μ_{A_1} operatora A_1 . Stavimo sada $S = \mu_{A_1}\mu_2$. Za $v \in V_1$ tada je $S(A)v = S(A_1)v = \mu_{A_1}(A_1)\mu_2(A_1)v = 0$, a za $v \in V_2$ je $\mu_2(A)v = 0$, pa je također $S(A)v = 0$. Kako je prostor V suma potprostora V_1 i V_2 , zaključujemo da je $S(A) = 0$. Tada je polinom S djeljiv s minimalnim polinomom μ_A , dakle, $\mu_{A_1}\mu_2 = S = \mu_A R = \mu_1\mu_2 R$ za neki polinom R . Slijedi $\mu_{A_1} = \mu_1 R$, odnosno, polinom μ_{A_1} djeljiv je s polinomom μ_1 . Kako su polinomi μ_{A_1} i μ_1 normirani, slijedi $\mu_{A_1} = \mu_1$. Analogno se dokazuje da je $\mu_{A_2} = \mu_2$. Time je dokazana tvrdnja (b).

Napokon, za $v \in V_1$ iz (1.1) slijedi da je $v = \mu_2(A)Q(A)v \in \text{Im } \mu_2(A)$. Dakle, $V_1 \subseteq \text{Im } \mu_2(A)$. S druge strane, neka je $v \in \text{Im } \mu_2(A)$ i neka je $w \in V$ takav da je $v = \mu_2(A)w$. Tada je $\mu_1(A)v = \mu_A(A)w = 0$, odnosno, $v \in V_1$. Time je dokazana i obrnuta inkluzija $\text{Im } \mu_2(A) \subseteq V_1$. Dakle, $V_1 = \text{Im } \mu_2(A)$. Analogno je $V_2 = \text{Im } \mu_1(A)$. Time je dokazana tvrdnja (c).

Neka je sada W A -invarijantan potprostor prostora V . Za $v \in W$ prema (1.1) je $v = v_1 + v_2$, gdje su $v_1 = \mu_2(A)Q(A)v$ i $v_2 = \mu_1(A)P(A)v$. No tada je $v_1 \in W \cap V_1$ i $v_2 \in W \cap V_2$. Time smo dokazali da je $W \subseteq W \cap V_1 \dot{+} W \cap V_2$. Kako je obrnuta inkluzija očigledna, vrijedi jednakost $W = W \cap V_1 \dot{+} W \cap V_2$. Time je i tvrdnja (d) dokazana.

Korolar 1.3.4. *Neka je A linearan operator na konačnodimenzionalnom prostoru V i μ_A njegov minimalan polinom. Pretpostavimo da je 0 nultočka polinoma μ_A kratnosti $k \in \mathbb{Z}_+$, tj. $\mu_A(T) = T^k \nu(T)$ za neki polinom ν takav da je $\nu(0) \neq 0$ (uključen je i slučaj kad 0 nije nultočka od μ_A : tada je $k = 0$ i $\nu = \mu_A$). Tada je*

$$V_{(0)}(A) = \text{Ker } A^k \quad i \quad V_*(A) = \text{Ker } \nu(A).$$

Dokaz: Tada su polinomi T^k i ν relativno prosti, pa prema tvrdnji (a) teorema 1.3.3. vrijedi $V = V_1 \dot{+} V_2$, gdje su $V_1 = \text{Ker } A^k$ i $V_2 = \text{Ker } \nu(A)$. Očito je operator $A|_{V_1}$ nilpotentan, pa prema tvrdnji (d) teorema 1.3.2. vrijedi $V_1 \subseteq V_{(0)}(A)$. Nadalje, prema tvrdnji (b) teorema 1.3.3. je ν minimalni polinom restrikcije $A|_{V_2}$. Kako je 0 nije nultočka od ν , zaključujemo da je operator $A|_{V_2}$ invertibilan. Sada iz tvrdnje (f) teorema 1.3.2. zaključujemo da je $V_2 \subseteq V_*(A)$. Dakle, imamo

$$V = V_1 \dot{+} V_2, \quad V_1 \subseteq V_{(0)}(A), \quad V_2 \subseteq V_*(A) \quad i \quad V = V_{(0)}(A) \dot{+} V_*(A).$$

Odatle slijedi $V_1 = V_{(0)}(A)$ i $V_2 = V_*(A)$, a to je upravo tvrdnja korolara.

Neka je A linearan operator na vektorskom prostoru V . Kažemo da je A **poluprost operator** ako je $\{A\}$ -modul V poluprost, odnosno, ako za svaki A -invarijantan potprostor W postoji A -invarijantan potprostor U takav da je $V = W \dot{+} U$. Prema teoremu 1.2.5. to je ispunjeno ako i samo ako je V suma svojih prostih $\{A\}$ -podmodula, odnosno, direktna suma nekih svojih prostih $\{A\}$ -podmodula.

Propozicija 1.3.5. *Neka je A linearan operator na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru $V \neq \{0\}$ nad algebarski zatvorenim poljem K . Tada je A poluprost ako i samo ako je dijagonalizabilan, tj. ako i samo ako postoji baza prostora V u odnosu na koju operator A ima dijagonalnu matricu.*

Dokaz: Prema tvrdnji (c) Dixmier–Schurove leme (teorem 1.2.6.) prost $\{A\}$ –podmodul je nužno jednodimenzionalan, dakle, razapet svojstvenim vektorom operatora A . Odatle slijedi propozicija.

Prema tome, u slučaju konačnodimenzionalnog prostora V nad algebarski zatvorenim poljem K za poluprost operator A vrijedi

$$V = \sum_{\lambda \in Sp(A)} \dot{+} V_{\lambda}(A).$$

Pri tome smo sa $V_{\lambda}(A)$ označili svojstveni potprostor operatora A za svojstvenu vrijednost λ :

$$V_{\lambda}(A) = \{v \in V; Av = \lambda v\} = \text{Ker}(\lambda I - A).$$

Definiramo sada **korijenski potprostor** $V_{(\lambda)}(A)$ kao Fittingovu 0–komponentu prostora V u odnosu na operator $\lambda I - A$:

$$V_{(\lambda)}(A) = V_{(0)}(A - \lambda I) = \bigcup_{k \geq 0} \text{Ker}(A - \lambda I)^k = \{v \in V; \exists k \in \mathbb{Z}_+ \text{ takav da je } (A - \lambda I)^k v = 0\}.$$

Teorem 1.3.6. *Neka je A linearan operator na konačnodimenzionalnom prostoru V nad algebarski zatvorenim poljem K .*

(a) *Vrijedi*

$$V = \sum_{\lambda \in Sp(A)} \dot{+} V_{(\lambda)}(A). \quad (1.2)$$

(b) *Ako je W A –invarijantan potprostor od V onda je*

$$W = \sum_{\lambda \in Sp(A)} \dot{+} W \cap V_{(\lambda)}(A).$$

(c) *Za $\lambda \in Sp(A)$ je*

$$V_*(A - \lambda I) = \sum_{\mu \in Sp(A) \setminus \{\lambda\}} \dot{+} V_{(\mu)}(A). \quad (1.3)$$

Dokaz: (a) Neka je μ_A minimalni polinom operatora A i $Sp(A) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_s\}$ njegov spektar, pri čemu je $\lambda_i \neq \lambda_j$ za $i \neq j$. Tada vrijedi

$$\mu_A(T) = (T - \lambda_1)^{p_1} \dots (T - \lambda_s)^{p_s}$$

za neke prirodne brojeve $p_1, \dots, p_s$. Polinomi $(T - \lambda_i)^{p_i}$ i $(T - \lambda_j)^{p_j}$ su normirani i relativno prosti za $i \neq j$. Prema tvrdnji (a) i teorema 1.3.3. tada je

$$V = \sum_{j=1}^s \dot{+} \text{Ker}(A - \lambda_j I)^{p_j}, \quad (1.4)$$

a prema tvrdnji b) istog teorema svaki potprostor $\text{Ker}(A - \lambda_j I)^{p_j}$ je A –invarijantan i minimalni polinom pripadne restrikcije operatora A je $(T - \lambda_j)^{p_j}$.

Za $i \in \{1, \dots, s\}$ očito je $\text{Ker}(A - \lambda_i)^{p_i} \subseteq V_{(\lambda_i)}(A)$. S druge strane, $V_{(\lambda_i)}(A)$ je A -invarijantan potprostor od V pa je po tvrdnji (d) teorema 1.3.3. potprostor $V_{(\lambda_i)}$ direktna suma presjeka $V_{(\lambda_i)} \cap (\text{Ker}(A - \lambda_j I)^{p_j})$ za $j = 1, \dots, s$. Neka je $j \neq i$ i neka je $v \in V_{(\lambda_i)}(A) \cap (\text{Ker}(A - \lambda_j I)^{p_j})$. Tada vrijedi $(A - \lambda_j I)^{p_j} v = 0$ i za neki $k \in \mathbb{N}$ je $(A - \lambda_i I)^k v = 0$. Polinomi $(T - \lambda_j)^{p_j}$ i $(T - \lambda_i I)^k$ su relativno prosti, pa postoje polinomi $R, S \in K[T]$ takvi da je $R(T)(T - \lambda_j)^{p_j} + S(T)(T - \lambda_i I)^k = 1$. Tada je

$$v = R(A)(A - \lambda_j I)^{p_j} v + S(A)(A - \lambda_i I)^k v = 0.$$

Time je dokazano da je $V_{(\lambda_i)}(A) \cap (\text{Ker}(A - \lambda_j I)^{p_j}) = \{0\}$ za $j \neq i$. Zaključujemo da je $V_{(\lambda_i)}(A) = V_{(\lambda_i)}(A) \cap (\text{Ker}(A - \lambda_i I)^{p_i})$, a to zajedno s inkluzijom $\text{Ker}(A - \lambda_i I)^{p_i} \subseteq V_{(\lambda_i)}(A)$ daje jednakost $V_{(\lambda_i)}(A) = \text{Ker}(A - \lambda_i I)^{p_i}$. Prema tome, (1.4) je upravo jednakost (1.2).

Tvrdnja (b) slijedi neposredno iz tvrdnje (d) teorema 1.3.3.

(c) Za bilo koji $i \in \{1, \dots, s\}$ minimalni polinom operatora $B = A - \lambda_i I$ jednak je $\mu_A(T + \lambda_i)$. Imamo

$$\mu_B(T) = \mu_A(T + \lambda_i) = T^{p_i} \nu(T), \quad \text{gdje je} \quad \nu(T) = \prod_{j \neq i} (T + \lambda_i - \lambda_j)^{p_j}.$$

Vrijedi

$$\nu(0) = \prod_{j \neq i} (\lambda_i - \lambda_j)^{p_j} \neq 0.$$

Prema korolaru 1.3.4. slijedi

$$V_*(A - \lambda_i I) = V_*(B) = \text{Ker } \nu(B).$$

Ali prema tvrdnji (b) teorema 1.3.3. ν je minimalni polinom restrikcije $C = B|(\text{Ker } \nu(B))$, pa po tvrdnji (a) teorema 1.3.3. primijenjenog na operator C i na rastav njegovog minimalnog polinoma

$$\nu(T) = \prod_{j \neq i} (T + \lambda_i - \lambda_j)^{p_j}$$

u relativno proste normirane faktore zaključujemo da je

$$V_*(A - \lambda_i I) = \sum_{j \neq i} \dot{+} \text{Ker}(B + \lambda_i I - \lambda_j I)^{p_j} = \sum_{j \neq i} \dot{+} \text{Ker}(A - \lambda_j I)^{p_j} = \sum_{j \neq i} \dot{+} V_{(\lambda_j)}(A).$$

No to je upravo jednakost (1.3) za $\lambda = \lambda_i$.

U situaciji iz teorema 1.3.6. potprostor $V_{(\lambda)}(A)$ zove se **korijenski potprostor** prostora V u odnosu na operator A i njegovu svojstvenu vrijednost λ . Nadalje, (1.2) se zove **korijenska dekompozicija** ili **korijenski rastav** prostora V u odnosu na operator A .

Korolar 1.3.7. *Operator A na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru V nad algebarski zatvorenim poljem K je poluprost ako i samo ako njegov minimalni polinom μ_A ima sve nultočke jednostruke.*

Dokaz: Ako polinom μ_A ima sve nultočke jednostruke, onda iz teorema 1.3.3. i teorema 1.3.6. slijedi da je

$$V = \sum_{\lambda \in Sp(A)} \dot{+} V_{\lambda}(A),$$

a to znači da je operator A dijagonalizabilan, odnosno, poluprost. Obratno, ako je A poluprost, odnosno, dijagonalizabilan, onda vrijedi gornji rastav. Tada za polinom P definiran sa

$$P(T) = \prod_{\lambda \in Sp(A)} (T - \lambda)$$

vrijedi $P(A) = 0$. Tada je očito $P = \mu_A$, dakle, minimalni polinom μ_A ima sve nultočke jednostruke.

Teorem 1.3.8. *Neka je A linearan operator na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru nad algebarski zatvorenim poljem K .*

- (a) *Postoje jedinstven poluprost operator A_s i jedinstven nilpotentan operator A_n na prostoru V takvi da je $A = A_s + A_n$ i $A_s A_n = A_n A_s$.*
- (b) *Ako je B linearan operator na prostoru V koji komutira s operatorom A onda B komutira i s operatorima A_s i A_n .*
- (c) *Ako je W A -invarijantan potprostor od V onda je W A_s -invarijantan i A_n -invarijantan. Nadalje, tada je $(A|W)_s = A_s|W$ i $(A|W)_n = A_n|W$.*

Dokaz: Imamo korijenski rastav (1.2) prostora V u odnosu na operator A . Definiramo operatore A_s i A_n na prostoru V ovako:

$$A_s|_{V_{(\lambda)}}(A) = \lambda I_{V_{(\lambda)}}, \quad \lambda \in Sp(A), \quad A_n = A - A_s.$$

Očito je tada $Sp(A_s) = Sp(A)$ i $V_{\lambda}(A_s) = V_{(\lambda)}(A)$ za svaki $\lambda \in Sp(A)$. Prema tome, operator A_s je poluprost. Nadalje, operator A_s komutira s operatorom A , dakle, i operator A_n komutira s operatorom A . Za $\lambda \in Sp(A)$ vrijedi $(A - \lambda I)^p|_{V_{(\lambda)}}(A) = 0$, gdje je p kratnost nultočke λ u minimalnom polinomu μ_A operatora A . Po definiciji operatora A_s i A_n imamo

$$(A - \lambda I)|_{V_{(\lambda)}}(A) = (A - A_s)|_{V_{(\lambda)}}(A) = A_n|_{V_{(\lambda)}}(A).$$

To pokazuje da je $(A_n)^p|_{V_{(\lambda)}}(A) = 0$. Dakle, ako je k maksimum kratnosti nultočaka minimalnog polinoma μ_A , onda je $(A_n)^k|_{V_{(\lambda)}}(A) = 0 \quad \forall \lambda \in Sp(A)$, pa slijedi $(A_n)^k = 0$. Dakle, operator A_n je nilpotentan. Napokon, kako A_s komutira sa A , A_s komutira i sa $A_n = A - A_s$. Time je dokazana egzistencija u tvrdnji (a).

Dokazat ćemo sada da za definirane operatore A_s i A_n vrijedi tvrdnja (b). Doista, neka je B linearan operator na prostoru V koji komutira s operatorom A . Neka je $v \in V_{(\lambda)}(A)$ za neki $\lambda \in Sp(A)$. Tada je $(A - \lambda I)^k v = 0$ za neki $k \in \mathbb{N}$. No tada je $(A - \lambda I)^k Bv = B(A - \lambda I)^k v = 0$, dakle, $Bv \in V_{(\lambda)}(A)$. Slijedi $A_s Bv = \lambda Bv = B\lambda v = BA_s v$. Prema tome, vrijedi $A_s B|_{V_{(\lambda)}}(A) = BA_s|_{V_{(\lambda)}}(A) \quad \forall \lambda \in Sp(A)$. Kako je V suma potprostora $V_{(\lambda)}(A)$, $\lambda \in Sp(A)$, zaključujemo da vrijedi $A_s B = BA_s$. No tada B komutira i sa $A_n = A - A_s$.

Dokažimo sada jedinstvenost u tvrdnji (a). Neka su S poluprost i N nilpotentan operator na prostoru V takvi da je $A = S + N$ i $SN = NS$. Tada operatori S i N komutiraju s operatorom A , pa prema tvrdnji (b) oni komutiraju s operatorima A_s i A_n . Sada iz $A = A_s + A_n = S + N$ slijedi $A_s - S = N - A_n$. Označimo taj operator sa C . Budući da su operatori A_s i S poluprosti oni su dijagonalizabilni, a kako komutiraju i njihova razlika C je dijagonalizabilan operator. S druge strane, operator C je razlika nilpotentnih operatora koji komutiraju pa i sam nilpotentan. Stoga je $Sp(C) = \{0\}$, a kako je C dijagonalizabilan, slijedi $C = 0$. Dakle, $S = A_s$ i $N = A_n$, odnosno, dokazana je i jedinstvenost u tvrdnji (a).

(c) Neka je W A -invarijantan potprostor od V . Prema tvrdnji (b) teorema 1.3.6. tada je

$$W = \sum_{\lambda \in Sp(A)} W \cap V_{(\lambda)}(A).$$

Međutim, svaki $V_{(\lambda)}(A)$ je svojstven potprostor operatora A_s , pa je svaki njegov potprostor, posebno, presjek $W \cap V_{(\lambda)}(A)$, A_s -invarijantan. Stoga je i suma W tih presjeka A_s -invarijantan potprostor od V . Kako je $A_n = A - A_s$, potprostor W je i A_n -invarijantan.

Operator A_s iz teorema 1.3.8. zove se **poluprosti dio** operatora A , a operator A_n zove se **nilpotentni dio** operatora A . Rastav $A = A_s + A_n$ zove se **Jordanov rastav** ili **Jordanova dekompozicija** operatora A .

Treba nam sada jedan opći rezultat iz teorije komutativnih prstenova:

Teorem 1.3.9. (Kineski teorem o ostacima) *Neka je R unitalan komutativni prsten i $I_1, \dots, I_n$ ideali u R takvi da je $I_i + I_j = R$ za $i \neq j$. Za proizvoljne $x_1, \dots, x_n \in R$ postoji $x \in R$ takav da je $x - x_j \in I_j$ za $j = 1, \dots, n$.*

Dokaz provodimo indukcijom po $n \geq 2$.

Pretpostavimo najprije da je $n = 2$. Dakle, neka su I_1, I_2 su ideali u R takvi da je $R = I_1 + I_2$ i neka su $x_1, x_2 \in R$. Tada postoje $a_1 \in I_1$ i $a_2 \in I_2$ takvi da je $a_1 + a_2 = 1$. Stavimo $x = x_1 a_2 + x_2 a_1$. Tada je

$$x - x_1 = x - x_1 a_2 + x_1 a_2 - x_1 = x_2 a_1 + x_1 (a_2 - 1) = x_2 a_1 - x_1 a_1 = (x_2 - x_1) a_1 \in I_1$$

i, analogno, $x - x_2 \in I_2$. Time je teorem dokazan za $n = 2$.

Neka je sada $n \geq 3$ proizvoljan, $I_1, \dots, I_n$ ideali u R i $x_1, \dots, x_n \in R$. Fiksirajmo sada $i \in \{1, \dots, n\}$. Tada je $I_i + I_j = R$ za $j \neq i$, pa postoje $a_j \in I_i$ i $b_j \in I_j$ takvi da je $a_j + b_j = 1$. Tada je

$$1 = (a_1 + b_1) \cdots (a_{i-1} + b_{i-1})(a_{i+1} + b_{i+1}) \cdots (a_n + b_n).$$

Riješimo li se s desne strane te jednakosti zagrada, dobivamo da je

$$1 = c + d \quad \text{gdje je} \quad c = b_1 \cdots b_{i-1} b_{i+1} \cdots b_n \in \bigcup_{j \neq i} I_j \quad \text{i} \quad d = 1 - c \in I_i.$$

Odatle slijedi da je

$$I_i + \bigcap_{j \neq i} I_j = R$$

pa prema dokazanoj tvrdnji teorema za $n = 2$ slijedi da postoji $y_i \in R$ takav da je

$$y_i - 1 \in I_i \quad \text{i} \quad y_i = y_i - 0 \in \bigcap_{j \neq i} I_j.$$

Stavimo sada $x = x_1 y_1 + \cdots + x_n y_n$. Za bilo koji $i \in \{1, \dots, n\}$ tada je $y_j \in I_i$ za svaki $j \neq i$, dakle,

$$x - x_i y_i = x_1 + \cdots + x_{i-1} y_{i-1} + x_{i+1} y_{i+1} + \cdots + x_n y_n \in I_i. \quad (1.5)$$

Nadalje,

$$x_i y_i - x_i = x_i (y_i - 1) \in I_i. \quad (1.6)$$

Iz (1.5) i (1.6) slijedi $x - x_i = (x - x_i y_i) + (x_i y_i - x_i) \in I_i$.

Teorem 1.3.10. *Neka je A linearan operator na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru nad algebarski zatvorenim poljem K . Tada postoje polinomi $P, Q \in K[T]$ takvi da je $P(0) = Q(0) = 0$, $P(A) = A_s$ i $Q(A) = A_n$.*

Dokaz: Neka je $Sp(A) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_s\}$, pri čemu je $\lambda_i \neq \lambda_j$ za $i \neq j$. Tada imamo rastav minimalnog polinoma μ_A operatora A ,

$$\mu_A(T) = (T - \lambda_1)^{p_1} \cdots (T - \lambda_s)^{p_s}$$

za neke prirodne brojeve $p_1, \dots, p_s$. Neka je I_j ideal u prstenu $K[T]$ generiran polinomom $(T - \lambda_j)^{p_j}$. Za $i \neq j$ polinomi $(T - \lambda_i)^{p_i}$ i $(T - \lambda_j)^{p_j}$ relativno prosti, pa postoje polinomi $R, S \in K[T]$ takvi da je $R(T)(T - \lambda_i)^{p_i} + S(T)(T - \lambda_j)^{p_j} = 1$. Odatle slijedi da je $I_i + I_j = K[T]$. Nadalje, ako $0 \notin Sp(A)$ neka je $I_0 = TK[T]$ ideal u $R[T]$ generiran polinomom T . Tada su polinomi T i $(T - \lambda_i)^{p_i}$ relativno prosti pa vrijedi i $I_0 + I_i = K[T]$ za svaki $i \in \{1, \dots, s\}$. Prema tome, zadovoljene su pretpostavke Kineskog teorema o ostacima, pa postoji polinom $P \in K[T]$ takav da je

$$P - \lambda_j \in I_j \quad \text{za} \quad j = 1, \dots, s \quad \text{i} \quad P = P - 0 \in I_0.$$

Stavimo $Q = T - P$. Tada su $P, Q \in I_0$, pa vrijedi $P(0) = Q(0) = 0$. Nadalje, stavimo $S = P(A)$ i $N = Q(A)$. Tada operatori S i N komutiraju i vrijedi $A = S + N$. Dakle, svaki od potprostora $V_{(\lambda_j)}(A)$ je S -invarijantan. Kako je $P - \lambda_j \in I_j$ postoji polinom $R_j \in K[T]$ takav da je

$$P(T) - \lambda_j = R_j(T)(T - \lambda_j)^{p_j}, \quad \text{dakle} \quad S - \lambda_j I = R_j(A)(A - \lambda_j I)^{p_j}.$$

Prema dokazu teorema 1.3.6. vrijedi $V_{(\lambda_j)}(A) = \text{Ker}(A - \lambda_j I)^{p_j}$. Zaključujemo da je

$$(S - \lambda_j I)|_{V_{(\lambda_j)}(A)} = 0, \quad \text{tj.} \quad S|_{V_{(\lambda_j)}(A)} = \lambda_j I_{V_{(\lambda_j)}(A)} = A_s|_{V_{(\lambda_j)}(A)}.$$

Kako to vrijedi za svaki j , slijedi da je $S = A_s$. Tada je i $A_n = I - A_s = I - S = N = Q(A)$.

Propozicija 1.3.11. *Neka je V konačnodimenzijski vektorski prostor nad algebarski zatvorenim poljem K . Za linearan operator A na prostoru V definiramo linearan operator $\text{ad } A$ na prostoru $\mathfrak{gl}(V) = L(V)$ sa $(\text{ad } A)B = AB - BA$, $B \in \mathfrak{gl}(V)$.*

(a) *Ako je linearan operator A poluprost, onda je i operator $\text{ad } A$ poluprost.*

(b) *Ako je linearan operator A nilpotentan, onda je i operator $\text{ad } A$ nilpotentan.*

(c) *Za linearan operator A na prostoru V vrijedi $(\text{ad } A)_s = \text{ad } A_s$ i $(\text{ad } A)_n = \text{ad } A_n$.*

Dokaz: (a) Neka je $\{e_1, \dots, e_n\}$ baza prostora V sastavljena od svojstvenih vektora operatora A ,

$$Ae_j = \lambda_j e_j, \quad j = 1, \dots, n$$

Neka je $\{E_{ij}; i, j = 1, \dots, n\}$ pripadna baza od $\mathfrak{gl}(V)$; tj. E_{ij} su linearni operatori na V zadani sa

$$E_{ij}e_k = \delta_{jk}e_i, \quad i, j, k = 1, \dots, n.$$

Tada se lako vidi da je

$$(\text{ad } A)E_{ij} = (\lambda_i - \lambda_j)E_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, n.$$

Dakle, operator $\text{ad } A$ je dijagonalizabilan, odnosno, poluprost.

(b) Definiramo linearne operatore L_A i R_A na prostoru $\mathfrak{gl}(V)$ pomoću lijevog i desnog množenja s operatorom A :

$$L_AB = AB, \quad R_AB = BA, \quad B \in \mathfrak{gl}(V).$$

Tada je $\text{ad } A = L_A - R_A$ i operatori L_A i R_A komutiraju. Prema tome, ako je $k \in \mathbb{N}$ takav da je $A^k = 0$, dakle, i $(L_A)^k = (R_A)^k = 0$, onda je

$$(\text{ad } A)^{2k-1} = (L_A - R_A)^{2k-1} = \sum_{j=0}^{2k-1} (-1)^j \binom{2k-1}{j} (L_A)^{2k-1-j} (R_A)^j = 0,$$

jer ili je $j \geq k$ ili je $2k - 1 - j \geq k$. Dakle, operator $\text{ad } A$ je nilpotentan.

(c) Prema (a) i (b) operator $\text{ad } A_s$ je poluprost i operator $\text{ad } A_n$ je nilpotentan. Budući da operatori A_s i A_n komutiraju, operatori $\text{ad } A_s$ i $\text{ad } A_n$ također komutiraju. Napokon, vrijedi $\text{ad } A = \text{ad } A_s + \text{ad } A_n$, pa iz jedinstvenosti u trvdnji (a) teorema 1.3.8. slijedi da je $(\text{ad } A)_s = \text{ad } A_s$ i $(\text{ad } A)_n = \text{ad } A_n$.

Propozicija 1.3.12. *Neka je $\mathcal{A}$ konačnodimenzijska algebra nad algebarski zatvorenim poljem K i neka je $D \in \text{Der}(\mathcal{A})$. Tada su $D_s, D_n \in \text{Der}(\mathcal{A})$.*

Dokaz: Kako je $\text{Der}(\mathcal{A})$ vektorski prostor i $D_n = D - D_s$, dovoljno je dokazati da je $D_s \in \text{Der}(\mathcal{A})$. Imamo

$$\mathcal{A} = \sum_{\lambda \in Sp(D)} \dot{+} \mathcal{A}_{(\lambda)}(D) \quad (1.7)$$

i vrijedi $Sp(D_s) = Sp(D)$ i $D_s|_{\mathcal{A}_{(\lambda)}} = \lambda I_{\mathcal{A}_{(\lambda)}}$.

Zadatak 1.3.2. *Indukcijom po $n \in \mathbb{N}$ dokažite da za bilo koje $\lambda, \mu \in K$ i $x, y \in \mathcal{A}$ vrijedi*

$$(D - (\lambda + \mu)I_{\mathcal{A}})^n(xy) = \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} ((D - \lambda I_{\mathcal{A}})^{n-j}x) ((D - \mu I_{\mathcal{A}})^jy).$$

Za $\lambda, \mu \in K$ i za $x \in \mathcal{A}_{(\lambda)}(D)$ i $y \in \mathcal{A}_{(\mu)}(D)$ iz jednakosti u zadatku 1.3.2 slijedi $xy \in \mathcal{A}_{(\lambda+\mu)}(D)$. Stoga je $D_s x = \lambda x$, $D_s y = \mu y$ i

$$D_s(xy) = (\lambda + \mu)xy = (\lambda x)y + x(\mu y) = (D_s x)y + x(D_s y).$$

Sada iz (1.7) slijedi da jednakost $D_s(xy) = (D_s x)y + x(D_s y)$ vrijedi za sve $x, y \in \mathcal{A}$, odnosno, $D_s \in \text{Der}(\mathcal{A})$.

Dokazat ćemo još jednu tehničku tvrdnju o dovoljnom uvjetu za nilpotentnost linearnog operatora koja će nam kasnije trebati.

Lema 1.3.13. *Neka je V konačnodimenzijski vektorski prostor nad algebarski zatvorenim poljem K karakteristike 0, $X \subseteq Y$ potprostori od $\mathfrak{gl}(V)$ i*

$$\mathfrak{a} = \{A \in \mathfrak{gl}(V); [A, Y] \subseteq X\}.$$

Ako za $A \in \mathfrak{a}$ vrijedi $\text{Tr } AB = 0 \ \forall B \in \mathfrak{a}$, onda je operator A nilpotentan.

Dokaz: Treba dokazati da za takav operator A vrijedi $A_s = 0$. Neka je $\{e_1, \dots, e_n\}$ baza od V sastavljena od svojstvenih vektora operatora A_s i neka su $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in K$ pripadne svojstvene vrijednosti: $A_s e_j = \alpha_j e_j$. Neka je L vektorski potprostor od K nad poljem $\mathbb{Q}$ racionalnih brojeva razapet sa $\{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}$. Cilj nam je dokazati da je $L = \{0\}$, jer će to značiti da je $A_s = 0$. Kako je L konačnodimenzijski vektorski prostor, dovoljno je dokazati da je njegov dualni prostor L^* jednak $\{0\}$, tj. da je nul-funkcional jedini $\mathbb{Q}$ -linearni funkcional $f : L \rightarrow \mathbb{Q}$.

Neka je $f : L \rightarrow \mathbb{Q}$ $\mathbb{Q}$ -linearni funkcional. Neka je $B \in \mathfrak{gl}(V)$ zadan sa

$$B e_j = f(\alpha_j) e_j, \quad j = 1, \dots, n.$$

Neka je kao i prije $\{E_{ij}; i, j = 1, \dots, n\}$ baza prostora $\mathfrak{gl}(V)$ dobivena iz baze $\{e_1, \dots, e_n\}$ prostora V :

$$E_{ij} e_k = \delta_{jk} e_i, \quad i, j, k = 1, \dots, n.$$

Kao što smo vidjeli u dokazu propozicije 1.3.11. tada je

$$(ad A_s) E_{ij} = (\alpha_i - \alpha_j) E_{ij} \quad \text{ i } \quad (ad B) E_{ij} = (f(\alpha_i) - f(\alpha_j)) E_{ij}. \quad (1.8)$$

Neka je sada $R \in K[T]$ Lagrangeov interpolacioni polinom definiran podacima

$$\{0\} \cup \{\alpha_i - \alpha_j; i, j = 1, \dots, n\} \quad \text{ i } \quad \{0\} \cup \{f(\alpha_i) - f(\alpha_j); i, j = 1, \dots, n\},$$

tj. polinom najnižeg stupnja takav da je

$$R(0) = 0, \quad R(\alpha_i - \alpha_j) = f(\alpha_i) - f(\alpha_j), \quad i, j = 1, \dots, n.$$

Pri tome nema dvojbe ili kontradikcije u definiciji polinoma R budući da iz $\alpha_i - \alpha_j = \alpha_k - \alpha_\ell$ za neke i, j, k, ℓ zbog $\mathbb{Q}$ -linearnosti od f slijedi da je i $f(\alpha_i) - f(\alpha_j) = f(\alpha_k) - f(\alpha_\ell)$. Iz jednakosti (1.8) vidi se da vrijedi $R(ad A_s) = ad B$.

Prema tvrdnji (c) propozicije 1.3.11. znamo da je $ad A_s$ poluprosti dio operatora $ad A$, pa prema teoremu 1.3.10. primijenjenom na operator $ad A$ operator $ad A_s$ polinom u operatoru $ad A$ bez konstantnog člana. Dakle, operator $ad B$ je polinom u operatoru $ad A$ bez konstantnog člana. Po pretpostavici operator $ad A$ preslikava potprostor Y u potprostor X . Slijedi da i operator $ad B$ preslikava potprostor Y u potprostor X . Dakle, vrijedi $B \in \mathfrak{a}$. Po pretpostavci je stoga $\text{Tr } AB = 0$. Možemo pretpostaviti da smo bazu $\{e_1, \dots, e_n\}$ numerirali tako da u njoj operator A ima gornje trokutastu matricu s elementima $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ na dijagonali. Tada operator AB ima gornje trokutastu matricu i na dijagonali su mu elementi $f(\alpha_1)\alpha_1, \dots, f(\alpha_n)\alpha_n$. Dakle, $\text{Tr } AB = 0$ znači da je

$$\sum_{i=1}^n f(\alpha_i)\alpha_i = 0.$$

Lijeva strana je $\mathbb{Q}$ -linearna kombinacija elemenata $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in L$. Primijenimo li na gornju jednakost $\mathbb{Q}$ -linearan funkcional f , slijedi

$$\sum_{i=1}^n f(\alpha_i)^2 = 0.$$

Kako su svi $f(\alpha_i)$ racionalni brojevi, slijedi da su svi jednaki nuli. Dakle, $f = 0$, budući da $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ razapinju L nad $\mathbb{Q}$.

Napomena: Za linearan operator A na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru V nad bilo kojim poljem K kažemo da je **rascjepiv** ako polje K sadrži sve nultočke njegovog minimalnog polinoma μ_A . Nije teško vidjeti da teoremi 1.3.6., 1.3.8. i 1.3.10., propozicije 1.3.5., 1.3.11. i 1.3.12., te korolar 1.3.7. vrijede i bez zahtjeva da je polje K algebarski zatvoreno, ali uz pretpostavku da je operator A (odnosno, D) rascjepiv. Štoviše, prešavši na konačno proširenje polja K nultočkama minimalnog polinoma promatranog linearnog operatora A (odnosno, D), može se dokazati da uz pretpostavku da je polje K karakteristike 0 teoremi 1.3.8. i 1.3.10., propozicije 1.3.11. i 1.3.12. i korolar 1.3.7. vrijede i bez pretpostavke o rascjepivosti operatora A (odnosno, D).

Poglavlje 2

NEKE KLASKE LIEJEVIH ALGEBRI

2.1 Nilpotentne Liejeve algebre

Osim ako bude u nekom posebnom slučaju izričito navedeno, **u cijelom ćemo kolegiju promatrati samo konačnodimenzionalne Liejeve algebre**. Nadalje, promatraćemo isključivo Liejeve algebre i vektorske prostore **nad poljima karakteristike 0**.

Strukturu Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ proučavat ćemo prije svega razmatranjem tzv. **adjungirane reprezentacije** $x \mapsto \text{ad } x$, $x \in \mathfrak{g}$, Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na vektorskom prostoru $\mathfrak{g}$. Preko te reprezentacije Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ postaje $\mathfrak{g}$ -modul. Uočimo da su ideali u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$ upravo $\mathfrak{g}$ -podmoduli $\mathfrak{g}$ -modula $\mathfrak{g}$. U ovom ćemo odjeljku proučiti Liejeve algebre kod kojih su svi operatori adjungirane reprezentacije nilpotentni. Takve nazivamo **nilpotentne Liejeve algebre**. Dakle, $\mathfrak{g}$ je nilpotentna Liejeva algebra ako je operator $\text{ad } x : y \mapsto [x, y]$, $y \in \mathfrak{g}$, nilpotentan $\forall x \in \mathfrak{g}$. Svaka je komutativna Liejeva algebra naravno nilpotentna. Neka je V konačnodimenzionalan vektorski prostor. Niz drugih primjera nilpotentnih Liejevih algebri dobivamo na temelju sljedeće propozicije:

Propozicija 2.1.1. *Neka je V konačnodimenzionalan vektorski prostor. Ako je $\mathfrak{g}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$ koja se sastoji od nilpotentnih operatora, onda je $\mathfrak{g}$ nilpotentna Liejeva algebra.*

Dokaz: Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$ koja se sastoji od nilpotentnih operatora. Prema tvrdnji (b) propozicije 1.3.11. $\text{ad}_{\mathfrak{gl}(V)} A$ je nilpotentan operator na prostoru $\mathfrak{gl}(V)$ za svaki $A \in \mathfrak{g}$. No tada je restrikcija $(\text{ad}_{\mathfrak{gl}(V)} A)|_{\mathfrak{g}} = \text{ad}_{\mathfrak{g}} A$ nilpotentan operator za svaki $A \in \mathfrak{g}$. Dakle, $\mathfrak{g}$ je nilpotentna Liejeva algebra.

Propozicija 2.1.2. *Neka je $\mathfrak{g}$ nilpotentna Liejeva algebra, $\mathfrak{h}$ njena podalgebra i $\mathfrak{j}$ ideal u $\mathfrak{g}$. Tada su Liejeve algebre $\mathfrak{h}$ i $\mathfrak{g}/\mathfrak{j}$ nilpotentne.*

Dokaz: Za $x \in \mathfrak{h}$ operator $\text{ad}_{\mathfrak{h}} x$ je restrikcija na $\mathfrak{h}$ nilpotentnog operatora $\text{ad}_{\mathfrak{g}} x$, dakle, $\text{ad}_{\mathfrak{h}} x$ je nilpotentan. Dakle, Liejeva algebra $\mathfrak{h}$ je nilpotentna. Neka je $\varphi : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}/\mathfrak{j}$ kanonski epimorfizam koji elementu $x \in \mathfrak{g}$ pridružuje njegovu klasu $x + \mathfrak{j}$ u $\mathfrak{g}/\mathfrak{j}$. Neka je $y \in \mathfrak{g}/\mathfrak{j}$ i neka $x \in \mathfrak{g}$ takav da je $y = \varphi(x)$. Tada se direktno provjerava da vrijedi $(\text{ad}_{\mathfrak{g}/\mathfrak{j}} y) \circ \varphi = \varphi \circ (\text{ad}_{\mathfrak{g}} x)$. Odatle je za svaku potenciju $(\text{ad}_{\mathfrak{g}/\mathfrak{j}} y)^m \circ \varphi = \varphi \circ (\text{ad}_{\mathfrak{g}} x)^m$. Dakle, ako je $m \in \mathbb{N}$ takav da je $(\text{ad}_{\mathfrak{g}} x)^m = 0$, onda je $(\text{ad}_{\mathfrak{g}/\mathfrak{j}} y)^m \circ \varphi = 0$, a odatle je $(\text{ad}_{\mathfrak{g}/\mathfrak{j}} y)^m = 0$ jer je $\varphi : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}/\mathfrak{j}$ surjekcija. Dakle, kvocijentna Liejeva algebra $\mathfrak{g}/\mathfrak{j}$ je nilpotentna.

Neka je π reprezentacija Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na vektorskom prostoru V . Kažemo da je π **nil-reprezentacija** ako su svi operatori $\pi(x)$, $x \in \mathfrak{g}$, nilpotentni. Centralni rezultat u teoriji nilpotentnih Liejevih algebri je **Engelov teorem**:

Teorem 2.1.3. *Neka je π nil-reprezentacija Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru $V \neq \{0\}$. Tada postoji $v \in V \setminus \{0\}$ takav da je $\pi(x)v = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g}$.*

Dokaz: Neka je $\mathfrak{a} = \text{Ker } \pi$. Tada π inducira vjernu (tj. injektivnu) reprezentaciju kvocijentne algebre $\mathfrak{g}/\mathfrak{a}$. Kako su svi operatori iz $\text{Im } \pi$ nilpotentni, prema tvrdnji (b) propozicije 2.1.1. Liejeva algebra $\text{Im } \pi$, dakle, i njoj izomorfna Liejeva algebra $\mathfrak{g}/\mathfrak{a}$, je nilpotentna. To pokazuje da nije smanjenje općenitosti ako pretpostavimo da je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ nilpotentna. U daljnjem to pretpostavljamo i provodimo dokaz indukcijom po $\dim \mathfrak{g}$. Za $\dim \mathfrak{g} = 1$ tvrdnja je trivijalna, jer svaki nilpotentan operator poništava neki vektor $\neq 0$. Pretpostavimo da je $n \geq 2$ i da je teorem dokazan za nilpotentne Liejeve algebre dimenzije $< n$. Neka je $\dim \mathfrak{g} = n$. Označimo sa $\mathcal{G}$ skup svih Liejevih podalgebri $\mathfrak{h}$ od $\mathfrak{g}$ takvih da je $0 < \dim \mathfrak{h} < n$. Tada je $Kx \in \mathcal{G}$ za svaki $x \in \mathfrak{g} \setminus \{0\}$, dakle, skup $\mathcal{G}$ je neprazan. Neka je $\mathfrak{h} \in \mathcal{G}$ takva da je $\dim \mathfrak{h} \geq \dim \mathfrak{h}' \ \forall \mathfrak{h}' \in \mathcal{G}$. Tvrdimo da tada $\mathfrak{h}$ ideal u $\mathfrak{g}$ dimenzije $n - 1$. Da to dokažemo, promatrajmo vektorski prostor $W = \mathfrak{g}/\mathfrak{h}$. Ako je $x \in \mathfrak{h}$, adx je nilpotentan operator na $\mathfrak{g}$ u odnosu na koji je potprostor $\mathfrak{h}$ invarijantan. Stoga adx inducira nilpotentan operator $\rho(x)$ na kvocijentnom prostoru W . Sada je ρ nil-reprezentacija Liejeve algebre $\mathfrak{h}$ na prostoru $W \neq \{0\}$. Po pretpostavci indukcije postoji $w \in W \setminus \{0\}$ takav da je $\rho(x)w = 0 \ \forall x \in \mathfrak{h}$. Neka je $y \in \mathfrak{g} \setminus \mathfrak{h}$ takav da je $w = y + \mathfrak{h}$. Iz $\rho(x)w = 0$ slijedi da je $[x, y] \in \mathfrak{h} \ \forall x \in \mathfrak{h}$. To pokazuje da je $Ky \dot{+} \mathfrak{h}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{g}$ u kojoj je $\mathfrak{h}$ ideal. Međutim, zbog izbora $\mathfrak{h}$ zaključujemo da je $\mathfrak{g} = Ky \dot{+} \mathfrak{h}$. Dakle, stvarno je $\dim \mathfrak{h} = n - 1$ i $\mathfrak{h}$ je ideal u $\mathfrak{g}$. Sada iz pretpostavke indukcije slijedi da je potprostor

$$V' = \{v \in V; \pi(x)v = 0 \ \forall x \in \mathfrak{h}\}$$

prostora V različit od $\{0\}$. Neka je i dalje $y \in \mathfrak{g}$ takav da je $\mathfrak{g} = Ky \dot{+} \mathfrak{h}$. Za $v \in V'$ i $x \in \mathfrak{h}$ imamo

$$\pi(x)\pi(y)v = \pi(y)\pi(x)v + \pi([x, y])v = 0$$

jer je $[x, y] \in \mathfrak{h}$. To pokazuje da je $\pi(y)V' \subseteq V'$. Kako je operator $\pi(y)$ nilpotentan, postoji $v \in V' \setminus \{0\}$ takav da je $\pi(y)v = 0$. No tada je $\pi(x)v = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g}$.

Engelov teorem 2.1.3. ima sljedeću važnu posljedicu:

Teorem 2.1.4. *Neka je π nil-reprezentacija Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru $V \neq \{0\}$. Stavimo*

$$V_0 = \{0\}, \quad V_i = \{v \in V; \pi(x)v \in V_{i-1} \ \forall x \in \mathfrak{g}\}, \quad i \geq 1.$$

- (a) *Za neki $s \leq \dim V$ vrijedi $V_0 \subsetneq V_1 \subsetneq \dots \subsetneq V_s = V$.*
- (b) *Ako su $x_1, \dots, x_s \in \mathfrak{g}$, onda je $\pi(x_1) \dots \pi(x_s) = 0$.*
- (c) *Postoji baza od V u odnosu na koju svaki operator $\pi(x)$, $x \in \mathfrak{g}$, ima striktno gornje trokutastu matricu.*

Dokaz: (a) Prema Engelovom teoremu 2.1.3. vrijedi $V_1 \neq \{0\}$. Ako je $V_1 \neq V$, primjena Engelovog teorema na kvocijentnu reprezentaciju π_{V/V_1} , koja je također nil-reprezentacija, pokazuje da je $V_2 \supsetneq V_1$. Ako je $V_2 \neq V$, promatramo kvocijentnu reprezentaciju π_{V/V_2} . Kako je dimenzija prostora V konačna, nakon $s \leq \dim V$ koraka dobivamo $V_s = V$.

Tvrdnja (b) je neposredna posljedica definicije potprostora V_i i tvrdnje (a).

Napokon, ako je $n_i = \dim V_i$ izaberemo bazu $\{v_1, \dots, v_{n_i}\}$ od V takvu da je

$$V_i = \text{span}\{v_1, \dots, v_{n_i}\}, \quad i = 1, \dots, s.$$

U odnosu na tu bazu svaki operator $\pi(x)$, $x \in \mathfrak{g}$, ima striktno gornje trokutastu matricu; štoviše, te matrice imaju na dijagonali redom nul-blokovne formata $(n_i - n_{i-1}) \times (n_i - n_{i-1})$, $i = 1, \dots, s$.

Budući da su ideali u Liejevoj algebri upravo invarijantni potprostori u odnosu na adjungiranu reprezentaciju, neposredna primjena teorema 2.1.4. daje sljedeći ključni rezultat o strukturi nilpotentnih Liejevih algebri:

Teorem 2.1.5. *Neka je $\mathfrak{g} \neq \{0\}$ nilpotentna Liejeva algebra. Stavimo*

$$\mathfrak{g}_0 = \{0\}, \quad \mathfrak{g}_i = \{x \in \mathfrak{g}; [x, \mathfrak{g}] \subseteq \mathfrak{g}_{i-1}\}, \quad i \geq 1.$$

- (a) *Postoji $s \leq \dim \mathfrak{g}$ takav da je $\mathfrak{g}_0 \subsetneq \mathfrak{g}_1 \subsetneq \cdots \subsetneq \mathfrak{g}_s = \mathfrak{g}$.*
- (b) *$\mathfrak{g}_i$ su ideali u $\mathfrak{g}$.*
- (c) *Za $x_1, \dots, x_s \in \mathfrak{g}$ je $(ad x_1) \cdots (ad x_s) = 0$.*
- (d) *Postoji baza u $\mathfrak{g}$ u odnosu na koju svi operatori $ad x$, $x \in \mathfrak{g}$, imaju striktno gornje trokutastu matricu.*

Uočimo da za proizvoljnu Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ možemo induktivno definirati rastući niz ideala $\mathfrak{g}_i$, $i \in \mathbb{Z}_+$, kao u teoremu 2.1.4.:

$$\mathfrak{g}_0 = \{0\}, \quad \mathfrak{g}_i = \{x \in \mathfrak{g}; [x, \mathfrak{g}] \subseteq \mathfrak{g}_{i-1}\}, \quad i \in \mathbb{N}.$$

Tada je posebno

$$\mathfrak{g}_1 = \{x \in \mathfrak{g}; [x, y] = 0 \ \forall y \in \mathfrak{g}\} = Z(\mathfrak{g})$$

centar Liejeve algebre $\mathfrak{g}$. Nadalje, neka $\pi_i : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}/\mathfrak{g}_{i-1}$ kanonski epimorfizam. Tada je

$$\begin{aligned} \mathfrak{g}_i &= \{x \in \mathfrak{g}; \pi_i([x, y]) = 0 \ \forall y \in \mathfrak{g}\} = \{x \in \mathfrak{g}; [\pi_i(x), \pi_i(y)] = 0 \ \forall y \in \mathfrak{g}\} = \\ &= \{x \in \mathfrak{g}; \pi_i(x) \in Z(\mathfrak{g}/\mathfrak{g}_{i-1})\} = \pi_i^{-1}(Z(\mathfrak{g}/\mathfrak{g}_{i-1})). \end{aligned}$$

Dakle, $\mathfrak{g}_i$ je totalni invers u $\mathfrak{g}$ centra kvocijentne algebre $\mathfrak{g}/\mathfrak{g}_{i-1}$. Zbog toga se ovako definiran rastući niz ideala

$$\{0\} = \mathfrak{g}_0 \subseteq \mathfrak{g}_1 \subseteq \mathfrak{g}_2 \subseteq \cdots$$

zove se **centralni uzlazni niz** u algebri $\mathfrak{g}$. Očito se zbog konačne dimenzije taj niz stabilizira na nekom mjestu. Prema teoremu 2.1.5. za nilpotentnu Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ postoji s takav da je $\mathfrak{g}_s = \mathfrak{g}$. S druge strane, ako pretpostavimo da za Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ postoji s takav da je $\mathfrak{g}_s = \mathfrak{g}$, onda očito vrijedi tvrdnja (c) teorema 2.1.5. i, posebno, $(ad x)^s = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g}$. Zaključujemo da je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ nilpotentna.

Definiramo sada za proizvoljnu Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ tzv. **centralni silazni niz** ideala

$$\mathfrak{g}^0 = \mathfrak{g}, \quad \mathfrak{g}^i = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}^{i-1}] \quad i \geq 1.$$

Tada je očito $\mathfrak{g}^i \subseteq \mathfrak{g}^{i-1}$, dakle, radi se o padajućem nizu ideala. Ako je $\mathfrak{g}$ nilpotentna i $\mathfrak{g}_s = \mathfrak{g}$, onda vrijedi $\mathfrak{g}^i \subseteq \mathfrak{g}_{s-i}$. Doista,

$$\mathfrak{g}^1 = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}_s] \subseteq \mathfrak{g}_{s-1},$$

a iz pretpostavke $\mathfrak{g}^i \subseteq \mathfrak{g}_{s-i}$ za neki i imamo korak indukcije

$$\mathfrak{g}^{i+1} = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}^i] \subseteq [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}_{s-i}] \subseteq \mathfrak{g}_{s-i-1} = \mathfrak{g}_{s-(i+1)}.$$

Posebno, dobivamo da je $\mathfrak{g}^s \subseteq \mathfrak{g}_0 = \{0\}$, dakle, $\mathfrak{g}^s = \{0\}$. Obratno, pretpostavimo da je $\mathfrak{g}^s = \{0\}$ za neki s . Za $x \in \mathfrak{g}$ je $(ad x)\mathfrak{g}^i \subseteq \mathfrak{g}^{i+1}$, pa slijedi $(ad x)^s \mathfrak{g} = (ad x)^s \mathfrak{g}^0 \subseteq \mathfrak{g}^s = \{0\}$. Dakle, $(ad x)^s = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g}$, pa zaključujemo da je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ nilpotentna. Time smo dokazali:

Teorem 2.1.6. *Za Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ sljedeća su tri svojstva međusobno ekvivalentna:*

- (a) *Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je nilpotentna.*
- (b) *Postoji $p \in \mathbb{N}$ takav da je $\mathfrak{g}_p = \mathfrak{g}$.*
- (c) *Postoji $q \in \mathbb{N}$ takav da je $\mathfrak{g}^q = \{0\}$.*

Korolar 2.1.7. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra takva da je kvocijentna Liejeva algebra $\mathfrak{g}/Z(\mathfrak{g})$ nilpotentna. Tada je i Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ nilpotentna.*

Zadatak 2.1.1. *Dokažite korolar 2.1.7.*

Uputa: Koristite karakterizaciju (b) u teoremu 2.1.6. za nilpotentnost Liejeve algebre. Druga je mogućnost, da dokažete da za $x \in \mathfrak{g}$ iz nilpotentnosti operatora $ad_{\mathfrak{g}/Z(\mathfrak{g})}(x + Z(\mathfrak{g}))$ slijedi nilpotentnost operatora $ad_{\mathfrak{g}} x$.

Korolar 2.1.8. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra nad poljem k i neka je K proširenje polja k . Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je nilpotentna ako i samo ako je Liejeva algebra $\mathfrak{g}^K$ nilpotentna.*

Zadatak 2.1.2. *Dokažite korolar 2.1.8.*

Uputa: Koristite iz tvrdnju (a) u zadatku 1.1.14. i karakterizaciju (c) u teoremu 2.1.6. za nilpotentnost Liejeve algebre.

Korolar 2.1.9. *Ako je $\mathfrak{g} \neq \{0\}$ nilpotentna Liejeva algebra, onda je $Z(\mathfrak{g}) \neq \{0\}$.*

Dokaz: U protivnom se centralni uzlazni niz stabilizira na prvom koraku, tj. $\mathfrak{g}_j = \{0\} \ \forall j$, a to je nemoguće po karakterizaciji (b) u teoremu 2.1.6.

Dokažimo još jednu posljedicu Engelovog teorema 2.1.3.:

Korolar 2.1.10. *Neka je $\mathfrak{g}$ nilpotentna Liejeva algebra i neka je $\mathfrak{h}$ maksimalna prava Liejeva podalgebra od $\mathfrak{g}$. Tada je $\mathfrak{h}$ ideal u $\mathfrak{g}$ kodimenzije 1.*

Dokaz: $\mathfrak{g}$ promatramo kao $\mathfrak{h}$ -modul u odnosu na reprezentaciju $x \mapsto ad_{\mathfrak{g}} x$, $x \in \mathfrak{h}$. Kako je $\mathfrak{h}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{g}$, $\mathfrak{h}$ je $\mathfrak{h}$ -podmodul od $\mathfrak{g}$. Promatrajmo kvocijentni $\mathfrak{h}$ -modul $\mathfrak{g}/\mathfrak{h} \neq \{0\}$ i označimo pripadnu kvocijentnu reprezentaciju od $\mathfrak{h}$ sa π :

$$\pi(x)(y + \mathfrak{h}) = [x, y] + \mathfrak{h}, \quad x \in \mathfrak{h}, \quad y \in \mathfrak{g}.$$

Tada je operator $\pi(x)$ nilpotentan za svaki $x \in \mathfrak{h}$, pa po Engelovom teoremu postoji $\eta \in \mathfrak{g}/\mathfrak{h}$ različit od nule takav da je $\pi(x)\eta = 0 \ \forall x \in \mathfrak{h}$. Neka je $y \in \mathfrak{g}$ predstavnik od η u $\mathfrak{g}$, tj. $\eta = y + \mathfrak{h}$. Tada $y \notin \mathfrak{h}$, jer je $\eta \neq 0$. Sada $\pi(x)\eta = 0 \ \forall x \in \mathfrak{h}$ znači da je $[x, y] \in \mathfrak{h}$ za svaki $x \in \mathfrak{h}$. Odatle slijedi da je $\mathfrak{k} = Ky + \mathfrak{h}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{g}$, a kako je po pretpostavci $\mathfrak{h}$ maksimalna prava podalgebra, zaključujemo da je $\mathfrak{k} = \mathfrak{g}$. Dakle, $\dim \mathfrak{h} = \dim \mathfrak{g} - 1$, a iz $[y, \mathfrak{h}] \subseteq \mathfrak{h}$ slijedi da je $\mathfrak{h}$ ideal u $\mathfrak{g}$.

Proučit ćemo sada nilpotentne ideale u proizvoljnoj Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$. U tu svrhu najprije ćemo ustanoviti neka svojstva reprezentacija od $\mathfrak{g}$ i njihovih restrikcija na ideale u $\mathfrak{g}$.

Lema 2.1.11. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra, π ireducibilna reprezentacija od $\mathfrak{g}$ na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru V i $\mathfrak{h}$ ideal u $\mathfrak{g}$. Ako je operator $\pi(y)$ nilpotentan za svaki $y \in \mathfrak{h}$, onda je $\mathfrak{h} \subseteq \text{Ker } \pi$, tj. $\pi(y) = 0 \ \forall y \in \mathfrak{h}$.*

Dokaz: Neka je

$$W = \{v \in V; \pi(y)v = 0 \ \forall y \in \mathfrak{h}\}.$$

Prema Engelovom teoremu 2.1.3. vrijedi $W \neq \{0\}$. Nadalje, prostor W je π -invarijantan. Doista, za $w \in W$, $x \in \mathfrak{g}$ i $y \in \mathfrak{h}$ je $[y, x] \in \mathfrak{h}$ pa je $\pi(y)w = \pi([y, x])w = 0$. Slijedi

$$\pi(y)\pi(x)w = \pi([y, x])w + \pi(x)\pi(y)w = 0.$$

Kako je $y \in \mathfrak{h}$ bio proizvoljan, zaključujemo da je stvarno $\pi(x)w \in W$. Budući da je reprezentacija π ireducibilna, slijedi $W = V$, odnosno, $\pi(y) = 0 \ \forall y \in \mathfrak{h}$.

Za proizvoljnu reprezentaciju π Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru V **kompozicioni niz** je konačan niz π -invarijantnih potprostora $(V_0, V_1, \dots, V_n)$ od V takvih da je

$$\{0\} = V_0 \subseteq V_1 \subseteq \dots \subseteq V_n = V$$

i da su sve subkvocijentne reprezentacije $\pi_{V_i/V_{i-1}}$, $i = 1, \dots, n$ ireducibilne. Očito je da za svaku konačnodimenzionalnu reprezentaciju postoji bar jedan kompozicioni niz.

Za svaku konačnodimenzionalnu reprezentaciju π definiramo simetričnu bilinearnu formu B_π na $\mathfrak{g} \times \mathfrak{g}$ sa

$$B_\pi(x, y) = \text{Tr } \pi(x)\pi(y), \quad x, y \in \mathfrak{g}.$$

B_π se zove **forma pridružena reprezentaciji** π .

Zadatak 2.1.3. Dokažite da vrijedi $B_\pi([x, y], z) = B_\pi(x, [y, z]) \ \forall x, y, z \in \mathfrak{g}$.

Uputa: Iskoristite činjenicu da za operatore A, B na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru vrijedi $\text{Tr } AB = \text{Tr } BA$.

Lema 2.1.12. Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra, $\mathfrak{h}$ ideal u $\mathfrak{g}$, π reprezentacija od $\mathfrak{g}$ na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru V i $(V_0, V_1, \dots, V_n)$ kompozicioni niz u V u odnosu na reprezentaciju π . Slijedeća su dva svojstva međusobno ekvivalentna:

- (a) Za svaki $y \in \mathfrak{h}$ operator $\pi(y)$ je nilpotentan.
- (b) Za svaki $y \in \mathfrak{h}$ i svaki $i \in \{1, \dots, n\}$ vrijedi $\pi(y)V_i \subseteq V_{i-1}$.

U tom slučaju je $B_\pi(x, y) = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g} \ \forall y \in \mathfrak{h}$.

Dokaz: Ako vrijedi (b) onda je očito $\pi(y)^n = 0$, dakle, vrijedi (a).

Pretpostavimo da vrijedi (a). Tada je operator $\pi_{V_i/V_{i-1}}(y)$ nilpotentan za svaki $y \in \mathfrak{h}$ i svaki $i \in \{1, \dots, n\}$. Međutim, subkvocijentne reprezentacije $\pi_{V_i/V_{i-1}}$ su ireducibilne, pa po lemi 2.1.11. imamo $\pi_{V_i/V_{i-1}}(y) = 0 \ \forall y \in \mathfrak{h}$, odnosno, vrijedi (b).

Pretpostavimo sada da su ispunjena svojstva (a) i (b). Za $x \in \mathfrak{g}$ i $y \in \mathfrak{h}$ je $\pi(y)V_i \subseteq V_{i-1}$, dakle, $\pi(x)\pi(y)V_i \subseteq \pi(x)V_{i-1} \subseteq V_{i-1}$. To pokazuje da je operator $\pi(x)\pi(y)$ nilpotentan za svaki $x \in \mathfrak{g}$ i svaki $y \in \mathfrak{h}$. Posebno, $B_\pi(x, y) = \text{Tr } \pi(x)\pi(y) = 0$.

Propozicija 2.1.13. Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra, π reprezentacija od $\mathfrak{g}$ na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru $V \neq \{0\}$ i $(V_0, V_1, \dots, V_n)$ kompozicioni niz u V u odnosu na π .

- (a) U skupu svih ideala $\mathfrak{h}$ u $\mathfrak{g}$, takvih da je operator $\pi(y)$ nilpotentan za svaki $y \in \mathfrak{h}$, postoji najveći element $\mathfrak{n}_\pi$.
- (b) Vrijedi $\mathfrak{n}_\pi = \{y \in \mathfrak{g}; \pi(y)V_i \subseteq V_{i-1} \ \forall i \in \{1, \dots, n\}\}$.
- (c) Vrijedi $B_\pi(x, y) = \text{Tr } \pi(x)\pi(y) = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g} \ \forall y \in \mathfrak{n}_\pi$.

Dokaz: Stavimo

$$\mathfrak{n}_\pi = \{y \in \mathfrak{g}; \pi(y)V_i \subseteq V_{i-1} \ \forall i \in \{1, \dots, n\}\}.$$

Očito je $\mathfrak{n}_\pi$ potprostor od $\mathfrak{g}$. Nadalje, za $x \in \mathfrak{g}$ je $\pi(x)V_i \subseteq V_i$ za svaki i . Dakle, za $x \in \mathfrak{g}$ i $x \in \mathfrak{n}_\pi$ je

$$\pi(x)\pi(y)V_i \subseteq \pi(x)V_{i-1} \subseteq V_{i-1} \quad \text{i} \quad \pi(y)\pi(x)V_i \subseteq \pi(y)V_i \subseteq V_{i-1}.$$

Slijedi

$$\pi([x, y])V_i \subseteq \pi(x)\pi(y)V_i + \pi(y)\pi(x)V_i \subseteq V_{i-1},$$

a kako to vrijedi za svaki $i \in \{1, \dots, n\}$, zaključujemo da je $[x, y] \in \mathfrak{n}_\pi$. To pokazuje da je $\mathfrak{n}_\pi$ ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$. Sada iz leme 2.1.12. slijedi da je operator $\pi(y)$ nilpotentan za svaki $y \in \mathfrak{n}_\pi$. Također, iz iste leme slijedi da $\mathfrak{n}_\pi$ sadrži svaki ideal $\mathfrak{h}$ u $\mathfrak{g}$ sa svojstvom da je operator $\pi(y)$ nilpotentan za svaki $y \in \mathfrak{h}$ i da je $B_\pi(x, y) = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g} \ \text{i} \ \forall y \in \mathfrak{n}_\pi$.

Ideal $\mathfrak{n}_\pi$ iz propozicije 2.1.13. zove se **najveći ideal nilpotencije** reprezentacije π . Uočimo da jednakost (b) vrijedi za svaki kompozicioni niz reprezentacije π . Ideal $\mathfrak{n}_\pi$ sadrži jezgru $\text{Ker } \pi$ reprezentacije π i jednak joj je ako je reprezentacija π potpuno reducibilna, ali ne i općenito. Nadalje, važno je uočiti da se $\mathfrak{n}_\pi$ sastoji od elemenata $y \in \mathfrak{g}$ sa svojstvom da je operator $\pi(y)$ nilpotentan, ali ne moraju svi takvi elementi biti sadržani u $\mathfrak{n}_\pi$. Ideal $\mathfrak{n}_\pi$ je samo najveći ideal sadržan u skupu (koji najčešće nije niti potprostor od $\mathfrak{g}$)

$$\mathcal{N}_\pi = \{y \in \mathfrak{g}; \text{operator } \pi(y) \text{ je nilpotentan}\}.$$

Zadatak 2.1.4. Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra i $\mathfrak{h}$ ideal u $\mathfrak{g}$. Dokažite da je ideal $\mathfrak{h}$ je nilpotentna Liejeva algebra ako i samo ako je operator $\text{ad}_\mathfrak{g} y$ nilpotentan za svaki $y \in \mathfrak{h}$.

Uputa: Uočite da za svaki $y \in \mathfrak{h}$ vrijedi $\text{ad}_\mathfrak{h} y = (\text{ad}_\mathfrak{g} y)|_\mathfrak{h}$ i $(\text{ad}_\mathfrak{g} y)\mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{h}$.

Zbog tvrdnje u prethodnom zadatku primjena propozicije 2.1.13. na adjungiranu reprezentaciju $\text{ad}_\mathfrak{g}$ Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ ima za posljedicu:

Propozicija 2.1.14. Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra i neka je $(\mathfrak{g}_0, \mathfrak{g}_1, \dots, \mathfrak{g}_n)$ bilo koji kompozicioni niz prostora $\mathfrak{g}$ u odnosu na adjungiranu reprezentaciju $\text{ad}_\mathfrak{g}$.

(a) U skupu svih nilpotentnih ideala u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$ postoji najveći element $\mathfrak{n}$.

(b) Vrijedi $\mathfrak{n} = \{y \in \mathfrak{g}; [y, \mathfrak{g}_i] \subseteq \mathfrak{g}_{i-1} \text{ za } i = 1, \dots, n\}$.

(c) Vrijedi $B_{\text{ad}_\mathfrak{g}}(x, y) = \text{Tr}(\text{ad}_\mathfrak{g} x)(\text{ad}_\mathfrak{g} y) = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g} \ \text{i} \ \forall y \in \mathfrak{n}$.

Ideal $\mathfrak{n}$ iz propozicije 2.1.14. zove se **najveći nilpotentni ideal** u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$. Katkada se u literaturi taj ideal zove nilradikal od $\mathfrak{g}$, no uobičajenije je da se nilradikalom od $\mathfrak{g}$ zove presjek $\mathfrak{s}$ jezgara svih ireducibilnih konačnodimenzijskih reprezentacija od $\mathfrak{g}$. Taj ideal $\mathfrak{s}$ je nilpotentan, kao takav je sadržan u $\mathfrak{n}$, a sadržan je i u najvećem idealu nilpotencije svake konačnodimenzijske reprezentacije od $\mathfrak{g}$.

Zadatak 2.1.5. Pronađite primjer Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ s najvećim nilpotentnim idealom $\mathfrak{n}$ takve da u kvocijentnoj Liejevoj algebri $\mathfrak{g}/\mathfrak{n}$ postoje nilpotentni ideali različiti od $\{0\}$.

Forma $B_{\text{ad}_\mathfrak{g}}$ na $\mathfrak{g} \times \mathfrak{g}$ pridružena adjungiranoj reprezentaciji $\text{ad}_\mathfrak{g}$ obično se označava sa $B_\mathfrak{g}$. Ona se zove **Killingova forma** Liejeve algebre $\mathfrak{g}$.

Propozicija 2.1.15. Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra i $\mathfrak{n}$ njen najveći nilpotentni ideal. Za svaki automorfizam $\varphi \in \text{Aut}(\mathfrak{g})$ vrijedi $\varphi(\mathfrak{n}) = \mathfrak{n}$.

Zadatak 2.1.6. Dokažite propoziciju 2.1.15.

Uputa: Dokažite da je $\varphi(\mathfrak{n})$ nilpotentni ideal u $\mathfrak{g}$.

2.2 Rješive Liejeve algebre. Radikal

Za Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ ideal $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ zove se **izvedeni ideal**. To je prvi netrivialni član centralnog silaznog niza definiranog u odjeljku 2.1. Definiramo sada još jedan silazni niz ideala: to je tzv. **izvedeni niz** $(\mathfrak{g}^{(k)})_{k \in \mathbb{Z}_+}$ u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$ definiran induktivno sa

$$\mathfrak{g}^{(0)} = \mathfrak{g}, \quad \mathfrak{g}^{(k+1)} = [\mathfrak{g}^{(k)}, \mathfrak{g}^{(k)}], \quad k \in \mathbb{Z}_+.$$

$\mathfrak{g}^{(k)}$ se zove k -**ti izvedeni ideal** Liejeve algebre $\mathfrak{g}$. Kažemo da je $\mathfrak{g}$ **rješiva Liejeva algebra** ako postoji $k \in \mathbb{Z}_+$ takav da je $\mathfrak{g}^{(k)} = \{0\}$. Naravno, za svaki $k \in \mathbb{Z}_+$ je $\mathfrak{g}^{(k)} \subseteq \mathfrak{g}^k$, pa prema karakterizaciji (c) u teoremu 2.1.6. vidimo da je svaka nilpotentna Liejeva rješiva.

Zadatak 2.2.1. *Dokažite da je Liejeva algebra $\mathfrak{t}(n, K)$ rješiva i da je Liejeva algebra $\mathfrak{n}(n, K)$ nilpotentna.*

Zadatak 2.2.2. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra nad poljem k i neka je K proširenje polja k . Dokažite da je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ rješiva ako i samo je Liejeva algebra $\mathfrak{g}^K$ rješiva.*

Uputa: Koristite tvrdnju (a) zadatka 1.1.14.

Teorem 2.2.1. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra, $\mathfrak{h}$ njena podalgebra i $\mathfrak{a}$ i $\mathfrak{b}$ ideali u $\mathfrak{g}$.*

- (a) *Ako je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ rješiva, onda su i Liejeve algebre $\mathfrak{h}$ i $\mathfrak{g}/\mathfrak{a}$ rješive.*
- (b) *Ako su Liejeve algebre $\mathfrak{a}$ i $\mathfrak{g}/\mathfrak{a}$ rješive, onda je i Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ rješiva.*
- (c) *Ako su ideali $\mathfrak{a}$ i $\mathfrak{b}$ rješivi, onda je i ideal $\mathfrak{a} + \mathfrak{b}$ rješiv.*

Dokaz: (a) Očito je $\mathfrak{h}^{(k)} \subseteq \mathfrak{g}^{(k)}$, pa iz rješivosti $\mathfrak{g}$ slijedi rješivost $\mathfrak{h}$. Nadalje, neka je $\varphi : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}/\mathfrak{a}$ kvocijentni epimorfizam, $\varphi(x) = x + \mathfrak{a}$, $x \in \mathfrak{g}$. Indukcijom lako slijedi da je tada $(\mathfrak{g}/\mathfrak{a})^{(k)} = \varphi(\mathfrak{g}^{(k)})$ $\forall k \geq 0$, pa ponovo iz rješivosti $\mathfrak{g}$ slijedi rješivost $\mathfrak{g}/\mathfrak{a}$.

(b) Pretpostavimo da su $m, n \geq 0$ takvi da je $(\mathfrak{g}/\mathfrak{a})^{(n)} = \{0\}$ i $\mathfrak{a}^{(m)} = \{0\}$. Uz oznaku $\varphi : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}/\mathfrak{a}$ kao u (a) imamo tada $\varphi(\mathfrak{g}^{(n)}) = (\mathfrak{g}/\mathfrak{a})^{(n)} = \{0\}$. Dakle, $\mathfrak{g}^{(n)} \subseteq \text{Ker } \varphi = \mathfrak{a}$. Kako je očito $(\mathfrak{g}^{(j)})^{(k)} = \mathfrak{g}^{(j+k)} \quad \forall j, k \geq 0$, slijedi

$$\mathfrak{g}^{(n+m)} = (\mathfrak{g}^{(n)})^{(m)} \subseteq \mathfrak{a}^{(m)} = \{0\};$$

Dakle, Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je rješiva.

(c) Standardni algebarski teorem (analogan teoremu 1.2.2.) daje izomorfizam $x + \mathfrak{a} \mapsto x + \mathfrak{a} \cap \mathfrak{b}$, $x \in \mathfrak{b}$, Liejeve algebre $(\mathfrak{a} + \mathfrak{b})/\mathfrak{a}$ na Liejevu algebru $\mathfrak{b}/(\mathfrak{a} \cap \mathfrak{b})$. Kako je Liejeva algebra $\mathfrak{b}$ po pretpostavci rješiva, iz (a) slijedi da je i kvocijentna algebra $\mathfrak{b}/(\mathfrak{a} \cap \mathfrak{b})$ rješiva. Dakle i $(\mathfrak{a} + \mathfrak{b})/\mathfrak{a}$ je rješiva Liejeva algebra, a kako je i Liejeva algebra $\mathfrak{a}$ rješiva, iz (b) zaključujemo da je $\mathfrak{a} + \mathfrak{b}$ rješiva Liejeva algebra.

Pomoću tvrdnje (c) teorema 2.2.1. zaključujemo da u svakoj Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$ postoji najveći rješivi ideal, tj. rješivi ideal koji sadrži svaki drugi rješivi ideal u $\mathfrak{g}$. Taj ideal označavat ćemo sa $\text{Rad}(\mathfrak{g})$ i zvat ćemo **radikal Liejeve algebre** $\mathfrak{g}$.

Teorem 2.2.2. *Za svaku Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ vrijedi $\text{Rad}(\mathfrak{g}/\text{Rad}(\mathfrak{g})) = \{0\}$.*

Dokaz: Neka je $\varphi : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}/\text{Rad}(\mathfrak{g})$ kvocijentni epimorfizam i neka je $\mathfrak{a} = \varphi^{-1}(\text{Rad}(\mathfrak{g}/\text{Rad}(\mathfrak{g})))$. To je ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$. Tada je $\mathfrak{a}/\text{Rad}(\mathfrak{g}) = \varphi(\mathfrak{a}) = \text{Rad}(\mathfrak{g}/\text{Rad}(\mathfrak{g}))$ rješiva Liejeva algebra, a također je $\text{Rad}(\mathfrak{g})$ rješiva Liejeva algebra. Prema tvrdnji (c) propozicije 1.2.1. ideal $\mathfrak{a}$ je rješiva Liejeva algebra. No tada po definiciji radikala vrijedi $\mathfrak{a} \subseteq \text{Rad}(\mathfrak{g})$. Kako je $\text{Rad}(\mathfrak{g}) = \text{Ker } \varphi$, zaključujemo da je $\text{Rad}(\mathfrak{g}/\text{Rad}(\mathfrak{g})) = \varphi(\mathfrak{a}) = \{0\}$.

Ukoliko je polje K algebarski zatvoreno Engelov teorem 2.1.3. generalizira se na rješive Liejeve algebre operatora:

Teorem 2.2.3. (Sophus Lie) *Neka je $V \neq \{0\}$ konačnodimenzionalan vektorski prostor nad algebarski zatvorenim poljem karakteristike 0 i neka je $\mathfrak{g}$ rješiva podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{gl}(V)$. Tada postoji vektor $v \in V$, $v \neq 0$, koji je svojstven za svaki operator $x \in \mathfrak{g}$.*

Dokaz ćemo provesti indukcijom u odnosu na $\dim \mathfrak{g}$. Baza indukcije $\dim \mathfrak{g} = 0$ je trivijalna. Pretpostavimo sada da je $\dim \mathfrak{g} \geq 1$ i da je teorem dokazan za sve konačnodimenzionalne vektorske prostore W i sve rješive Liejeve podalgebre od $\mathfrak{gl}(W)$ čija je dimenzija manja od $\dim \mathfrak{g}$. Dokaz ćemo provesti u nekoliko koraka.

(1) Budući da je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ rješiva, vrijedi $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \neq \mathfrak{g}$. Neka je $\mathfrak{h}$ potprostor od $\mathfrak{g}$ kodimenzije 1 koji sadrži $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$. Tada je $[\mathfrak{g}, \mathfrak{h}] \subseteq [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \subseteq \mathfrak{h}$, dakle, $\mathfrak{h}$ je ideal. Kako je $\dim \mathfrak{h} = \dim \mathfrak{g} - 1 < \dim \mathfrak{g}$, po pretpostavci indukcije postoji $v \in V$, $v \neq 0$, koji je svojstven vektor svih operatora $y \in \mathfrak{h}$. Za $y \in \mathfrak{h}$ označimo sa $\lambda(y) \in K$ pripadnu svojstvenu vrijednost:

$$yv = \lambda(y)v, \quad y \in \mathfrak{h}.$$

Očito je $\lambda : \mathfrak{h} \rightarrow K$ linearan funkcional. Stavimo sada

$$W = \{w \in V; yw = \lambda(y)w \ \forall y \in \mathfrak{h}\}.$$

Tada je $W \neq \{0\}$ potprostor od V .

(2) Dokažimo sada da je potprostor W invarijantan s obzirom na sve operatore $x \in \mathfrak{g}$. Neka je $x \in \mathfrak{g}$ i $0 \neq w \in W$. Neka je n najmanji prirodan broj takav da su vektori $w, xw, \dots, x^n w$ linearno zavisni. To naravno znači da su vektori $w, xw, \dots, x^{n-1}w$ linearno nezavisni. Definiramo potprostore

$$W_0 = \{0\}, \quad W_j = \text{span}_K \{w, xw, \dots, x^{j-1}w\}, \quad j \in \mathbb{N}.$$

Tada očito vrijedi

$$\dim W_j = j \quad \text{za} \quad 0 \leq j \leq n \quad \text{i} \quad xW_{j-1} \subseteq W_j \quad \forall j \in \mathbb{N}.$$

Nadalje, kako je $x^n w$ linearna kombinacija vektora $w, xw, \dots, x^{n-1}w$, lako se vidi da je $W_m = W_n$ $\forall m \geq n$. Posebno, potprostor W_n je invarijantan s obzirom na operator x .

Dokazat ćemo sada da vrijedi

$$yx^j w - \lambda(y)x^j w \in W_j \quad \forall y \in \mathfrak{h} \quad \text{i} \quad \forall j \in \mathbb{Z}_+. \quad (2.1)$$

Dokaz provodimo indukcijom u odnosu na $j \in \mathbb{Z}_+$. Prije svega, za $j = 0$ po definiciji potprostora W imamo $yw = \lambda(y)w$, dakle, $yw - \lambda(y)w = 0 \in W_0$, odnosno, baza indukcije je dokazana. Provedimo sada korak indukcije. Neka je $j \geq 1$ i pretpostavimo da je dokazano da vrijedi

$$yx^{j-1}w - \lambda(y)x^{j-1}w \in W_{j-1} \quad \forall y \in \mathfrak{h}.$$

Fiksirajmo sada bilo koji $y \in \mathfrak{h}$. Tada je i $[y, x] \in \mathfrak{h}$, pa imamo

$$yx^{j-1}w = \lambda(y)x^{j-1}w + u \quad \text{i} \quad [y, x]x^{j-1}w = \lambda([y, x])x^{j-1}w + v \quad \text{za neke } u, v \in W_{j-1}.$$

Odatle je

$$yx^jw = yxx^{j-1}w = xyx^{j-1}w + [y, x]x^{j-1}w = \lambda(y)x^jw + xu + \lambda([y, x])x^{j-1}w + v,$$

dakle,

$$yx^jw - \lambda(y)x^jw = xu + \lambda([y, x])x^{j-1}w + v \in W_j,$$

budući da je $W_{j-1} \subseteq W_j$ i $xW_{j-1} \subseteq W_j$. Time je korak indukcije proveden i (2.1) je dokazano.

Iz (2.1) slijedi da je svaki od potprostora W_j invarijantan s obzirom na svaki operator $y \in \mathfrak{h}$. Nadalje, (2.1) pokazuje da za $y \in \mathfrak{h}$ restrikcija $y|_{W_n}$ ima u bazi $\{w, x(w), \dots, x^{n-1}(w)\}$ gornje trokutastu matricu u kojoj su svi dijagonalni elementi jednaki $\lambda(y)$. Prema tome je

$$\text{Tr } (y|_{W_n}) = n\lambda(y) \quad \forall y \in \mathfrak{h}.$$

Posebno, vrijedi

$$\text{Tr } ([x, y]|_{W_n}) = n\lambda([x, y]) \quad \forall y \in \mathfrak{h}.$$

Međutim, potprostor W_n je invarijantan s obzirom na x i s obzirom na svaki $y \in \mathfrak{h}$; stoga je $[x, y]|_{W_n} = [x|_{W_n}, y|_{W_n}]$, pa slijedi da je gornji trag jednak nuli. Budući da je po pretpostavci K polje karakteristike 0, slijedi $\lambda([x, y]) = 0 \quad \forall y \in \mathfrak{h}$. Stoga imamo

$$yxw = xyw - [x, y]w = x(\lambda(y)w) - \lambda([x, y])w = \lambda(y)xw \quad \implies \quad xw \in W.$$

Kako su $w \in W$ i $x \in \mathfrak{g}$ bili proizvoljno odabrani, zaključujemo da je potprostor W invarijantan s obzirom na svaki operator $x \in \mathfrak{g}$.

(3) Za $z \in \mathfrak{g} \setminus \mathfrak{h}$ je $\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \dot{+} Kz$. Budući da je potprostor $W \neq \{0\}$ invarijatan s obzirom na operator z , postoje $v \in W$, $v \neq 0$, i $\alpha \in K$ takvi da je $zv = \alpha v$. Sada za bilo koji $x \in \mathfrak{g}$ imamo $x = y + \beta z$ za neke $y \in \mathfrak{h}$ i $\beta \in K$ pa slijedi

$$xv = yv + \beta zv = \lambda(y)v + \beta \alpha v = (\lambda(y) + \beta \alpha)v.$$

Dakle, vektor v je svojstven za sve operatore $x \in \mathfrak{g}$. Time je teorem 2.2.3. u potpunosti dokazan.

Zastava u konačnodimenzijskom vektorskom prostoru V je konačan rastući niz potprostora

$$\{0\} = V_0 \subseteq V_1 \subseteq \dots \subseteq V_n = V$$

takav da je $\dim V_j = j$ za svaki j .

Teorem 2.2.4. *Neka je V konačnodimenzijski vektorski prostor nad algebarski zatvorenim poljem K karakteristike 0 i neka je $\mathfrak{g}$ neka rješiva Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$. Tada $\mathfrak{g}$ stabilizira neku zastavu u prostoru V . Drugim riječima, postoji baza prostora V u kojoj svi operatori $x \in \mathfrak{g}$ imaju gornje trokutaste matrice.*

Dokaz: Ovaj teorem slijedi neposredno iz teorema 2.2.3. indukcijom po $\dim V$. U koraku indukcije, uz oznake iz dokaza prethodnog teorema, s vektorskog prostora V prelazimo na kvocijentni prostor V/Kv . Kako je $\dim(V/Kv) = \dim V - 1 < \dim V$, po pretpostavci indukcije postoji zastava $(W_0, W_1, \dots, W_{n-1})$ u prostoru V/Kv ($W_0 = \{0\}$, $W_{n-1} = V/Kv$) koju stabiliziraju svi operatori koje na kvocijentu V/Kv induciraju operatori $x \in \mathfrak{g}$. Neka je $\pi : V \rightarrow V/Kv$ kvocijentno preslikavanje. Stavimo $V_0 = \{0\}$ i $V_j = \pi^{-1}(W_{j-1})$ za $j = 1, \dots, n$. Tada se lako vidi da $\mathfrak{g}$ stabilizira zastavu $(V_0, V_1, \dots, V_n)$ u prostoru V .

Korolar 2.2.5. *Neka je $\mathfrak{g}$ rješiva Liejeva algebra nad algebarski zatvorenim poljem K karakteristike 0 i neka je π njena reprezentacija na konačnodimenzijskom vektorskom prostoru V . Tada u V postoji zastava invarijantna s obzirom na sve operatore $\pi(x)$, $x \in \mathfrak{g}$.*

Dokaz: Treba samo primijetiti da je Liejeva podalgebra $\text{Im } \pi = \pi(\mathfrak{g})$ od $\mathfrak{gl}(V)$ izomorfna kvocijentnoj Liejevoj algebri $\mathfrak{g}/(\text{Ker } \pi)$, a ova je prema tvrdnji (a) propozicije 1.2.1. rješiva.

Potprostor Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ koji je invarijantan s obzirom na sve operatore $\text{ad } x$, $x \in \mathfrak{g}$, je ideal u $\mathfrak{g}$. Dakle, iz korolara 2.2.5. primijenjenog na reprezentaciju ad neposredno slijedi

Korolar 2.2.6. *Neka je $\mathfrak{g}$ konačnodimenzionalna rješiva Liejeva algebra nad algebarski zatvorenim poljem karakteristike 0. Tada u $\mathfrak{g}$ postoje ideali $\mathfrak{j}_k$, $k = 0, 1, \dots, n = \dim \mathfrak{g}$, takvi da je*

$$\{0\} = \mathfrak{j}_0 \subseteq \mathfrak{j}_1 \subseteq \dots \subseteq \mathfrak{j}_n = \mathfrak{g} \quad \text{ i } \quad \dim \mathfrak{j}_k = k \quad \forall k.$$

Teorem 2.2.7. *Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je rješiva ako i samo ako je njen izvedeni ideal $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ nilpotentna Liejeva algebra. U tom slučaju za svaki $x \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ operator $\text{ad } x$ je nilpotentan.*

Dokaz: Prema korolaru 2.1.8. i prema zadatku 2.2.2. možemo pretpostaviti da je polje K algebarski zatvoreno. Pretpostavimo najprije da je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ rješiva i izaberimo zastavu ideala $(\mathfrak{j}_0, \mathfrak{j}_1, \dots, \mathfrak{j}_n)$ kao u tvrdnji korolara 2.2.6. Uzmimo sada $x_k \in \mathfrak{j}_k \setminus \mathfrak{j}_{k-1}$ za $k = 1, \dots, n$. Tada je $\{x_1, \dots, x_n\}$ baza od $\mathfrak{g}$. Matrice operatora $\text{ad } x$, $x \in \mathfrak{g}$, pripadaju Liejevoj algebri $\mathfrak{t}(n, K)$. Slijedi da matrice operatora $\text{ad } y$, $y \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$, pripadaju Liejevoj algebri $[\mathfrak{t}(n, K), \mathfrak{t}(n, K)] = \mathfrak{n}(n, K)$. To pokazuje da je $\text{ad } y = \text{ad}_{\mathfrak{g}} y$ nilpotentan operator za svaki $y \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$. Prema zadatku 2.1.4. slijedi da je izvedeni ideal $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ nilpotentna Liejeva algebra.

Obratno, pretpostavimo sada da je $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ nilpotentna Liejeva algebra. Tada je ujedno ideal $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ rješiva Liejeva algebra. Nadalje, kvocijentna Liejeva algebra $\mathfrak{g}/[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ je komutativna, dakle, također rješiva. Sada iz tvrdnje (b) teorema 2.2.1. slijedi da je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ rješiva.

Svaki od sljedeća dva teorema zove se **Cartanov kriterij rješivosti**.

Teorem 2.2.8. *Neka je V konačnodimenzionalan vektorski prostor nad poljem karakteristike 0 i neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$ takva da vrijedi*

$$\text{Tr } xy = 0 \quad \forall x \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \quad \text{ i } \quad \forall y \in \mathfrak{g}.$$

Tada je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ rješiva.

Dokaz: Pretpostavljamo najprije da je polje algebarski zatvoreno. Primijenit ćemo lemu 1.3.13. na prostor V i na sljedeće potprostore X i Y od $\mathfrak{gl}(V)$:

$$X = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}], \quad Y = \mathfrak{g}.$$

Tada uz oznaku iz leme 1.3.13. imamo

$$\mathfrak{a} = \{x \in \mathfrak{gl}(V); [x, \mathfrak{g}] \subseteq [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]\}.$$

Očito je $\mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{a}$. Pretpostavka je da je $\text{Tr } xy = 0 \quad \forall x \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ i $\forall y \in \mathfrak{g}$. Želimo ustanoviti da je svaki operator $x \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ nilpotentan. Ta će činjenica slijediti iz leme 1.3.13. ako dokažemo da je $\text{Tr } xy = 0 \quad \forall x \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ i $\forall y \in \mathfrak{a}$ a ne samo da je $\text{Tr } xy = 0 \quad \forall x \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ i $\forall y \in \mathfrak{g}$.

Svaki $x \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ je suma elemenata oblika $[x_1, x_2]$, gdje su $x_1, x_2 \in \mathfrak{g}$. S druge strane, za $y \in \mathfrak{a}$ imamo

$$\text{Tr } [x_1, x_2]y = \text{Tr } x_1[x_2, y] = \text{Tr } [x_2, y]x_1,$$

a to je jednako nuli jer po definiciji od $\mathfrak{a}$ je $[x_2, y] \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$. Time je dokazano da je svaki $x \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ nilpotentan. Sada iz teorema 1.2.6. slijedi da je Liejeva algebra $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ nilpotentna. Dakle, prema teoremu 2.2.7. Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je rješiva.

Neka je sada V vektorski prostor nad proizvoljnim poljem k karakteristike 0 i neka je $K \supseteq k$ njegovo algebarski zatvoreno proširenje. Promatramo prostor V^K , Liejevu podalgebru $\mathfrak{g}^K$ od $\mathfrak{gl}(V^K)$ i K -bilinearnu formu $\Phi : [\mathfrak{g}^K, \mathfrak{g}^K] \times \mathfrak{g}^K \rightarrow K$ definiranu sa

$$\Phi(x, y) = \text{Tr } xy, \quad x \in [\mathfrak{g}^K, \mathfrak{g}^K], \quad y \in \mathfrak{g}^K.$$

Po pretpostavci je $\Phi[[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \times \mathfrak{g}] = 0$. Prema tvrdnji (a) zadatka 1.1.14. je $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]^K = [\mathfrak{g}^K, \mathfrak{g}^K]$, pa iz K -bilinearnosti forme Φ slijedi da je $\Phi = 0$. Prema dokazanom je tada Liejeva algebra $\mathfrak{g}^K$ rješiva, pa je po zadatku 2.2.2. i Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ rješiva.

U odjeljku 2.1. definirali smo **Killingovu formu** Liejeve algebre $\mathfrak{g}$: to je simetrična bilinearna forma $B_{\mathfrak{g}} : \mathfrak{g} \times \mathfrak{g} \rightarrow K$ dana sa

$$B_{\mathfrak{g}}(x, y) = \text{Tr } (ad x)(ad y), \quad x, y \in \mathfrak{g}.$$

Teorem 2.2.9. *Konačnodimenzionalna Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ nad poljem karakteristike 0 je rješiva ako i samo ako je*

$$B_{\mathfrak{g}}(x, y) = 0 \quad \forall x \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \quad i \quad \forall y \in \mathfrak{g}.$$

Dokaz: Primijenimo li teorem 2.2.8. na Liejevu podalgebru $ad \mathfrak{g}$ Liejeve algebre $\mathfrak{gl}(\mathfrak{g})$, zaključujemo da je Liejeva algebra $ad \mathfrak{g}$ rješiva. Međutim, kako je $\text{Ker } ad = Z(\mathfrak{g})$, Liejeva algebra $ad \mathfrak{g}$ izomorfna je kvocijentnoj Liejevoj algebri $\mathfrak{g}/Z(\mathfrak{g})$, dakle, ta je kvocijentna Liejeva algebra rješiva. Budući da je Liejeva algebra $Z(\mathfrak{g})$ komutativna, ona je i rješiva, pa po tvrdnji (b) teorema 2.2.1. slijedi da je i Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ rješiva.

2.3 Proste i poluproste Liejeve algebre

Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je **poluprosta** ako je njen radikal $Rad(\mathfrak{g}) = \{0\}$. To znači da je su poluproste Liejeve algebre one koje ne sadrže rješive ideale različite od $\{0\}$. Primijetimo da je prema teoremu 2.2.2. za svaku Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ kvocijentna algebra $\mathfrak{g}/Rad(\mathfrak{g})$ poluprosta.

Propozicija 2.3.1. *Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je poluprosta ako i samo ako ona ne sadrži nijedan komutativni ideal različit od $\{0\}$.*

Dokaz: Budući da su komutativni ideali ujedno rješivi ideali, jedan smjer je jasan: poluprosta Liejeva algebra ne sadrži nijedan komutativni ideal različit od $\{0\}$. Pretpostavimo sada da Liejeva algebra $\mathfrak{g} \neq \{0\}$ zadovoljava taj uvjet, tj. da ne sadrži nijedan komutativni ideal različit od $\{0\}$. Pretpostavimo da $\mathfrak{g}$ nije poluprosta. Tada ona sadrži rješivi ideal $\mathfrak{a} \neq \{0\}$. Neka je $k \in \mathbb{N}$ takav da je $\mathfrak{a}^{(k-1)} \neq \{0\}$ i $\mathfrak{a}^{(k)} = \{0\}$. Kako je $[\mathfrak{a}^{(k-1)}, \mathfrak{a}^{(k-1)}] = \mathfrak{a}^{(k)} = \{0\}$, ideal $\mathfrak{a}^{(k-1)} \neq \{0\}$ je komutativan suprotno pretpostavci. Ova kontradikcija pokazuje da je pretpostavka da $\mathfrak{g}$ nije poluprosta pogrešna. Time je i drugi smjer dokazan.

Liejevu algebra $\mathfrak{g}$ je **prosta** ako ona nije komutativna i ne sadrži nijedan netrivialni ideal. Zahtjev nekomutativnosti znači da isključujemo slučajeve $\mathfrak{g} = \{0\}$ i $\dim \mathfrak{g} = 1$. Naravno, svaka je prosta Liejeva algebra poluprosta.

Važna karakterizacija poluprostote Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ dobiva se pomoću njene Killingove forme $B_{\mathfrak{g}}$. U tu svrhu dokažimo najprije osnovna svojstva Killingove forme:

Propozicija 2.3.2. *Za svaku Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ vrijedi:*

- (a) $B_{\mathfrak{g}}(\varphi(x), \varphi(y)) = B_{\mathfrak{g}}(x, y) \quad \forall x, y \in \mathfrak{g} \text{ i } \forall \varphi \in Aut(\mathfrak{g})$.
- (b) $B_{\mathfrak{g}}(Dx, y) + B_{\mathfrak{g}}(x, Dy) = 0 \quad \forall x, y \in \mathfrak{g} \text{ i } \forall D \in Der(\mathfrak{g})$.
- (c) $B_{\mathfrak{g}}([x, y], z) = B_{\mathfrak{g}}(x, [y, z]) \quad \forall x, y, z \in \mathfrak{g}$.
- (d) *Ako je $\mathfrak{a}$ ideal u $\mathfrak{g}$ onda je $B_{\mathfrak{a}} = B_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{a} \times \mathfrak{a}}$.*

Dokaz: (a) Za $\varphi \in Aut(\mathfrak{g})$ i $x, y \in \mathfrak{g}$ vrijedi

$$(ad \varphi(x))y = [\varphi(x), y] = \varphi([x, \varphi^{-1}y]) = (\varphi \circ (ad x) \circ \varphi^{-1})y.$$

Dakle, vrijedi $ad \varphi(x) = \varphi \circ (ad x) \circ \varphi^{-1}$, pa imamo

$$B_{\mathfrak{g}}(\varphi(x), \varphi(y)) = \text{Tr}(ad \varphi(x)(ad \varphi(y))) = \text{Tr}(\varphi \circ (ad x)(ad y) \circ \varphi^{-1}) = \text{Tr}(ad x)(ad y) = B_{\mathfrak{g}}(x, y).$$

(b) U dokazu propozicije 2.1.3. vidjeli smo da za derivaciju $D \in Der(\mathfrak{g})$ vrijedi $ad Dx = [D, ad x]$ za svaki $x \in \mathfrak{g}$. Stoga za proizvoljne $x, y \in \mathfrak{g}$ imamo redom

$$\begin{aligned} B_{\mathfrak{g}}(Dx, y) + B_{\mathfrak{g}}(x, Dy) &= \text{Tr}(ad Dx)(ad y) + \text{Tr}(ad x)(ad Dy) = \\ &= \text{Tr}[D, ad x](ad y) + \text{Tr}(ad x)[D, ad y] = \\ &= \text{Tr} D(ad x)(ad y) - \text{Tr}(ad x)D(ad y) + \text{Tr}(ad x)D(ad y) - \text{Tr}(ad x)(ad y)D = 0, \end{aligned}$$

jer za linearne operatore A, B, C je $\text{Tr} ABC = \text{Tr} BCA$.

Tvrđnja (c) slijedi neposrednom primjenom tvrdnje (b) na unutarnju derivaciju $D = ad y$.

(d) Uočimo sljedeću činjenicu iz linearne algebre: ako je W potprostor konačnodimenzionalnog vektorskog prostora V i ako je $A : V \rightarrow V$ linearan operator čija je slika sadržana u W onda je $\text{Tr } A = \text{Tr } (A|_W)$. Doista, da to dokažemo dovoljno je izabrati bazu $\{e_1, \dots, e_k\}$ od W i dopuniti je do baze $\{e_1, \dots, e_k, e_{k+1}, \dots, e_n\}$ od V . U toj bazi matrica operatora A ima matricu u kojoj je donjih $n - k$ redaka nula, a u gornjem lijevom kvadratu formata $k \times k$ je upravo matrica restrikcije $A|_W$ u bazi $\{e_1, \dots, e_k\}$. Primijenimo sada tu činjenicu na situaciju $V = \mathfrak{g}$, $W = \mathfrak{a}$ i $A = (ad_{\mathfrak{g}} x)(ad_{\mathfrak{g}} y)$, gdje su x, y proizvoljni elementi ideala $\mathfrak{a}$. Kako je očito $(ad_{\mathfrak{g}} x)|_{\mathfrak{a}} = ad_{\mathfrak{a}} x$, $(ad_{\mathfrak{g}} y)|_{\mathfrak{a}} = ad_{\mathfrak{a}} y$ i $(ad_{\mathfrak{g}} x)(ad_{\mathfrak{g}} y)|_{\mathfrak{a}} = ((ad_{\mathfrak{g}} x)|_{\mathfrak{a}})((ad_{\mathfrak{g}} y)|_{\mathfrak{a}})$, dobivamo

$$B_{\mathfrak{g}}(x, y) = \text{Tr } (ad_{\mathfrak{g}} x)(ad_{\mathfrak{g}} y) = \text{Tr } (ad_{\mathfrak{a}} x)(ad_{\mathfrak{a}} y) = B_{\mathfrak{a}}(x, y).$$

Najavljena karakterizacija poluprostote je:

Teorem 2.3.3. *Liejeva algebra $\mathfrak{g} \neq \{0\}$ je poluprosta ako i samo ako je njena Killingova forma $B_{\mathfrak{g}}$ nedegenerirana, tj. vrijedi implikacija*

$$B_{\mathfrak{g}}(x, y) = 0 \quad \forall y \in \mathfrak{g} \quad \implies \quad x = 0.$$

Dokaz: Pretpostavimo da je $\mathfrak{g} \neq \{0\}$ poluprosta Liejeva algebra. Stavimo

$$\mathfrak{r} = \{x \in \mathfrak{g}; B_{\mathfrak{g}}(x, y) = 0 \quad \forall y \in \mathfrak{g}\}. \quad (2.2)$$

Treba dokazati da je $\mathfrak{r} = \{0\}$. $\mathfrak{r}$ je očito potprostor od $\mathfrak{g}$. Nadalje, iz tvrdnje (c) propozicije 2.3.2. slijedi da je $\mathfrak{r}$ ideal u $\mathfrak{g}$. Doista, ako su $x \in \mathfrak{r}$ i $y \in \mathfrak{g}$, onda za svaki $z \in \mathfrak{g}$ vrijedi

$$B_{\mathfrak{g}}([x, y], z) = B_{\mathfrak{g}}(x, [y, z]) = 0,$$

dakle, $[x, y] \in \mathfrak{r}$. Po definiciji $\mathfrak{r}$ je $B_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{r} \times \mathfrak{g}} = 0$, dakle i $B_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{r} \times \mathfrak{r}} = 0$, a to prema tvrdnji (d) propozicije 2.3.2. znači da je $B_{\mathfrak{r}} = 0$. No tada iz Cartanovog kriterija rješivosti (teorem 2.2.9.) slijedi da je ideal $\mathfrak{r}$ rješiv. Dakle, $\mathfrak{r} \subseteq \text{Rad}(\mathfrak{g})$. Ali Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je po pretpostavci poluprosta, tj. $\text{Rad}(\mathfrak{g}) = \{0\}$, pa slijedi $\mathfrak{r} = \{0\}$.

Pretpostavimo sada da je Killingova forma $B_{\mathfrak{g}}$ nedegenerirana, tj. da je ideal $\mathfrak{r}$ definiran sa (2.2) jednak $\{0\}$. Neka je $\mathfrak{a}$ komutativni ideal u $\mathfrak{g}$. Za $x \in \mathfrak{a}$ i bilo koji $y \in \mathfrak{g}$ operator $(ad x)(ad y)$ ima sliku sadržanu u $\mathfrak{a}$, pa njegov kvadrat $((ad x)(ad y))^2$ ima sliku sadržanu u $[\mathfrak{a}, \mathfrak{a}] = \{0\}$. Dakle, operator $(ad x)(ad y)$ je nilpotentan, pa mu je trag jednak 0. Dakle, za svaki $x \in \mathfrak{a}$ vrijedi $B_{\mathfrak{g}}(x, y) = 0 \quad \forall y \in \mathfrak{g}$. Time je dokazano da je $\mathfrak{a} \subseteq \mathfrak{r}$. Ali po pretpostavci je $\mathfrak{r} = \{0\}$, pa je i $\mathfrak{a} = \{0\}$. Time smo dokazali da Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ ne sadrži nijedan komutativni ideal različit od $\{0\}$, a to prema propoziciji 2.3.1. znači da je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ poluprosta.

Korolar 2.3.4. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra nad poljem k i neka je K proširenje polja k . Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je poluprosta ako i samo ako je Liejeva algebra $\mathfrak{g}^K$ poluprosta.*

Zadatak 2.3.1. *Dokažite korolar 2.3.4.*

Uputa: Uočite da je bilinearna forma B na vektorskom prostoru V nedegenerirana ako i samo ako je za neku (za svaku) bazu $\{e_1, \dots, e_n\}$ prostora V matrica $[B(e_i, e_j)]_{i,j=1}^n$ regularna.

Zadatak 2.3.2. ** Uočite da drugi dio dokaza vrijedi i bez pretpostavke da je polje karakteristike 0. Razmatranjem primjera $\mathfrak{g} = \mathfrak{sl}(3, K)/Z(\mathfrak{sl}(3, K))$ za polje K karakteristike 3 pokažite da obrnuta implikacija u teoremu 2.3.3. općenito ne vrijedi, tj. da je ta Liejeva algebra poluprosta, ali njena Killingova forma je degenerirana.*

Ako su $\mathfrak{g}_1, \mathfrak{g}_2, \dots, \mathfrak{g}_k$ Liejeve algebre nad poljem K onda je očito da se na sljedeći način u Kartezijev produkt $\mathfrak{g} = \mathfrak{g}_1 \times \mathfrak{g}_2 \times \dots \times \mathfrak{g}_k$ uvodi struktura Liejeve algebre:

$$[(x_1, x_2, \dots, x_k), (y_1, y_2, \dots, y_k)] = ([x_1, y_1], [x_2, y_2], \dots, [x_k, y_k]), \quad x_j, y_j \in \mathfrak{g}_j, \quad j = 1, 2, \dots, k.$$

Ta se Liejeva algebra zove **direktni produkt Liejevih algebri** $\mathfrak{g}_1, \mathfrak{g}_2, \dots, \mathfrak{g}_k$. Primijetimo da je tada za svaki j

$$\underbrace{\{0\} \times \dots \times \{0\}}_{j-1} \times \mathfrak{g}_j \times \underbrace{\{0\} \times \dots \times \{0\}}_{k-j} = \{(\underbrace{0, \dots, 0}_{j-1}, x, \underbrace{0, \dots, 0}_{k-j}); x \in \mathfrak{g}_j\}$$

ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$ koji je kao Liejeva algebra izomorfan $\mathfrak{g}_j$. Nadalje, kao vektorski prostor $\mathfrak{g}$ je direktna suma tih ideala.

Pretpostavimo sada da je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra i da su $\mathfrak{a}_1, \mathfrak{a}_2, \dots, \mathfrak{a}_k$ ideali u $\mathfrak{g}$ takvi da je

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{a}_1 \dot{+} \mathfrak{a}_2 \dot{+} \dots \dot{+} \mathfrak{a}_k.$$

Tada za $i \neq j$ imamo

$$[\mathfrak{a}_i, \mathfrak{a}_j] \subseteq \mathfrak{a}_i \cap \mathfrak{a}_j = \{0\}.$$

Stoga za $x_j, y_j \in \mathfrak{a}_j, j = 1, 2, \dots, k$, vrijedi

$$[x_1 + x_2 + \dots + x_k, y_1 + y_2 + \dots + y_k] = [x_1, y_1] + [x_2, y_2] + \dots + [x_k, y_k].$$

To pokazuje da je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ izomorfna direktnom produktu $\mathfrak{a}_1 \times \mathfrak{a}_2 \times \dots \times \mathfrak{a}_k$.

Propozicija 2.3.5. *Neka je $\mathfrak{g}$ poluprosta Liejeva algebra i neka je $\mathfrak{a}$ ideal u $\mathfrak{g}$.*

- (a) $\mathfrak{a}$ je poluprosta Liejeva algebra.
- (b) $\mathfrak{a}^\perp = \{x \in \mathfrak{g}; B_{\mathfrak{g}}(x, y) = 0 \ \forall y \in \mathfrak{a}\}$ je ideal u $\mathfrak{g}$.
- (c) Vrijedi $\mathfrak{g} = \mathfrak{a} \dot{+} \mathfrak{a}^\perp$.

Dokaz: (b) Za $x \in \mathfrak{a}^\perp, y \in \mathfrak{g}$ i $z \in \mathfrak{a}$ vrijedi $[y, z] \in \mathfrak{a}$, dakle, prema tvrdnji (c) propozicije 2.3.2. vrijedi

$$B_{\mathfrak{g}}([x, y], z) = B_{\mathfrak{g}}(x, [y, z]) = 0.$$

To pokazuje da je

$$[x, y] \in \mathfrak{a}^\perp \quad \forall x \in \mathfrak{a}^\perp \quad \text{i} \quad \forall y \in \mathfrak{g}.$$

Dakle, potprostor $\mathfrak{a}^\perp$ je ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$.

(c) Zbog nedegeneriranosti forme $B_{\mathfrak{g}}$ vrijedi $\dim \mathfrak{a} + \dim \mathfrak{a}^\perp = \dim \mathfrak{g}$. Nadalje, Cartanov kriterij (teorem 2.2.9.) primijenjen na Liejevu algebru $\mathfrak{a} \cap \mathfrak{a}^\perp$ pokazuje da je ta Liejeva algebra rješiva. Međutim, $\mathfrak{a} \cap \mathfrak{a}^\perp$ je ideal u $\mathfrak{g}$, a kako je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ poluprosta, zaključujemo da je $\mathfrak{a} \cap \mathfrak{a}^\perp = \{0\}$. Uz jednakost dimenzija to nam daje $\mathfrak{g} = \mathfrak{a} \dot{+} \mathfrak{a}^\perp$.

(a) Iz tvrdnje (c) i iz nedegeneriranosti forme $B_{\mathfrak{g}}$ slijedi da je i njena restrikcija $B_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{a} \times \mathfrak{a}}$ nedegenerirana. No prema tvrdnji (d) propozicije 2.3.2. ta je restrikcija upravo Killingova forma $B_{\mathfrak{a}}$ Liejeve algebre $\mathfrak{a}$. Prema teoremu 2.3.3. Liejeva algebra $\mathfrak{a}$ je poluprosta.

Teorem 2.3.6. *Za poluprostu Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ vrijedi $\mathfrak{g} = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$.*

Dokaz: Stavimo

$$\mathfrak{a} = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]^\perp = \{x \in \mathfrak{g}, B_{\mathfrak{g}}(x, [y, z]) = 0 \ \forall y, z \in \mathfrak{g}\}.$$

Prema tvrdnji (a) propozicije 2.3.5. $\mathfrak{a}$ je ideal u $\mathfrak{g}$. Nadalje, prema tvrdnji (d) propozicije 2.3.2. Killingova forma od $\mathfrak{a}$ je restrikcija $B_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{a} \times \mathfrak{a}}$. Stoga za $x \in \mathfrak{a}$ i $y \in [\mathfrak{a}, \mathfrak{a}] \subseteq [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ imamo

$$B_{\mathfrak{a}}(x, y) = B_{\mathfrak{g}}(x, y) = 0.$$

Sada po Cartanovom kriteriju rješivosti (teorem 2.2.9.) zaključujemo da je ideal $\mathfrak{a}$ rješiv. Kako je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ poluprosta, slijedi $\mathfrak{a} = \{0\}$. Sada iz tvrdnje (c) propozicije 2.3.5. slijedi da je $\mathfrak{g} = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$.

Korolar 2.3.7. *Neka je π reprezentacija poluproste Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru V . Tada je $\pi(\mathfrak{g}) \subseteq \mathfrak{sl}(V) = \{A \in \mathfrak{gl}(V); \text{Tr } A = 0\}$.*

Dokaz: Tvrdnja slijedi neposredno iz teorema 2.3.6.:

$$\pi(\mathfrak{g}) = \pi([\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]) = [\pi(\mathfrak{g}), \pi(\mathfrak{g})] \subseteq [\mathfrak{gl}(V), \mathfrak{gl}(V)] \subseteq \mathfrak{sl}(V).$$

Odatle očito slijedi:

Korolar 2.3.8. *Neka je π reprezentacija poluproste Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na jednodimenzionalnom vektorskom prostoru V . Tada je $\pi(x) = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g}$.*

Teorem 2.3.9. *Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je poluprosta ako i samo ako je ona izomorfna direktnom produktu prostih Liejevih algebri. Ako je $\mathfrak{g} \neq \{0\}$ poluprosta Liejeva algebra i $\mathfrak{g} = \mathfrak{g}_1 \dot{+} \mathfrak{g}_2 \dot{+} \dots \dot{+} \mathfrak{g}_k$, pri čemu su $\mathfrak{g}_1, \mathfrak{g}_2, \dots, \mathfrak{g}_k$ prosti ideali u $\mathfrak{g}$ i ako je $\mathfrak{a} \neq \{0\}$ ideal u $\mathfrak{g}$ onda postoje $1 \leq i_1 < \dots < i_\ell \leq k$ takvi da je $\mathfrak{a} = \mathfrak{g}_{i_1} \dot{+} \dots \dot{+} \mathfrak{g}_{i_\ell}$. Posebno, $\mathfrak{g}_1, \mathfrak{g}_2, \dots, \mathfrak{g}_k$ su jedini prosti ideali u $\mathfrak{g}$.*

Dokaz: Pretpostavimo da je $\mathfrak{g} = \mathfrak{g}_1 \dot{+} \mathfrak{g}_2 \dot{+} \dots \dot{+} \mathfrak{g}_k$, pri čemu su $\mathfrak{g}_1, \mathfrak{g}_2, \dots, \mathfrak{g}_k$ prosti ideali u $\mathfrak{g}$. Neka je $x \in \mathfrak{g}$ takav da je $B_{\mathfrak{g}}(y, x) = 0 \ \forall y \in \mathfrak{g}$. Imamo

$$x = x_1 + x_2 + \dots + x_k \quad \text{za neke} \quad x_1 \in \mathfrak{g}_1, x_2 \in \mathfrak{g}_2, \dots, x_k \in \mathfrak{g}_k.$$

Za $j \in \{1, 2, \dots, k\}$ i $y \in \mathfrak{g}_j$ imamo $[y, \mathfrak{g}_i] = \{0\}$ za $i \neq j$, tj. $(ad y)|_{\mathfrak{g}_i} = 0$. To pokazuje da je $B_{\mathfrak{g}}(y, x_i) = 0$ za $i \neq j$. Prema tome, imamo

$$B_{\mathfrak{g}_j}(y, x_j) = B_{\mathfrak{g}}(y, x_j) = \sum_{i=1}^k B_{\mathfrak{g}}(y, x_i) = B_{\mathfrak{g}}(y, x) = 0 \quad \forall y \in \mathfrak{g}_j.$$

Kako je Liejeva algebra $\mathfrak{g}_j$ prosta, dakle i poluprosta, pomoću teorema 2.3.3. zaključujemo da je $x_j = 0$. Kako je $j \in \{1, 2, \dots, k\}$ bio proizvoljan, slijedi $x = 0$. Time je dokazano da je Killingova forma $B_{\mathfrak{g}}$ nedegenerirana, odnosno, po teoremu 2.3.3. Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je poluprosta.

Pretpostavimo sada da je u toj situaciji $\mathfrak{a} \neq \{0\}$ ideal u $\mathfrak{g}$. Za bilo koji $j \in \{1, 2, \dots, k\}$ tada je $[\mathfrak{a}, \mathfrak{g}_j]$ ideal u $\mathfrak{g}_j$, a kako je $\mathfrak{g}_j$ prosta Liejeva algebra, mora biti ili $[\mathfrak{a}, \mathfrak{g}_j] = \mathfrak{g}_j$ ili $[\mathfrak{a}, \mathfrak{g}_j] = \{0\}$. S druge strane, prema tvrdnji (a) propozicije 2.3.5. $\mathfrak{a}$ je poluprosta Liejeva algebra. Stoga je po teoremu 2.3.6. $\mathfrak{a} = [\mathfrak{a}, \mathfrak{a}]$. S druge strane, očito je $[\mathfrak{a}, \mathfrak{a}^\perp] = \{0\}$. Stoga je po tvrdnji (c) propozicije 2.3.5. $[\mathfrak{a}, \mathfrak{g}] = [\mathfrak{a}, \mathfrak{a} \dot{+} \mathfrak{a}^\perp] = [\mathfrak{a}, \mathfrak{a}] = \mathfrak{a}$. Dakle,

$$\mathfrak{a} = [\mathfrak{a}, \mathfrak{g}] = [\mathfrak{a}, \mathfrak{g}_1 \dot{+} \mathfrak{g}_2 \dot{+} \dots \dot{+} \mathfrak{g}_k] = [\mathfrak{a}, \mathfrak{g}_1] \dot{+} [\mathfrak{a}, \mathfrak{g}_2] \dot{+} \dots \dot{+} [\mathfrak{a}, \mathfrak{g}_k].$$

Kako je za svaki j ili $[\mathfrak{a}, \mathfrak{g}_j] = \mathfrak{g}_j$ ili $[\mathfrak{a}, \mathfrak{g}_j] = \{0\}$, slijedi da je za neke $1 \leq i_1 < \dots < i_\ell \leq k$

$$\mathfrak{a} = \mathfrak{g}_{i_1} \dot{+} \dots \dot{+} \mathfrak{g}_{i_\ell}.$$

Pretpostavimo sada da je $\mathfrak{g} \neq \{0\}$ proizvoljna poluprosta Liejeva algebra. Ako $\mathfrak{g}$ nije prosta, u $\mathfrak{g}$ postoji ideal $\mathfrak{a}$ različit i od $\{0\}$ i od $\mathfrak{g}$. Tada je po propoziciji 2.3.5. $\mathfrak{g} = \mathfrak{a} \dot{+} \mathfrak{a}^\perp$ i ideali $\mathfrak{a}$ i $\mathfrak{a}^\perp$ su poluproste Liejeve algebre. Indukcijom po $\dim \mathfrak{g}$ slijedi da postoje prosti ideali $\mathfrak{g}_1, \mathfrak{g}_2, \dots, \mathfrak{g}_k$ takvi da je $\mathfrak{g} = \mathfrak{g}_1 \dot{+} \mathfrak{g}_2 \dot{+} \dots \dot{+} \mathfrak{g}_k$.

Time je teorem u potpunosti dokazan.

Teorem 2.3.10. *Neka je $\mathfrak{g}$ poluprosta Liejeva algebra. Tada je svaka njena derivacija unutarnja, tj. $\text{ad } \mathfrak{g} = \text{Der}(\mathfrak{g})$.*

Dokaz: Kako je $\mathfrak{g}$ poluprosta, njena je Killingova forma $B = B_{\mathfrak{g}}$ nedegenerirana. Odatle slijedi da za svaki linearni funkcional $f \in \mathfrak{g}^*$ postoji jedinstven element $y \in \mathfrak{g}$ takav da je $f(x) = B(x, y) \forall x \in \mathfrak{g}$. Neka je $D \in \text{Der}(\mathfrak{g})$. Definiramo linearni funkcional $f \in \mathfrak{g}^*$ sa $f(x) = \text{Tr}(ad x)D$, $x \in \mathfrak{g}$. Neka je $y \in \mathfrak{g}$ takav da je $f(x) = B(x, y) \forall x \in \mathfrak{g}$, tj. da je

$$\text{Tr}(ad x)D = B(x, y) \quad \forall x \in \mathfrak{g}.$$

Neka je E derivacija od $\mathfrak{g}$ definirana sa $E = D - \text{ad } y$. Tada je

$$\text{Tr } E(ad x) = \text{Tr } D(ad x) - \text{Tr}(ad y)(ad x) = \text{Tr}(ad x)D - B(x, y) = 0 \quad \forall x \in \mathfrak{g}.$$

Prema dokazu propozicije 1.1.3. znamo da je $\text{ad } Ex = [E, ad x] \forall x \in \mathfrak{g}$. Prema tome, za proizvoljne $x, z \in \mathfrak{g}$ imamo redom

$$\begin{aligned} B(Ex, z) &= \text{Tr}(ad Ex)(ad z) = \text{Tr}[E, ad x](ad z) = \text{Tr}(E(ad x)(ad z) - (ad x)E(ad z)) = \\ &= \text{Tr}(E(ad x)(ad z) - E(ad z)(ad x)) = \text{Tr } E[ad x, ad z] = \text{Tr } E(ad [x, z]) = 0. \end{aligned}$$

Kako je forma B nedegenerirana, odatle slijedi $E = 0$, tj. $D = \text{ad } y$.

Sjetimo se sada Jordanove dekompozicije linearnih operatora. Prema teoremu 1.3.8. za svaki linearni operator A na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru V postoje jedinstveni poluprost operator A_s i nilpotentan operator A_n takvi da je $A = A_s + A_n$ i $A_s A_n = A_n A_s$. Nadalje, prema teoremu 1.3.10. postoje polinomi P i Q takvi da je $P(0) = Q(0) = 0$, $A_s = P(A)$ i $A_n = Q(A)$. To smo dokazali uz pretpostavku da je polje algebarski zatvoreno. Pomoću proširenja polja skalara može se dokazati da te tvrdnje vrijede za svako polje karakteristike 0.

Neka je sada $\mathfrak{g}$ poluprosta Liejeva algebra i $x \in \mathfrak{g}$. Reći ćemo da je element x **poluprost** ako je operator $ad x$ poluprost, a **nilpotentan** ako je operator $ad x$ nilpotentan. Za svaki $x \in \mathfrak{g}$ je $ad x = (ad x)_s + (ad x)_n$. Nadalje, prema propoziciji 1.3.12. operatori $(ad x)_s$ i $(ad x)_n$ su derivacije Liejeve algebre $\mathfrak{g}$. Sada iz teorema 2.3.10. slijedi da postoje $x_{(s)}, x_{(n)} \in \mathfrak{g}$ takvi da je $(ad x)_s = ad x_{(s)}$ i $(ad x)_n = ad x_{(n)}$. Nadalje, kako je $\text{Ker } ad = Z(\mathfrak{g}) = \{0\}$, ti su elementi $x_{(s)}$ i $x_{(n)}$ jedinstveni. Napomenimo da je po definiciji tada $x_{(s)}$ poluprost element od $\mathfrak{g}$ i $x_{(n)}$ je nilpotentan element od $\mathfrak{g}$. Nadalje, vrijedi

$$ad [x_{(s)}, x_{(n)}] = [ad x_{(s)}, ad x_{(n)}] = [(ad x)_s, (ad x)_n] = 0 \implies [x_{(s)}, x_{(n)}] = 0.$$

$x_{(s)}$ se zove **poluprost dio** a $x_{(n)}$ **nilpotentan dio** elemeta $x \in \mathfrak{g}$. Pretpostavimo sada da su s poluprost i n nilpotentan element od $\mathfrak{g}$ takvi da je $x = s + n$ i $[s, n] = 0$. Tada je $ad s$ poluprost operator na $\mathfrak{g}$ i $ad n$ je nilpotentan operator na $\mathfrak{g}$ i vrijedi $ad x = ad s + ad n$ i $[ad s, ad n] = 0$. Slijedi $ad s = (ad x)_s = ad x_{(s)}$ i $ad n = (ad x)_n = ad x_{(n)}$, dakle, $s = x_{(s)}$ i $n = x_{(n)}$. Time smo dokazali:

Teorem 2.3.11. (Jordan–Chevalleyeva dekompozicija) *Neka je $\mathfrak{g}$ poluprosta Liejeva algebra (nad poljem karakteristike 0) i $x \in \mathfrak{g}$. Postoje jedinstven poluprost element $x_{(s)}$ i jedinstven nilpotentan element $x_{(n)}$ Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ takvi da je $x = x_{(s)} + x_{(n)}$ i $[x_{(s)}, x_{(n)}] = 0$. Nadalje, postoje polinomi P i Q takvi da je $P(0) = Q(0) = 0$, $ad x_{(s)} = P(ad x)$ i $ad x_{(n)} = Q(ad x)$.*

2.4 Weylov teorem potpune reducibilnosti

U ovom ćemo odjeljku promatrati konačnodimenzionalne reprezentacije poluprostih Liejevih algebri. Za reprezentaciju π Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru V nad poljem K (karakteristike 0) definiramo formu $B_\pi : \mathfrak{g} \times \mathfrak{g} \rightarrow K$ ovako:

$$B_\pi(x, y) = \text{Tr } \pi(x)\pi(y), \quad x, y \in \mathfrak{g}.$$

Očito je B_π bilinearna simetrična forma na $\mathfrak{g} \times \mathfrak{g}$. Ona se zove **forma na $\mathfrak{g}$ pridružena reprezentaciji π** .

Propozicija 2.4.1. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra, π njena reprezentacija na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru V i B_π pridružena forma na $\mathfrak{g}$.*

(a) *Forma B_π je invarijantna, tj.*

$$B_\pi([x, y], z) = B_\pi(x, [y, z]) \quad \forall x, y, z \in \mathfrak{g}.$$

(b) *Ako je $\mathfrak{a}$ onda je i*

$$\mathfrak{a}^\pi = \{x \in \mathfrak{g}; B_\pi(x, y) = 0 \quad \forall y \in \mathfrak{g}\}$$

ideal u $\mathfrak{g}$.

(c) *Ako je forma B_π nedegenerirana i ako je $\mathfrak{a}$ ideal u $\mathfrak{g}$, onda je ideal $\mathfrak{a} \cap \mathfrak{a}^\pi$ komutativan.*

Dokaz: (a) Za $x, y, z \in \mathfrak{g}$ zbog svojstava traga umnoška linearnih operatora imamo redom:

$$\begin{aligned} B_\pi([x, y], z) &= \text{Tr } \pi([x, y])\pi(z) = \text{Tr } \pi(x)\pi(y)\pi(z) - \text{Tr } \pi(y)\pi(x)\pi(z) = \\ &= \text{Tr } \pi(x)\pi(y)\pi(z) - \text{Tr } \pi(x)\pi(z)\pi(y) = \text{Tr } \pi(x)\pi([y, z]) = B_\pi(x, [y, z]). \end{aligned}$$

Tvrđnja (b) dokazuje se sasvim analogno tvrdnji (b) propozicije 2.3.5. Za $x \in \mathfrak{a}^\pi$, $y \in \mathfrak{g}$ i $z \in \mathfrak{a}$ prema tvrdnji (a) imamo $B_\pi([x, y], z) = B_\pi(x, [y, z]) = 0$. To pokazuje da je $[\mathfrak{a}^\pi, \mathfrak{g}] \subseteq \mathfrak{a}^\pi$, odnosno, potprostor $\mathfrak{a}^\pi$ je ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$.

(c) Za $x, y \in \mathfrak{a} \cap \mathfrak{a}^\pi$ i svaki $z \in \mathfrak{g}$ imamo $[y, z] \in \mathfrak{a}$ i $x \in \mathfrak{a}^\pi$, pa zbog (a) vrijedi $B_\pi([x, y], z) = B_\pi(x, [y, z]) = 0$. To pokazuje da je $[x, y] \in \mathfrak{g}^\pi \quad \forall x, y \in \mathfrak{a} \cap \mathfrak{a}^\pi$. Kako je forma B_π po pretpostavci nedegenerirana, vrijedi $\mathfrak{g}^\pi = \{0\}$, a to znači da je ideal $\mathfrak{a} \cap \mathfrak{a}^\pi$ komutativan.

Propozicija 2.4.2. *Neka je π vjerna konačnodimenzionalna reprezentacija poluproste Liejeve algebre $\mathfrak{g}$. Tada je forma pridružena forma B_π nedegenerirana.*

Dokaz: Prema tvrdnji (b) propozicije 2.4.1. $\mathfrak{g}^\pi$ je ideal u $\mathfrak{g}$. Neka je V prostor reprezentacije π . Budući da je reprezentacija π po pretpostavci vjerna, možemo pretpostaviti da je $\mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{gl}(V)$ i da je π identiteta. Za $x, y \in \mathfrak{g}^\pi$ tada je

$$\text{Tr } xy = B_\pi(x, y) = 0.$$

Sada iz Cartanovog kriterija rješivosti (teorem 2.2.8.) slijedi da je ideal $\mathfrak{g}^\pi$ rješiv. Kako je $\mathfrak{g}$ poluprosta, slijedi $\mathfrak{g}^\pi = \{0\}$, odnosno, forma B_π je nedegenerirana.

Propozicija 2.4.3. *Neka je π vjerna reprezentacija poluproste Liejeve algebre $\mathfrak{g} \neq \{0\}$ na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru V i B_π pridružena (nedegenerirana) forma. Neka je $\{x_1, \dots, x_n\}$ baza od $\mathfrak{g}$ i neka je $\{y_1, \dots, y_n\}$ njoj biortogonalna baza u odnosu na formu B_π , dakle, takva da je*

$$B_\pi(x_i, y_j) = \delta_{ij} \quad \forall i, j \in \{1, \dots, n\}.$$

Definiramo linearni operator $C_\pi : V \rightarrow V$ sa

$$C_\pi = \sum_{i=1}^n \pi(x_i)\pi(y_i).$$

- (a) Operator C_π neovisan je o izboru baze $\{x_1, \dots, x_n\}$.
- (b) Vrijedi $C_\pi \pi(x) = \pi(x) C_\pi \quad \forall x \in \mathfrak{g}$, tj. $C_\pi \in \text{End}_{\mathfrak{g}}(V)$.
- (c) $\text{Tr} C_\pi = \dim \mathfrak{g}$.
- (d) Ako je reprezentacija π ireducibilna, onda je $C_\pi \in GL(V)$.

Dokaz: (a) Neka je $\{x'_1, \dots, x'_n\}$ druga baza od $\mathfrak{g}$ i $\{y'_1, \dots, y'_n\}$ njoj biortogonalna baza od $\mathfrak{g}$ u odnosu na formu B_π . Neka su $A = [\alpha_{ij}]_{i,j=1}^n$ i $B = [\beta_{ij}]_{i,j=1}^n$ matrice veze između parova tih baza:

$$x'_j = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} x_i, \quad y'_j = \sum_{i=1}^n \beta_{ij} y_i, \quad j = 1, \dots, n.$$

Tada za bilo koje $j, k \in \{1, \dots, n\}$ imamo

$$\delta_{jk} = B_\pi(x'_j, y'_k) = \sum_{i,\ell=1}^n \alpha_{ij} \beta_{\ell k} B_\pi(x_i, y_\ell) = \sum_{i,\ell=1}^n \alpha_{ij} \beta_{\ell k} \delta_{i\ell} = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} \beta_{ik}.$$

To pokazuje da je B transponirana matrica inverzne matrice od A . Stoga vrijedi i

$$\sum_{i=1}^n \alpha_{ji} \beta_{ki} = \delta_{jk} \quad \forall j, k \in \{1, \dots, n\}.$$

Slijedi

$$\sum_{i=1}^n \pi(x'_i) \pi(y'_i) = \sum_{i,j,k=1}^n \alpha_{ji} \beta_{ki} \pi(x_j) \pi(y_k) = \sum_{j,k=1}^n \delta_{jk} \pi(x_j) \pi(y_k) = \sum_{j=1}^n \pi(x_j) \pi(y_j) = C_\pi.$$

Time je dokazano da je definicija operatora C_π neovisna o izboru baze $\{x_1, \dots, x_n\}$ od $\mathfrak{g}$.

(b) Neka je sada $x \in \mathfrak{g}$ i neka su λ_{ij} i μ_{ij} matricni elementi operatora $\text{ad } x$ u bazama $\{x_1, \dots, x_n\}$ i $\{y_1, \dots, y_n\}$:

$$[x, x_j] = \sum_{i=1}^n \lambda_{ij} x_i, \quad [x, y_j] = \sum_{i=1}^n \mu_{ij} y_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

Tada zbog tvrdnje (a) propozicije 2.4.1. imamo redom za bilo koje $i, k \in \{1, \dots, n\}$:

$$\begin{aligned} \lambda_{ki} &= \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} \delta_{jk} = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} B_\pi(x_j, y_k) = B_\pi([x, x_i], y_k) = \\ &= -B_\pi(x_i, [x, y_k]) = -\sum_{j=1}^n \mu_{jk} B_\pi(x_i, y_j) = -\sum_{j=1}^n \mu_{jk} \delta_{ij} = -\mu_{ik}. \end{aligned}$$

Zadatak 2.4.1. Dokažite da linearne operatore A, B, C na vektorskom prostoru V vrijedi

$$[A, BC] = [A, B]C + B[A, C].$$

Formulu iz prethodnog zadatka iskoristit ćemo za operatore $A = \pi(x)$, $B = \pi(x_i)$ i $C = \pi(y_i)$. Zbog dokazane jednakosti $\mu_{ji} = -\lambda_{ij}$ imamo redom

$$[\pi(x), C_\pi] = \sum_{i=1}^n [\pi(x), \pi(x_i) \pi(y_i)] = \sum_{i=1}^n ([\pi(x), \pi(x_i)] \pi(y_i) + \pi(x_i) [\pi(x), \pi(y_i)]) =$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i=1}^n (\pi([x, x_i])\pi(y_i) + \pi(x_i)\pi([x, y_i])) = \sum_{i,j=1}^n (\lambda_{ij}\pi(x_j)\pi(y_i) + \mu_{ji}\pi(x_i)\pi(y_j)) = \\
&= \sum_{i,j} \lambda_{ji}\pi(x_j)\pi(y_i) - \sum_{i,j=1}^n \lambda_{ij}\pi(x_i)\pi(y_j) = 0.
\end{aligned}$$

Time je dokazana tvrdnja (b).

(c) Imamo

$$\text{Tr } C_\pi = \sum_{i=1}^n \text{Tr } \pi(x_i)\pi(y_i) = \sum_{i=1}^n B_\pi(x_i, y_i) = n = \dim \mathfrak{g}.$$

Napokon, tvrdnja (d) slijedi iz neposredno iz tvrdnje (b) Dixmier–Schurove leme (teorem 1.2.6.), budući da je prema (b) i (c) $C_\pi \in \text{End}_{\mathfrak{g}}(V) \setminus \{0\}$.

Operator C_π iz prethodnog teorema zove se **Casimirov operator reprezentacije** π . Ukoliko reprezentacija π nije vjerna, ali nije trivijalna, tj. $\pi \neq 0$, možemo je promatrati kao vjernu reprezentaciju poluproste Liejeve algebre $\mathfrak{g}/(\text{Ker } \pi)$. Pripadni Casimirov operator ponovo označavamo sa C_π i zovemo Casimirovim operatorom reprezentacije π .

Zadatak 2.4.2. *Dokažite da su Liejeve algebre $\mathfrak{sl}(2, K)$ i $\mathfrak{sl}(3, K)$ proste i izračunajte Casimirove operatore*

(a) *adjungirane reprezentacije $\text{ad}_{\mathfrak{g}}$ Liejeve algebre $\mathfrak{g} = \mathfrak{sl}(2, K)$;*

(b) *standardne reprezentacije Liejeve algebre $\mathfrak{g} = \mathfrak{sl}(3, K)$ na prostoru $M_{3,1}(K) \cong K^3$.*

Dokazat ćemo sada centralni rezultat ovog odjeljka, jedan od fundamentalnih rezultata teorije poluprostih Liejevih algebri, tzv. **Weylov teorem o potpunoj reducibilnosti**:

Teorem 2.4.4. *Svaka konačnodimenzionalna reprezentacija poluproste Liejeve algebre je potpuno reducibilna.*

Dokaz: Neka je π reprezentacija poluproste Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru V i neka je W π –invarijantan potprostor. Treba dokazati da postoji π –invarijantan potprostor U od V takav da je $V = W \dot{+} U$.

Pretpostavimo najprije da je W potprostor od V kodimenzije 1. Prema korolaru 2.3.8. tada je $\pi_{V/W}(x) = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g}$, odnosno, vrijedi

$$\pi(x)V \subseteq W \quad \forall x \in \mathfrak{g}. \quad (2.3)$$

Pretpostavimo dalje da je subreprezentacija $\sigma = \pi_W$ ireducibilna. Ako je $\sigma = 0$, tj. $\sigma(x) = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g}$, onda iz (2.3) za proizvoljne $x, y \in \mathfrak{g}$ slijedi da je $\pi(x)\pi(y) = \sigma(x)\pi(y) = 0$. No tada je zbog teorema 2.3.6.

$$\pi(\mathfrak{g}) = \pi([\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]) = [\pi(\mathfrak{g}), \pi(\mathfrak{g})] = \text{span} \{ \pi(x)\pi(y) - \pi(y)\pi(x); x, y \in \mathfrak{g} \} = \{0\},$$

pa je svaki direktni komplement od W u V π –invarijantan.

Pretpostavimo sada da $\sigma \neq 0$. Prema tvrdnji (d) propozicije 2.4.3. tada je

$$C_\pi|_W = C_\sigma \in GL(W).$$

Kako je zbog (2.3) $C_\pi V \subseteq W$, zaključujemo da je

$$C_\pi V = \text{Im } C_\pi = W.$$

Odatle slijedi da je $\text{Ker } C_\pi$ jednodimenzionalan potprostor od V koji je direktni komplement od W . No taj je potprostor π -invarijantan zbog tvrdnje (c) propozicije 2.4.3.

U općem slučaju kad subreprezentacija $\sigma = \pi_W$ nije nužno ireducibilna dokaz egzistencije π -invarijantnog direktnog komplementa od W u V dokazujemo indukcijom u odnosu na $\dim V$. Baza indukcije ($\dim V = 1, W = \{0\}$) je trivijalna. Provedimo korak indukcije i pretpostavimo da je tvrdnja dokazana za prostore manje dimenzije (i dalje, naravno, uz pretpostavku da je potprostor W kodimenzijske 1 u V). Ako subreprezentacija σ nije ireducibilna, neka je $T \neq \{0\}$ π -invarijantan potprostor od W takav da je subreprezentacija $\pi_T = \sigma_T$ ireducibilna; naravno, tada je i $T \neq W$. Promatrajmo sada kvocijentnu reprezentaciju $\pi_{V/T}$. Tada je W/T potprostor od V/T kodimenzijske 1 koji je $\pi_{V/T}$ -invarijantan. Kako je $\dim V/T < \dim V$, po pretpostavci indukcije postoji jednodimenzionalni $\pi_{V/T}$ -invarijantan potprostor Z' od V/T takav da je $V/T = W/T \dot{+} Z'$. Neka je Z totalni invers od Z' u V u odnosu na kvocijentno preslikavanje $V \rightarrow V/T$:

$$Z = \{v \in V; v + T \in Z'\}.$$

Tada je potprostor Z od V očito π -invarijantan. Nadalje, vrijedi $\dim Z/T = 1$ i $Z \cap W = T$. Zbog korolara 2.3.8. je $\pi(x)Z \subseteq T \ \forall x \in \mathfrak{g}$. Kako je $\dim Z = \dim T + 1 < \dim W + 1 = \dim V$, po pretpostavci indukcije postoji jednodimenzionalan π_Z -invarijantan potprostor U od Z takav da je $Z = T \dot{+} U$. No tada je U π -invarijantan potprostor od V i vrijedi $V = W \dot{+} U$.

Napustimo sada dodatnu pretpostavku $\dim V/W = 1$. Neka je ω reprezentacija Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na prostoru $\mathfrak{gl}(V)$ svih linearnih operatora na V definirana sa

$$\omega(x)A = [\pi(x), A] = \pi(x)A - A\pi(x), \quad x \in \mathfrak{g}, \quad A \in \mathfrak{gl}(V).$$

Uočimo sada sljedeća dva potprostora M i N od $\mathfrak{gl}(V)$:

$$M = \{A \in \mathfrak{gl}(V); AV \subseteq W \text{ i } A|_W = \lambda I_W \text{ za neki } \lambda \in K\},$$

$$N = \{A \in \mathfrak{gl}(V); AV \subseteq W \text{ i } A|_W = 0\}.$$

Očito je N potprostor od M i $\dim M/N = 1$. Dokažimo da su ti potprostori ω -invarijantni. Neka je $A \in M$ i neka je $\lambda \in K$ takav da je $A|_W = \lambda I_W$. Za $x \in \mathfrak{g}$ tada je $\pi(x)W \subseteq W$. Stoga za proizvoljan $v \in V$ i $w \in W$ imamo

$$[\pi(x), A]v = \pi(x)Av - A\pi(x)v \in W$$

i

$$[\pi(x), A]w = \pi(x)Aw - A\pi(x)w = \lambda\pi(x)w - \lambda\pi(x)w = 0.$$

To znači da je $\omega(x)A = [\pi(x), A] \in N \ \forall A \in M$. To pokazuje da su i M i njegov potprostor N ω -invarijantni. Primijenimo sada dokazano na reprezentaciju ω_M i ω_M -invarijantan potprostor N kodimenzijske 1. Slijedi da postoji jednodimenzionalan ω -invarijantan potprostor P od M takav da je $M = N \dot{+} P$. Prema korolaru 2.3.8. tada je $\omega_P(x) = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g}$. To znači da je $[\pi(x), A] = 0 \ \forall A \in P$ i $\forall x \in \mathfrak{g}$, odnosno, $P \subseteq \text{End}_{\mathfrak{g}}(V)$. Za $A \in P \setminus \{0\}$ je $AV \subseteq W$ i $A|_W = \lambda I_W$ za neki $\lambda \neq 0$. Možemo $A \in P$ izabrati tako da je $\lambda = 1$, tj. da je $A|_W = I_W$. No to znači da je A projektor prostora V na potprostor W . Tada za $U = \text{Ker } A$ vrijedi $V = W \dot{+} U$. Nadalje, potprostor $U = \text{Ker } A$ je π -invarijantan jer je $A \in \text{End}_{\mathfrak{g}}(V)$, odnosno, jer je $\pi(x)A = A\pi(x) \ \forall x \in \mathfrak{g}$.

Važna je posljedica Weylovog teorema o potpunoj reducibilnosti da se za poluprostu Liejevu podalgebru $\mathfrak{g}$ od $\mathfrak{gl}(V)$ Jordan–Chevalleyeva dekompozicija elementa $x \in \mathfrak{g}$ podudara sa Jordanovom dekompozicijom linearnog operatora x :

Teorem 2.4.5. *Neka je V konačnodimenzionalan vektorski prostor i neka je $\mathfrak{g}$ poluprosta Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$. Neka je $x \in \mathfrak{g}$ i neka su x_s i x_n poluprost i nilpotentan dio linearnog operatora x . Tada vrijedi $x_s = x_{(s)}$ i $x_n = x_{(n)}$ tj. $x = x_s + x_n$ je Jordan–Chevalleyeva dekompozicija od x u poluprosto Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$.*

Dokaz: Prvi nam je cilj dokazati da su $x_s, x_n \in \mathfrak{g}$. Kako je

$$(ad_{\mathfrak{gl}(V)} x) \mathfrak{g} = [x, \mathfrak{g}] \subseteq \mathfrak{g},$$

iz tvrdnje (c) teorema 1.3.8. (ili iz teorema 1.3.10.) slijedi da je i

$$(ad_{\mathfrak{gl}(V)} x)_s \mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{g} \quad \text{i} \quad (ad_{\mathfrak{gl}(V)} x)_n \mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{g}.$$

S druge strane, prema tvrdnji (c) propozicije 1.3.11. vrijedi

$$(ad_{\mathfrak{gl}(V)} x)_s = ad_{\mathfrak{gl}(V)} x_s \quad \text{i} \quad (ad_{\mathfrak{gl}(V)} x)_n = ad_{\mathfrak{gl}(V)} x_n.$$

Zaključujemo da vrijedi

$$(ad_{\mathfrak{gl}(V)} x_s) \mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{g} \quad \text{i} \quad (ad_{\mathfrak{gl}(V)} x_n) \mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{g}, \quad \text{odnosno,} \quad [x_s, \mathfrak{g}] \subseteq \mathfrak{g} \quad \text{i} \quad [x_n, \mathfrak{g}] \subseteq \mathfrak{g}.$$

Drugim riječima, operatori $x_s, x_n \in \mathfrak{gl}(V)$ su elementi normalizatora

$$\mathfrak{n} = N_{\mathfrak{gl}(V)}(\mathfrak{g}) = \{y \in \mathfrak{gl}(V); [y, \mathfrak{g}] \subseteq \mathfrak{g}\}$$

Liejeve podalgebre $\mathfrak{g}$ u Liejevoj algebri $\mathfrak{gl}(V)$. Tvrdnja $x_s, x_n \in \mathfrak{g}$ bila bi dokazana kada bismo znali da je $\mathfrak{g} = \mathfrak{n}$. Nažalost, to nikada nije istina: naime, po teoremu 2.3.6. je

$$\mathfrak{g} = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \subseteq [\mathfrak{gl}(V), \mathfrak{gl}(V)] = \mathfrak{sl}(V),$$

a očito je jedinični operator $I = I_V$ element od $\mathfrak{n}$, ali ne i od $\mathfrak{sl}(V)$, dakle, ne i od $\mathfrak{g}$.

Neka je sada $\tilde{K}$ algebarski zatvoreno proširenje polja K . Tada se svaki K -linearan operator x na prostoru V jedinstveno proširuje do $\tilde{K}$ -linearnog operatora na $V^{\tilde{K}}$. Taj ćemo prošireni operator označavati istim znakom x . Na taj način $\mathfrak{g}$ postaje podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{gl}(V^{\tilde{K}})_K$. Označimo sada sa $Inv_{\mathfrak{g}}(V^{\tilde{K}})$ skup svih $\mathfrak{g}$ -invarijantnih potprostora od $V^{\tilde{K}}$. Za svaki $W \in Inv_{\mathfrak{g}}(V^{\tilde{K}})$ defini-
ramo

$$\mathfrak{a}_W = \{y \in \mathfrak{gl}(V); yW \subseteq W \text{ i } \text{Tr}(y|W) = 0\}.$$

Lako se vidi da je $\mathfrak{a}_W$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$. Nadalje, za svaki $W \in Inv_{\mathfrak{g}}(V^{\tilde{K}})$ preslikavanje $x \mapsto x|W$, $x \in \mathfrak{g}$, je reprezentacija poluproste Liejeve algebre $\mathfrak{g}$, pa po korolaru 2.3.7. vrijedi $\text{Tr}(x|W) = 0 \quad \forall x \in \mathfrak{g}$. Prema tome,

$$\mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{a}_W \quad \forall W \in Inv_{\mathfrak{g}}(V^{\tilde{K}}).$$

Stavimo sada

$$\mathfrak{g}^* = \mathfrak{n} \cap \bigcap_{W \in Inv_{\mathfrak{g}}(V^{\tilde{K}})} \mathfrak{a}_W.$$

Tada je $\mathfrak{g}^*$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{n}$ koja sadrži $\mathfrak{g}$. Ako je $W \in Inv_{\mathfrak{g}}(V^{\tilde{K}})$, onda po već spomenutoj tvrdnji (c) teorema 1.3.8. (ili po teoremu 1.3.10.) vrijedi $x_s W \subseteq W$ i $x_n W \subseteq W$. Nadalje, operator x_n je nilpotentan, pa je i restrikcija $x_n|W$ nilpotentan operator i, posebno, $\text{Tr}(x_n|W) = 0$. Kako je $\text{Tr}(x|W) = 0$ i $x_s = x - x_n$, vrijedi i $\text{Tr}(x_s|W) = 0$. Dakle, za svaki $W \in Inv_{\mathfrak{g}}(V^{\tilde{K}})$ vrijedi $x_s, x_n \in \mathfrak{a}_W$. Zaključujemo da su $x_s, x_n \in \mathfrak{g}^*$.

Prema tome, dokaz tvrdnje $x_s, x_n \in \mathfrak{g}$ bit će potpun ako pokažemo da je $\mathfrak{g}^* = \mathfrak{g}$. U tu svrhu poslužiti će nam Weylov teorem 2.4.4. o potpunoj reducibilnosti. Taj ćemo teorem primijeniti na dvije reprezentacije poluproste Liejeve algebre $\mathfrak{g}$: na restrikciju $ad_{\mathfrak{g}^*}|_{\mathfrak{g}}$ adjungirane reprezentacije Liejeve algebre $\mathfrak{g}^*$ i na identičnu reprezentaciju $x \mapsto x$, $x \in \mathfrak{g}$, na prostoru $V^{\tilde{K}}$. Prije svega, $\mathfrak{g}$ je potprostor od $\mathfrak{g}^*$ koji je $ad_{\mathfrak{g}^*}|_{\mathfrak{g}}$ -invarijantan, pa postoji potprostor $\mathfrak{b}$ od $\mathfrak{g}^*$ takav da je $\mathfrak{g}^* = \mathfrak{g} \dot{+} \mathfrak{b}$

i da je $\mathfrak{b}$ invarijantan u odnosu na reprezentaciju $ad_{\mathfrak{g}^*}|_{\mathfrak{g}}$, tj. da je $[\mathfrak{g}, \mathfrak{b}] \subseteq \mathfrak{b}$. Međutim, vrijedi i $[\mathfrak{g}, \mathfrak{b}] \subseteq [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}^*] \subseteq [\mathfrak{g}, \mathfrak{n}] \subseteq \mathfrak{g}$. Kako je $\mathfrak{g} \cap \mathfrak{b} = \{0\}$, zaključujemo da je $[\mathfrak{g}, \mathfrak{b}] = \{0\}$, odnosno, subreprezentacija $ad_{\mathfrak{g}^*}|_{\mathfrak{g}}$ na potprostoru $\mathfrak{b}$ je trivijalna. Neka je sada W bilo koji $\mathfrak{g}$ -invarijantan potprostor od $V^{\tilde{K}}$, tj. $W \in Inv_{\mathfrak{g}}(V^{\tilde{K}})$, takav da je pripadna subreprezentacija $x \mapsto x|W$, $x \in \mathfrak{g}$, ireducibilna. Neka je $y \in \mathfrak{b}$. Tada je $y \in \mathfrak{g}^*$, dakle, $b \in \mathfrak{a}_W$. Posebno, potprostor W invarijantan je s obzirom na operator y . Kako je $[\mathfrak{b}, \mathfrak{g}] = \{0\}$, iz tvrdnje (c) Dixmier–Schurove leme (teorem 1.2.6.) slijedi da je $y|W = \lambda I_W$ za neki $\lambda \in \tilde{K}$. Međutim, po definiciji $\mathfrak{a}_W \supseteq \mathfrak{b}$ vrijedi $\text{Tr}(y|W) = 0$, dakle, $\lambda \cdot \dim W = 0$. Budući da je K , a time i $\tilde{K}$, polje karakteristike 0, zaključujemo da je $\lambda = 0$. To pokazuje da je $y|W = 0$. To vrijedi za svaki $W \in Inv_{\mathfrak{g}}(V^{\tilde{K}})$ takav da je reprezentacija $x \mapsto x|W$ od $\mathfrak{g}$ ireducibilna. Po Weylovom teoremu 2.2.4. $V^{\tilde{K}}$ je direktna suma takvih potprostora W , pa zaključujemo da je $y = 0$. Kako je $y \in \mathfrak{b}$ bio proizvoljan, slijedi $\mathfrak{b} = \{0\}$, odnosno, $\mathfrak{g}^* = \mathfrak{g}$. Time je dokazana prva tvrdnja teorema 2.4.5.:

$$x \in \mathfrak{g} \quad \implies \quad x_s, x_n \in \mathfrak{g}.$$

Imamo

$$ad_{\mathfrak{g}} x = ad_{\mathfrak{g}} x_s + ad_{\mathfrak{g}} x_n \quad \text{i} \quad [ad_{\mathfrak{g}} x_s, ad_{\mathfrak{g}} x_n] = ad_{\mathfrak{g}} [x_s, x_n] = 0.$$

Po tvrdnji (a) propozicije 1.3.11. operator $ad_{\mathfrak{gl}(V)} x_s$ je poluprost, pa je i njegova restrikcija $ad_{\mathfrak{g}} x = (ad_{\mathfrak{gl}(V)} x)|_{\mathfrak{g}}$ poluprost operator. Na isti način iz tvrdnje (b) iste propozicije slijedi da je operator $ad_{\mathfrak{g}} x_n$ nilpotentan. Zbog jedinstvenosti Jordanove dekompozicije linearnog operatora $ad_{\mathfrak{g}} x$ slijedi

$$ad_{\mathfrak{g}} x_s = (ad_{\mathfrak{g}} x)_s = ad_{\mathfrak{g}} x_{(s)} \quad \text{i} \quad ad_{\mathfrak{g}} x_n = (ad_{\mathfrak{g}} x)_n = ad_{\mathfrak{g}} x_{(n)}.$$

Iz injektivnosti preslikavanja $ad_{\mathfrak{g}}$ slijedi $x_s = x_{(s)}$ i $x_n = x_{(n)}$.

Zbog teorema 2.4.5. poluprosti i nilpotentni dio elementa x poluproste Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ označavat ćemo sa x_s i x_n umjesto sa $x_{(s)}$ i $x_{(n)}$.

Teorem 2.4.6. *Neka je π konačnodimenzionalna reprezentacija poluproste Liejeve algebre $\mathfrak{g}$.*

- (a) *Ako je element $x \in \mathfrak{g}$ poluprost, onda je operator $\pi(x)$ poluprost.*
- (b) *Ako je element $x \in \mathfrak{g}$ nilpotentan, onda je operator $\pi(x)$ nilpotentan.*
- (c) *Za svaki $x \in \mathfrak{g}$ je $\pi(x)_s = \pi(x_s)$ i $\pi(x)_n = \pi(x_n)$.*

Zadatak 2.4.3. *Dokažite teorem 2.4.6.*

Uputa: Uočite da je Liejeva podalgebra $\pi(\mathfrak{g})$ od $\mathfrak{gl}(V)$ izomorfna kvocijentnoj Liejevoj algebri $\mathfrak{g}/(\text{Ker } \pi)$, dakle, poluprosta. Sada primijenite teorem 2.4.5. na tu poluprostu Liejevu podalgebru od $\mathfrak{gl}(V)$ za dokaz tvrdnje (c). Zatim iz tvrdnje (c) dokažite tvrdnje (a) i (b).

Zadatak 2.4.4. *Neka je $\mathfrak{g}$ poluprosta Liejeva algebra nad poljem K i $D \in \text{Der}(\mathfrak{g})$. Za $x \in \mathfrak{g}$ definiramo linearan operator $\pi(x)$ na prostoru $K \times \mathfrak{g}$ sa*

$$\pi(x)(\lambda, y) = (0, \lambda Dx + [x, y]), \quad \lambda \in K, \quad x, y \in \mathfrak{g}.$$

Dokažite da je π reprezentacija Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na prostoru $K \times \mathfrak{g}$ i da je $\{0\} \times \mathfrak{g}$ π -invarijantni potprostor od $K \times \mathfrak{g}$. Primijenite Weylov teorem o potpunoj reducibilnosti da dokažete da je $D \in ad_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{g})$, tj. da na drugi način dokažete teorem 2.3.10.

2.5 Reduktivne Liejeve algebre

Za Liejevu podalgebru $\mathfrak{s}$ Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ kažemo da je **reduktivna u algebri $\mathfrak{g}$** , ako je reprezentacija $x \mapsto ad_{\mathfrak{g}} x$ Liejeve algebre $\mathfrak{s}$ na vektorskom prostoru $\mathfrak{g}$ (tj. restrikcija $ad_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{s}}$) potpuno reducibilna. **Reduktivna Liejeva algebra** je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ koja je reduktivna u samoj sebi, tj. ako je adjungirana reprezentacija $ad_{\mathfrak{g}}$ Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na prostoru $\mathfrak{g}$ potpuno reducibilna. Budući da su $ad_{\mathfrak{g}}$ -invarijantni potprostori od $\mathfrak{g}$ upravo ideli u $\mathfrak{g}$, Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je reduktivna ako i samo ako za svaki ideal $\mathfrak{a}$ u $\mathfrak{g}$ postoji ideal $\mathfrak{b}$ u $\mathfrak{g}$ takav da je $\mathfrak{g} = \mathfrak{a} + \mathfrak{b}$. U tom slučaju je, naravno, Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ izomorfna direktnom produktu $\mathfrak{a} \times \mathfrak{b}$. Ako je $\mathfrak{s}$ Liejeva podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ koja je reduktivna u $\mathfrak{g}$, onda je $\mathfrak{s}$ reduktivna Liejeva algebra. Doista, $ad_{\mathfrak{s}}$ je subreprezentacija od $ad_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{g}}$, a prema propoziciji 1.2.3. subreprezentacija potpuno reducibilne reprezentacije je i sama potpuno reducibilna. Po Weylovom teoremu 2.4.4. o potpunoj reducibilnosti poluprosta Liejeva podalgebra $\mathfrak{s}$ bilo koje Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ je reduktivna u $\mathfrak{g}$. Posebno, svaka poluprosta Liejeva algebra je reduktivna Liejeva algebra.

Zadatak 2.5.1. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra nad poljem k , $\mathfrak{s}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{g}$ i K proširenje polja k . Dokažite da je Liejeva algebra $\mathfrak{s}$ reduktivna u $\mathfrak{g}$ ako i samo ako je $\mathfrak{s}^K$ reduktivna u $\mathfrak{g}^K$.*

Zadatak 2.5.2. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra nad poljem K , $\mathfrak{s}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{g}$ i k potpolje polja K . Dokažite da je Liejeva algebra $\mathfrak{s}$ reduktivna u $\mathfrak{g}$ ako i samo ako je $\mathfrak{s}_k$ reduktivna u $\mathfrak{g}_k$.*

U proučavanju i dokazivanju osnovnih svojstava reduktivnih Liejevih algebri igra jedan ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$, koji ćemo zvati **nilradikal** od $\mathfrak{g}$ i označavati sa $Nrad(\mathfrak{g})$; to je presjek jezgara svih konačnodimenzionalnih ireducibilnih reprezentacija od $\mathfrak{g}$. Neka je π potpuno reducibilna reprezentacija od $\mathfrak{g}$ na konačnodimenzionalnom vektorskom prostoru V i neka su $V_1, \dots, V_n$ π -invarijantni potprostori od V takvi da je $V = V_1 + \dots + V_n$ i da su sve subreprezentacije $\pi_{V_1}, \dots, \pi_{V_n}$ ireducibilne. Tada je

$$\text{Ker } \pi = \bigcap_{1 \leq j \leq n} \text{Ker } \pi_{V_j} \supseteq Nrad(\mathfrak{g}).$$

Drugim riječima, $Nrad(\mathfrak{g})$ je sadržan u jezgri svake konačnodimenzionalne potpuno reducibilne reprezentacije od $\mathfrak{g}$. Nadalje, zbog konačnodimenzionalnosti od $\mathfrak{g}$ postoji konačno mnogo ireducibilnih konačnodimenzionalnih reprezentacija $\pi_1, \dots, \pi_n$ takvih da je

$$Nrad(\mathfrak{g}) = \bigcap_{1 \leq j \leq n} \text{Ker } \pi_j.$$

Prema prethodnom razmatranju, ako je π direktna suma reprezentacija $\pi_1, \dots, \pi_n$, onda je π potpuno reducibilna konačnodimenzionalna reprezentacija od $\mathfrak{g}$ za koju vrijedi $\text{Ker } \pi = Nrad(\mathfrak{g})$. Prema tome, nilradikal $Nrad(\mathfrak{g})$ je najmanji element skupa jezgara svih potpuno reducibilnih konačnodimenzionalnih reprezentacija od $\mathfrak{g}$. Zaključujemo i da Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ ima vjernu konačnodimenzionalnu potpuno reducibilnu reprezentaciju ako i samo ako je $Nrad(\mathfrak{g}) = \{0\}$.

Za dokaz ključnog teorema o nilradikalu trebat će nam sljedeći rezultat o radikalu:

Propozicija 2.5.1. *Ako je $\varphi : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{h}$ epimorfizam Liejevih algebri, onda je $\varphi(Rad(\mathfrak{g})) = Rad(\mathfrak{h})$.*

Dokaz: Budući da je φ epimorfizam, $\varphi(Rad(\mathfrak{g}))$ je ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{h}$. Liejeva algebra $\varphi(Rad(\mathfrak{g}))$ izomorfna je kvocijentnoj algebri $Rad(\mathfrak{g})/(Rad(\mathfrak{g}) \cap \text{Ker } \varphi)$, a kako je Liejeva algebra $Rad(\mathfrak{g})$ rješiva po tvrdnji (a) teorema 2.2.1. $\varphi(Rad(\mathfrak{g}))$ je rješiva Liejeva algebra. Prema tome, vrijedi $\varphi(Rad(\mathfrak{g})) \subseteq Rad(\mathfrak{h})$.

Definiramo sada preslikavanje $\Phi : \mathfrak{g}/Rad(\mathfrak{g}) \rightarrow \mathfrak{h}/\varphi(Rad(\mathfrak{g}))$ sa

$$\Phi(x + Rad(\mathfrak{g})) = \varphi(x) + \varphi(Rad(\mathfrak{g})), \quad x \in \mathfrak{g}.$$

To je preslikavanje dobro definirano. Naime, ako su $x, y \in \mathfrak{g}$ takvi da je $x + \text{Rad}(\mathfrak{g}) = y + \text{Rad}(\mathfrak{g})$, onda je $x - y \in \text{Rad}(\mathfrak{g})$, dakle, $\varphi(x) - \varphi(y) = \varphi(x - y) \in \varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g}))$, a to znači da vrijedi $\varphi(x) + \varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g})) = \varphi(y) + \varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g}))$. Preslikavanje Φ je homomorfizam Liejevih algebri. Doista, Φ je očito linearno preslikavanje. Nadalje, za $x, y \in \mathfrak{g}$ imamo redom

$$\begin{aligned} \Phi([x + \text{Rad}(\mathfrak{g}), y + \text{Rad}(\mathfrak{g})]) &= \Phi([x, y] + \text{Rad}(\mathfrak{g})) = \varphi([x, y]) + \varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g})) = \\ &= [\varphi(x), \varphi(y)] + \varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g})) = [\varphi(x) + \varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g})), \varphi(y) + \varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g}))] = [\Phi(x + \text{Rad}(\mathfrak{g})), \Phi(y + \text{Rad}(\mathfrak{g}))]. \end{aligned}$$

Napokon, kako je $\varphi : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{h}$ epimorfizam, to je i $\Phi : \mathfrak{g}/\text{Rad}(\mathfrak{g}) \rightarrow \mathfrak{h}/\varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g}))$ epimorfizam. Doista, ako $y \in \mathfrak{h}$, izaberimo $x \in \mathfrak{g}$ takav da je $y = \varphi(x)$. Tada je

$$\Phi(x + \text{Rad}(\mathfrak{g})) = \varphi(x) + \varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g})) = y + \varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g})).$$

Odatle slijedi da je Liejeva algebra $\mathfrak{h}/\varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g}))$ izomorfna kvocijentnoj algebri od $\mathfrak{g}/\text{Rad}(\mathfrak{g})$. No kako je po teoremu 2.2.2. Liejeva algebra $\mathfrak{g}/\text{Rad}(\mathfrak{g})$ poluprosta, iz propozicije 2.3.5. slijedi da je i svaka njena kvocijentna algebra poluprosta. Posebno, Liejeva algebra $\mathfrak{h}/\varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g}))$ je poluprosta. No odatle slijedi da je njen rješivi ideal $\text{Rad}(\mathfrak{h})/\varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g}))$ jednak $\{0\}$. Prema tome, vrijedi jednakost $\varphi(\text{Rad}(\mathfrak{g})) = \text{Rad}(\mathfrak{h})$.

Trebat će nam još sljedeća lema:

Lema 2.5.2. *Neka je V konačnodimenzionalan vektorski prostor, $\mathfrak{g}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$ takva da je identična reprezentacija od $\mathfrak{g}$ na V ireducibilna. Tada za svaki komutativni ideal $\mathfrak{a}$ u $\mathfrak{g}$ vrijedi $\mathfrak{a} \cap [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] = \{0\}$.*

Dokaz: Neka je $\mathcal{A}$ unitalna podalgebra od $L(V)$ generirana sa $\mathfrak{a}$. Algebra $\mathcal{A}$ je komutativna. Pretpostavimo da je $\mathfrak{b}$ ideal u $\mathfrak{g}$ sadržan u $\mathfrak{a}$ takav da je

$$\text{Tr } ba = 0 \quad \forall b \in \mathfrak{b} \quad \text{i} \quad \forall a \in \mathcal{A}.$$

Tada je posebno

$$\text{Tr } b^n = 0 \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad \text{i} \quad \forall b \in \mathfrak{b}.$$

Odatle slijedi da je svaki $b \in \mathfrak{b}$ nilpotentan operator. Sada iz leme 2.1.11. slijedi da je $\mathfrak{b} = \{0\}$.

Promatrajmo sada ideal $[\mathfrak{a}, \mathfrak{g}]$ u $\mathfrak{g}$ sadržan u $\mathfrak{a}$. Za $x \in \mathfrak{g}$, $y \in \mathfrak{a}$ i $a \in \mathcal{A}$ imamo

$$\text{Tr } [x, y]a = \text{Tr } xya - \text{Tr } yxa = \text{Tr } xya - \text{Tr } xay = \text{Tr } x(ya - ay) = 0$$

jer je $ya = ay$. Iz dokazanog slijedi da je $[\mathfrak{g}, \mathfrak{a}] = \{0\}$. Prema tome, vrijedi i $ya = ay \quad \forall y \in \mathfrak{g}$ i $\forall a \in \mathcal{A}$. Sada za $x, y \in \mathfrak{g}$ i $a \in \mathcal{A}$ dobivamo

$$\text{Tr } [x, y]a = \text{Tr } xya - \text{Tr } yxa = \text{Tr } xya - \text{Tr } xay = \text{Tr } x(ay - ya) = 0.$$

Primijenimo sada prvi dio dokaza na ideal $\mathfrak{b} = \mathfrak{a} \cap [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$. Slijedi $\mathfrak{a} \cap [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] = \{0\}$.

Teorem 2.5.3. *Za svaku Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ vrijedi $N\text{rad}(\mathfrak{g}) = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \cap \text{Rad}(\mathfrak{g})$ i to je nilpotentni ideal u $\mathfrak{g}$ sadržan u najvećem idealu nilpotencije svake konačnodimenzionalne reprezentacije od $\mathfrak{g}$.*

Dokaz: Neka je $\lambda \in \mathfrak{g}^*$ linearan funkcional takav da je $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \subseteq \text{Ker } \lambda$. Tada je λ ireducibilna reprezentacija od $\mathfrak{g}$, pa slijedi $N\text{rad}(\mathfrak{g}) \subseteq \text{Ker } \lambda$. Budući da je očito

$$[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] = \bigcap \{ \text{Ker } \lambda; \lambda \in \mathfrak{g}^*, \text{Ker } \lambda \supseteq [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \},$$

slijedi $Nrad(\mathfrak{g}) \subseteq [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$.

Neka je sada π proizvoljna konačnodimenzionalna reprezentacija od $\mathfrak{g}$ na prostoru V i neka je $(V_0, V_1, \dots, V_n)$ kompozicioni niz te reprezentacije. Neka je $\tilde{\pi}$ direktna suma ireducibilnih reprezentacija $\pi_{V_1/V_0}, \dots, \pi_{V_n/V_{n-1}}$. Tada je $\tilde{\pi}$ potpuno reducibilna reprezentacija pa vrijedi $Nrad(\mathfrak{g}) \subseteq \text{Ker } \tilde{\pi}$. Međutim, prema propoziciji 2.1.13. $\text{Ker } \tilde{\pi}$ je upravo jednak najvećem idealu nilpotencije $\mathfrak{n}_\pi$ reprezentacije π . Time je dokazano da je ideal $Nrad(\mathfrak{g})$ sadržan u najvećem idealu nilpotencije $\mathfrak{n}_\pi$ svake konačnodimenzionalne reprezentacije π . To posebno vrijedi za adjungiranu reprezentaciju $ad_{\mathfrak{g}}$, što znači da je $Nrad(\mathfrak{g})$ sadržan u najvećem nilpotentnom idealu Liejeve algebre $\mathfrak{g}$. Dakle, ideal $Nrad(\mathfrak{g})$ je nilpotentan. Stoga vrijedi i $Nrad(\mathfrak{g}) \subseteq Rad(\mathfrak{g})$.

Time smo dokazali inkluziju $Nrad(\mathfrak{g}) \subseteq [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \cap Rad(\mathfrak{g})$.

Neka je sada π konačnodimenzionalna ireducibilna reprezentacija od $\mathfrak{g}$ na prostoru V . Stavimo $Rad(\mathfrak{g}) = \mathfrak{r}$ i neka je $k \in \mathbb{Z}_+$ najmanji takav da je $\pi(\mathfrak{r}^{(k+1)}) = \{0\}$. Stavimo

$$\mathfrak{g}' = \pi(\mathfrak{g}) \quad \text{i} \quad \mathfrak{a}' = \pi(\mathfrak{r}^{(k)}) \neq \{0\}.$$

Kako je $x \mapsto \pi(x)$ epimorfizam $\mathfrak{g}$ na $\mathfrak{g}'$ i kako je $\mathfrak{r}^{(k)}$ ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$, to je $\mathfrak{a}'$ ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}'$. Taj je ideal komutativan:

$$[\mathfrak{a}', \mathfrak{a}'] = [\pi(\mathfrak{r}^{(k)}), \pi(\mathfrak{r}^{(k)})] = \pi([\mathfrak{r}^{(k)}, \mathfrak{r}^{(k)}]) = \pi(\mathfrak{r}^{(k+1)}) = \{0\}.$$

$\mathfrak{g}'$ je Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$ i identična reprezentacija od $\mathfrak{g}'$ na prostoru V je ireducibilna. Prema lemi 2.5.2. vrijedi

$$\pi(\mathfrak{r}^{(k)} \cap [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]) \subseteq \pi(\mathfrak{r}^{(k)}) \cap [\pi(\mathfrak{g}), \pi(\mathfrak{g})] = \mathfrak{a}' \cap [\mathfrak{g}', \mathfrak{g}'] = \{0\}.$$

Kad bi bilo $k > 0$, onda bismo imali $\mathfrak{r}^{(k)} = [\mathfrak{r}^{(k-1)}, \mathfrak{r}^{(k-1)}] \subseteq [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$, pa bi slijedilo $\pi(\mathfrak{r}^{(k)}) = \{0\}$, a to je suprotno izboru broja k . Zaključujemo da je $k = 0$. To znači da je

$$\pi([\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \cap \mathfrak{r}) = \pi([\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \cap \mathfrak{r}^{(0)}) = \{0\}.$$

Time smo dokazali da je $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \cap Rad(\mathfrak{g}) \subseteq \text{Ker } \pi$ za svaku konačnodimenzionalnu ireducibilnu reprezentaciju π od $\mathfrak{g}$. Odatle slijedi i obrnuta inkluzija $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \cap Rad(\mathfrak{g}) \subseteq Nrad(\mathfrak{g})$, odnosno, vrijedi jednakost $Nrad(\mathfrak{g}) = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \cap Rad(\mathfrak{g})$.

Teorem 2.5.4. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra. Sljedećih je sedam svojstava međusobno ekvivalentno:*

- (a) *Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je reduktivna.*
- (b) *Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ izomorfna je direktnom produktu poluproste Liejeve algebre i komutativne Liejeve algebre.*
- (c) *Prvi izvedeni ideal $\mathfrak{g}^{(1)} = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ je poluprosta Liejeva algebra.*
- (d) *$Nrad(\mathfrak{g}) = \{0\}$.*
- (e) *$Rad(\mathfrak{g}) = Z(\mathfrak{g})$.*
- (f) *Postoji konačnodimenzionalna reprezentacija π od $\mathfrak{g}$ takva da je pridružena simetrična bilinearna forma B_π na $\mathfrak{g} \times \mathfrak{g}$, zadana sa $B_\pi(x, y) = \text{Tr } \pi(x)\pi(y)$, nedegenerirana.*
- (g) *Postoji vjerna konačnodimenzionalna potpuno reducibilna reprezentacija od $\mathfrak{g}$.*

U tom je slučaju $\mathfrak{g} = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \dot{+} Z(\mathfrak{g})$.

Dokaz: (a) $\Rightarrow$ (b). Ako je reprezentacija $ad = ad_{\mathfrak{g}}$ potpuno reducibilna, onda je prema teoremu 1.2.5. Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ direktna suma ad -invarijantnih potprostora $\mathfrak{g}_1, \dots, \mathfrak{g}_k$ takvih da su pripadne subreprezentacije ireducibilne. No to znači da su $\mathfrak{g}_1, \dots, \mathfrak{g}_k$ minimalni ideali u $\mathfrak{g}$. Tada za svaki indeks i Liejeva algebra $\mathfrak{g}_i$ nema netrivialnih ideala. No tada je ili $\mathfrak{g}_i$ prosta Liejeva algebra ili je $\dim \mathfrak{g}_i = 1$, a tada je $\mathfrak{g}_i$ komutativna. Možemo pretpostaviti da je numeracija takva da su za neki j Liejeve algebre $\mathfrak{g}_1, \dots, \mathfrak{g}_j$ proste, a $\mathfrak{g}_{j+1}, \dots, \mathfrak{g}_k$ su jednodimenzionalne. Tada je očito

$$[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] = \mathfrak{g}_1 + \dots + \mathfrak{g}_j \quad \text{i} \quad Z(\mathfrak{g}) = \mathfrak{g}_{j+1} + \dots + \mathfrak{g}_k.$$

Odatle vidimo da vrijedi implikacija (a) $\Rightarrow$ (b) a također i posljednja tvrdnja teorema.

Implikacija (b) $\Rightarrow$ (c) je očita, a također i implikacija (c) $\Rightarrow$ (d), jer $\mathfrak{g}^{(1)} \cap Rad(\mathfrak{g})$ je rješivi ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}^{(1)}$.

(d) $\Rightarrow$ (e). Očito u svakoj Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$ vrijedi $Z(\mathfrak{g}) \subseteq Rad(\mathfrak{g})$, jer je $Z(\mathfrak{g})$ komutativan, dakle, rješiv ideal u $\mathfrak{g}$. S druge strane, iz pretpostavke (d) pomoću prve tvrdnje teorema 2.5.3. dobivamo

$$[\mathfrak{g}, Rad(\mathfrak{g})] \subseteq [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \cap Rad(\mathfrak{g}) = Nrad(\mathfrak{g}) = \{0\}.$$

Dakle, imamo i obrnutu inkluziju $Rad(\mathfrak{g}) \subseteq Z(\mathfrak{g})$.

(e) $\Rightarrow$ (a). Pretpostavimo da je $Rad(\mathfrak{g}) = Z(\mathfrak{g})$. Centar $Z(\mathfrak{g})$ jednak je jezgri adjungirane reprezentacije $ad_{\mathfrak{g}}$ od $\mathfrak{g}$ na $\mathfrak{g}$. Prijelazom na kvocijent po jezgri dobivamo (vjernu) reprezentaciju kvocijentne Liejeve algebre $\mathfrak{g}/Rad(\mathfrak{g})$ na prostoru $\mathfrak{g}$. Prema teoremu 2.2.2. kvocijentna Liejeva algebra $\mathfrak{g}/Rad(\mathfrak{g})$ je poluprosta, pa je po Weylovom teoremu 2.4.4. o potpunoj reducibilnosti reprezentacija od $\mathfrak{g}/Rad(\mathfrak{g})$ na $\mathfrak{g}$ potpuno reducibilna. No to znači da je reprezentacija $ad_{\mathfrak{g}}$ od $\mathfrak{g}$ potpuno reducibilna, odnosno, Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je reduktivna.

(b) $\Rightarrow$ (f). Pretpostavimo da je $\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \times \mathfrak{k}$, gdje je $\mathfrak{h}$ poluprosta, a $\mathfrak{k}$ komutativna Liejeva algebra. Tada je Killingova forma $B_{\mathfrak{h}}$ Liejeve algebre $\mathfrak{h}$ nedegenerirana. Neka je $\{x_1, \dots, x_n\}$ baza od $\mathfrak{k}$. Neka je V n -dimenzionalan vektorski prostor s bazom $e = \{e_1, \dots, e_n\}$. Za linearni operator $A \in \mathfrak{gl}(V)$ označimo sa $A(e)$ matricu tog operatora u bazi e . Neka je $\rho : \mathfrak{k} \rightarrow \mathfrak{gl}(V)$ preslikavanje definirano sa

$$[\rho(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n)](e) = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_n \end{bmatrix}.$$

Tada je ρ reprezentacija Liejeve algebre $\mathfrak{k}$. Nadalje, za pridruženu simetričnu bilinearnu formu B_{ρ} vrijedi $B_{\rho}(x_i, x_j) = \delta_{ij}$. To pokazuje da je forma B_{ρ} nedegenerirana. Sada na Kartezijevom produktu $X = \mathfrak{h} \times V$ definiramo reprezentaciju $\pi = ad_{\mathfrak{h}} \times \rho$ od $\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \times \mathfrak{k}$:

$$\pi(x, y)(y, v) = ((ad_{\mathfrak{h}} x)y, \rho(z)v) = ([x, y], \rho(z)v), \quad x, y \in \mathfrak{h}, \quad z \in \mathfrak{k}, \quad v \in V.$$

Za simetričnu bilinearnu formu B_{π} pridruženu toj reprezentaciji π vrijedi

$$B_{\pi}|_{\mathfrak{h} \times \mathfrak{h}} = B_{\mathfrak{h}}, \quad B_{\pi}|_{\mathfrak{k} \times \mathfrak{k}} = B_{\rho}, \quad B_{\pi}|_{\mathfrak{h} \times \mathfrak{k}} = 0.$$

Kako su forme $B_{\mathfrak{h}}$ i B_{ρ} nedegenerirane, slijedi da je i forma B_{π} nedegenerirana.

(f) $\Rightarrow$ (d). Neka je π konačnodimenzionalna reprezentacija od $\mathfrak{g}$ takva da je pridružena forma B_{π} nedegenerirana. Prema propoziciji 2.1.13. za najveći ideal nilpotencije $\mathfrak{n}_{\pi}$ reprezentacije π vrijedi $B_{\pi}(\mathfrak{n}_{\pi}, \mathfrak{g}) = \{0\}$. Kako je po pretpostavci forma B_{π} nedegenerirana, slijedi $\mathfrak{n}_{\pi}$. Odatle prema drugoj tvrdnji teorema 2.5.3. slijedi da je $Nrad(\mathfrak{g}) = \{0\}$.

Napokon, prema diskusiji prije iskaza propozicije 2.5.1. svojstva (d) i (g) su međusobno ekvivalentna.

Time je teorem 2.5.4. u potpunosti dokazan.

Zadatak 2.5.3. Dokažite da je direktni produkt reduktivnih Liejevih algebri reduktivna Liejeva algebra.

Zadatak 2.5.4. Neka je $\mathfrak{a}$ ideal u reduktivnoj Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$. Dokažite da je

$$\mathfrak{a} = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \cap \mathfrak{a} + Z(\mathfrak{g}) \cap \mathfrak{a}$$

i da je Liejeva algebra $\mathfrak{a}$ reduktivna u $\mathfrak{g}$ i, posebno, reduktivna. Nadalje, dokažite da je i kvocijentna algebra $\mathfrak{g}/\mathfrak{a}$ reduktivna.

Korolar 2.5.5. Za svaku Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ je $Nrad(\mathfrak{g}) = [\mathfrak{g}, Rad(\mathfrak{g})]$.

Dokaz: Neka je $\mathfrak{r} = Rad(\mathfrak{g})$. Prema prvoj tvrdnji teorema 2.5.3. vrijedi $Nrad(\mathfrak{g}) = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \cap \mathfrak{r}$. Kako je ideal $[\mathfrak{g}, \mathfrak{r}]$ očito sadržan i u $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ i u $\mathfrak{r}$, zaključujemo da vrijedi inkluzija $[\mathfrak{g}, \mathfrak{r}] \subseteq Nrad(\mathfrak{g})$.

Stavimo sada $\mathfrak{g}' = \mathfrak{g}/[\mathfrak{g}, \mathfrak{r}]$ i neka je $\varphi : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}'$ kvocijentni epimorfizam. Po propoziciji 2.5.1. tada je $\mathfrak{r}' = \varphi(\mathfrak{r})$ radikal od $\mathfrak{g}'$. Slijedi $[\mathfrak{g}', \mathfrak{r}'] = \varphi([\mathfrak{g}, \mathfrak{r}]) = \{0\}$, odnosno, radikal $\mathfrak{r}'$ Liejeve algebre $\mathfrak{g}'$ jednak je njenom centru. Prema teoremu 2.5.4. Liejeva algebra $\mathfrak{g}'$ je reduktivna i ima vjernu potpuno reducibilnu reprezentaciju π' . Neka je $\pi = \pi' \circ \varphi$ pripadna "podignuta" reprezentacija od $\mathfrak{g}$. Tada je reprezentacija π potpuno reducibilna i

$$Ker \pi = Ker \varphi = [\mathfrak{g}, \mathfrak{r}].$$

Međutim, $Nrad(\mathfrak{g})$ je sadržan u jezgri svake potpuno reducibilne konačnodimenzionalne reprezentacije od $\mathfrak{g}$, pa imamo i obrnutu inkluziju $Nrad(\mathfrak{g}) \subseteq [\mathfrak{g}, \mathfrak{r}]$.

Korolar 2.5.6. Ako je $\varphi : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}'$ epimorfizam Liejevih algebri, onda je $\varphi(Nrad(\mathfrak{g})) = Nrad(\mathfrak{g}')$. Liejeva algebra $\mathfrak{g}'$ je reduktivna ako i samo ako je $Nrad(\mathfrak{g}) \subseteq Ker \varphi$.

Dokaz: Neka su $\mathfrak{r} = Rad(\mathfrak{g})$ i $\mathfrak{r}' = Rad(\mathfrak{g}')$ radikali Liejevih algebri $\mathfrak{g}$ i $\mathfrak{g}'$. Po propoziciji 2.5.1. je $\varphi(\mathfrak{r}) = \mathfrak{r}'$. Neka je $\mathfrak{s}'$ presjek jezgara svih konačnodimenzionalnih ireducibilnih reprezentacija od $\mathfrak{g}'$. Prema korolaru 2.5.5. primijenjenom na Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ i $\mathfrak{g}'$ imamo

$$Nrad(\mathfrak{g}') = [\mathfrak{g}', \mathfrak{r}'] = [\varphi(\mathfrak{g}), \varphi(\mathfrak{r})] = \varphi([\mathfrak{g}, \mathfrak{r}]) = \varphi(Nrad(\mathfrak{g})).$$

Druga je tvrdnja neposredna posljedica prve tvrdnje i karakterizacije (d) u teoremu 2.5.4.

Zadatak 2.5.5. * Za konačnodimenzionalnu reprezentaciju π Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ neka je B_π pridružena bilinearna simetrična forma

$$B_\pi(x, y) = \text{Tr } \pi(x)\pi(y), \quad x, y \in \mathfrak{g},$$

i

$$Rad B_\pi = \{x \in \mathfrak{g}; B_\pi(x, y) = 0 \ \forall y \in \mathfrak{g}\}$$

njen (lijevi i desni) radikal. Dokažite da je

$$Nrad(\mathfrak{g}) = \bigcap \{Rad B_\pi; \pi \text{ konačnodimenzionalna reprezentacija od } \mathfrak{g}\}. \quad (2.4)$$

Uputa: Koristite tvrdnju (c) propozicije 2.1.3. i drugu tvrdnju teorema 2.5.3. da zaključite da je $Nrad(\mathfrak{g})$ sadržan u svakom $Rad B_\pi$, dakle, da je lijeva strana u (2.4) sadržana u desnoj strani. Za dokaz obrnute inkluzije uočite da kvocijentna Liejeva algebra $\mathfrak{g}' = \mathfrak{g}/Nrad(\mathfrak{g})$ ima vjernu konačnodimenzionalnu potpuno reducibilnu reprezentaciju. Sada iskoristite teorem 2.5.4. da zaključite da Liejeva algebra $\mathfrak{g}'$ ima konačnodimenzionalnu reprezentaciju ρ takvu da je forma B_ρ na $\mathfrak{g}' \times \mathfrak{g}'$ nedegenerirana. Sada pokažite da za "podignutu" reprezentaciju π od $\mathfrak{g}$, tj. za

$$\pi(x) = \rho(x + Nrad(\mathfrak{g})), \quad x \in \mathfrak{g},$$

vrijedi $Rad B_\pi = Nrad(\mathfrak{g})$.

2.6 Dodatak: bilinearne forme

Neka su V i W vektorski prostori nad istim poljem K . **Bilinearna forma** na $V \times W$ je preslikavanje $F : V \times W \rightarrow K$ koje je bilinearно, tj. linearno je u prvoj varijabli

$$F(\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2, w) = \alpha_1 F(v_1, w) + \alpha_2 F(v_2, w) \quad \forall \alpha_1, \alpha_2 \in K, \quad \forall v_1, v_2 \in V, \quad \forall w \in W,$$

i u drugoj varijabli

$$F(v, \alpha_1 w_1 + \alpha_2 w_2) = \alpha_1 F(v, w_1) + \alpha_2 F(v, w_2) \quad \forall \alpha_1, \alpha_2 \in K, \quad \forall v \in V, \quad \forall w_1, w_2 \in W.$$

Naravno, tada vrijedi

$$F\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i v_i, \sum_{j=1}^m \beta_j w_j\right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_i \beta_j F(v_i, w_j)$$

$$\forall n, m \in \mathbb{N}, \quad \forall \alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta_1, \dots, \beta_m \in K, \quad \forall v_1, \dots, v_n \in V, \quad \forall w_1, \dots, w_m \in W.$$

Skup svih bilinearnih formi $V \times W \rightarrow K$ označavamo sa $L(V \times W, K)$ i to je vektorski prostor nad K s operacijama

$$(F + G)(v, w) = F(v, w) + G(v, w), \quad (\alpha F)(v, w) = \alpha F(v, w),$$

$$F, G \in L(V \times W, K), \quad \alpha \in K, \quad v \in V, \quad w \in W.$$

Za formu F kažemo da je **slijeva nedegenerirana** ako vrijedi

$$v \in V, \quad F(v, w) = 0 \quad \forall w \in W \quad \implies \quad v = 0,$$

a **zdesna nedegenerirana** ako vrijedi

$$w \in W, \quad F(v, w) = 0 \quad \forall v \in V \quad \implies \quad w = 0.$$

Kažemo da je forma F **nedegenerirana** ako je nedegenerirana i slijeva i zdesna.

U daljnjem promatramo isključivo bilinearne forme na konačnodimenzionalnim vektorskim prostorima. Ako je $e = \{e_1, \dots, e_n\}$ baza vektorskog prostora V i $f = \{f_1, \dots, f_m\}$ baza vektorskog prostora W **matrica bilinearne forme** $F : V \times W \rightarrow K$ u paru baza (e, f) je matrica $F(e, f)$ tipa $n \times m$ čiji je matricni element na mjestu (i, j) jednak $F(e_i, f_j)$. Očito je $F \mapsto F(e, f)$ izomorfizam vektorskog prostora $L(V \times W, K)$ svih bilinearnih formi $V \times W \rightarrow K$ na vektorski prostor $M_{n,m}(K)$ svih matrica formata $n \times m$ s koeficijentima iz K .

Propozicija 2.6.1. *Neka je $e = \{e_1, \dots, e_n\}$ baza vektorskog prostora V , $f = \{f_1, \dots, f_m\}$ baza vektorskog prostora W i $F \in L(V \times W, K)$.*

- (a) *Forma F je slijeva nedegenerirana ako i samo ako je rang matrice $F(e, f)$ jednak n .*
- (b) *Forma F je zdesna nedegenerirana ako i samo ako je rang matrice $F(e, f)$ jednak m .*
- (c) *Ako je $n = m$, tj. $\dim V = \dim W$, forma F je slijeva nedegenerirana ako i samo ako je ona zdesna nedegenerirana. To je ispunjeno ako i samo ako je matrica forme F u nekom (u svakom) paru baza regularna.*
- (d) *Ako je forma F nedegenerirana onda je $n = m$.*

Dokaz: (a) Pretpostavimo da je forma F slijeva nedegenerirana. Neka je $F_i \in M_{1,m}(K)$ i -ti redak matrice $F(e, f)$, tj.

$$F_i = [F(e_i, f_1) \quad F(e_i, f_2) \quad \cdots \quad F(e_i, f_m)], \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Neka su $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \in K$ takvi da je

$$\lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2 + \cdots + \lambda_n F_n = 0. \quad (2.5)$$

To znači da vrijedi

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i F(e_i, f_j) = 0 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}.$$

To znači da za vektor

$$v = \lambda_1 e_1 + \lambda_2 e_2 + \cdots + \lambda_n e_n \in V \quad (2.6)$$

vrijedi

$$F(v, f_j) = 0 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}. \quad (2.7)$$

Kako je $\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ baza prostora W , Zaključujemo da je $F(v, w) = 0 \quad \forall w \in W$. Budući da je forma F po pretpostavci slijeva nedegenerirana, slijedi $v = 0$, a odatle je $\lambda_1 = \lambda_2 = \cdots = \lambda_n = 0$. Time je dokazano da su reci $F_1, F_2, \dots, F_n$ matrice $F(e, f)$ linearno nezavisni. Dakle, rang te matrice jednak je n .

Obratno, pretpostavimo da je rang matrice $F(e, f)$ jednak n . To znači da su reci $F_1, F_2, \dots, F_n$ te matrice linearno nezavisni. Neka je $v \in V$ takav da je $F(v, w) = 0 \quad \forall w \in W$. Tada, posebno, vrijedi (3). Neka je (2) prikaz vektora v u bazi e . Tada iz (3) slijedi (1), a kako su po pretpostavci reci $F_1, F_2, \dots, F_n$ matrice $F(e, f)$ linearno nezavisni, slijedi da je $\lambda_1 = \lambda_2 = \cdots = \lambda_n = 0$, odnosno, $v = 0$. Time je dokazano da je forma F slijeva nedegenerirana.

Tvrđnja (b) dokazuje se potpuno analogno tvrdnji (a) promatranjem stupaca matrice $F(e, f)$, a tvrdnje (c) i (d) neposredne su posljedice tvrdnji (a) i (b).

Propozicija 2.6.2. *Neka su V i W konačnodimenzionalni vektorski prostori nad poljem K i neka je $F : V \times W \rightarrow K$ nedegenerirana bilinearna forma.*

(a) *Za svaki linearan funkcional $\varphi \in V^*$ postoji jedinstven vektor $w \in W$ takav da je*

$$\varphi(v) = F(v, w) \quad \forall v \in V.$$

Tako definirano preslikavanje $\varphi \mapsto w$ je izomorfizam prostora V^ na prostor W .*

(b) *Za svaki linearan funkcional $\psi \in W^*$ postoji jedinstven vektor $v \in V$ takav da je*

$$\psi(w) = F(v, w) \quad \forall w \in W.$$

Tako definirano preslikavanje $\psi \mapsto v$ je izomorfizam prostora W^ na prostor V .*

(c) *Za svaki linearan operator $A : V \rightarrow V$ postoji jedinstven linearan operator $A^F : W \rightarrow W$ takav da vrijedi*

$$F(Av, w) = F(v, A^F w) \quad \forall v \in V \quad i \quad \forall w \in W.$$

Preslikavanje $A \mapsto A^F$ je izomorfizam prostora $L(V)$ na prostor $L(W)$ i vrijedi

$$(A_1 A_2)^F = A_2^F A_1^F \quad \forall A_1, A_2 \in L(V).$$

- (d) Za svaki linearan operator $B : W \rightarrow W$ postoji jedinstven linearan operator ${}^FB : V \rightarrow V$ takav da vrijedi

$$F(v, Bw) = F({}^FBv, w) \quad \forall v \in V \quad i \quad w \in W.$$

Preslikavanje $B \mapsto {}^FB$ je izomorfizam prostora $L(W)$ na prostor $L(V)$ i vrijedi

$$F(B_1 B_2) = {}^FB_2 {}^FB_1 \quad \forall B_1, B_2 \in L(W).$$

- (e) Izomorfizmi $A \mapsto A^F$ sa $L(V)$ na $L(W)$ i $B \mapsto {}^FB$ sa $L(W)$ na $L(V)$ su međusobno inverzni.

Dokaz: (a) Za $w \in W$ definiramo preslikavanje $\varphi_w : V \rightarrow K$ sa

$$\varphi_w(v) = F(v, w), \quad v \in V.$$

Tada je očito (zbog linearnosti forme F u prvoj varijabli) φ_w linearan funkcional na prostoru V , tj. $\varphi_w \in V^*$. Nadalje, iz linearnosti forme F u drugoj varijabli izvodi se da je preslikavanje $w \mapsto \varphi_w$ sa W u V^* linearno. Iz nedegeneriranosti forme F (zdesna) slijedi da je to preslikavanje injektivno:

$$\varphi_w = 0 \quad \implies \quad F(v, w) = \varphi_w(v) = 0 \quad \forall v \in V \quad \implies \quad w = 0.$$

Po teoremu o rangui i defektu primijenjenom na operator $w \mapsto \varphi_w$ slijedi da je njegov rang jednak $\dim W$. Međutim, po tvrdnji (d) propozicije 2.6.1. to je jednako $\dim V$, dakle, $\dim V^*$. Prema tome, preslikavanje $w \mapsto \varphi_w$ je izomorfizam prostora W na prostor V^* . Time je dokazana tvrdnja (a).

Tvrdnja (b) dokazuje se sasvim analogno ili primjenom tvrdnje (a) na formu $F^0 \in L(W \times V, K)$ definiranu sa $F^0(w, v) = F(v, w)$, $v \in V$, $w \in W$.

- (c) Neka je $A \in L(V)$. Za $w \in W$ definiramo $\psi_w \in V^*$ sa

$$\psi_w(v) = F(Av, w), \quad v \in V.$$

Prema tvrdnji (a) postoji jedinstven vektor iz W , koji ćemo označiti sa $A^F(w)$, takav da je

$$F(Av, w) = \psi_w(v) = F(v, A^F(w)) \quad \forall v \in V.$$

Iz linearnosti forme F u drugoj varijabli slijedi linearnost preslikavanja $A^F : W \rightarrow W$. Time je dokazana egzistencija u tvrdnji (c). Jedinstvenost slijedi iz nedegeneriranosti forme F zdesna: ako i $B \in L(W)$ ima svojstvo da je $F(Av, w) = F(v, Bw) \quad \forall v \in V$ i $\forall w \in W$, onda za $w \in W$ i za svaki $v \in V$ vrijedi $F(v, A^F w - Bw) = 0$, pa slijedi $A^F w - Bw = 0$, a to zbog proizvoljnosti vektora $w \in W$ znači $B = A^F$.

Preslikavanje $A \mapsto A^F$ sa $L(V)$ u $L(W)$ je očito linearno. Nadalje, ono je injektivno, jer imamo sljedeći niz implikacija

$$A^F = 0 \implies F(Av, w) = F(v, A^F w) = 0 \quad \forall v \in V \text{ i } \forall w \in W \implies Av = 0 \quad \forall v \in V \implies A = 0;$$

pri tome smo kod druge implikacije koristili nedegeneriranost forme F slijeva. Budući da je $\dim V = \dim W$, vrijedi $\dim L(V) = \dim L(W)$, pa je po teoremu o rangui i defektu preslikavanje $A \mapsto A^F$ izomorfizam sa $L(V)$ na $L(W)$.

Napokon, za $A_1, A_2 \in L(V)$ imamo za proizvoljne $v \in V$ i $w \in W$:

$$F(v, (A_1 A_2)^F w) = F(A_1 A_2 v, w) = F(A_2 v, A_1^F w) = F(v, A_2^F A_1^F w).$$

Odatle i iz nedegeneriranosti forme F zdesna slijedi $(A_1 A_2)^F = A_2^F A_1^F$.

Tvrdnja (d) dokazuje se sasvim analogno.

- (e) Za $A \in L(V)$ i za proizvoljne $v \in V$ i $w \in W$ imamo

$$F(Av, w) = F(v, A^F w) = F({}^F(A^F) v, w).$$

Odatle i iz nedegeneriranosti forme F slijeva slijedi ${}^F(A^F) = A$. Sasvim analogno za svaki $B \in L(W)$ nalazimo da je $({}^FB)^F = B$. Time je dokazano da su izomorfizmi $A \mapsto A^F$ i $B \mapsto {}^FB$ međusobno inverzni.

Neka je $F \in L(V \times W, K)$ bilinearna forma. Za potprostor X prostora V definiramo njegov **desni F -ortogonal** ${}^F X$:

$${}^F X = \{w \in W; F(x, w) = 0 \quad \forall x \in X\}.$$

To je očito potprostor od W . Analogno, za svaki potprostor Y prostora W definiramo njegov **lijevi F -ortogonal**. To je potprostor Y^F od V zadan sa

$$Y^F = \{v \in V; F(v, y) = 0 \quad \forall y \in Y\}.$$

Desni F -ortogonal ${}^F V$ čitavog prostora V zove se **desni radikal forme F** ; analogno, W^F je **lijevi radikal forme F** . Forma F je zdesna nedegenerirana ako i samo ako je njen desni radikal ${}^F V$ jednak $\{0\}$, a slijeva nedegenerirana ako i samo ako je njen lijevi radikal W^F jednak $\{0\}$.

Propozicija 2.6.3. *Neka je $F \in L(V \times W, K)$ nedegenerirana bilinearna forma. Za svaki potprostor X od V je $\dim {}^F X = \dim V - \dim X$, a za svaki potprostor Y od W je $\dim Y^F = \dim W - \dim Y$.*

Dokaz: Neka je $w \mapsto \varphi_w$ izomorfizam sa W na V^* iz dokaza tvrdnje (a) propozicije 2.6.2., tj.

$$\varphi_w(v) = F(v, w), \quad v \in V, \quad w \in W.$$

Tada vrijedi

$$w \in {}^F X \quad \Longleftrightarrow \quad \varphi_w \in X^0 = \{\varphi \in V^*; \varphi(x) = 0 \quad \forall x \in X\}.$$

Dakle, $w \mapsto \varphi_w$ je izomorfizam sa ${}^F X$ na X^0 . No tada je $\dim {}^F X = \dim X^0 = \dim V - \dim X$. Sasvim analogno dokazuje se i druga jednakost.

Neka su $e = \{e_1, \dots, e_n\}$ i $e' = \{e'_1, \dots, e'_n\}$ baze prostora V i $f = \{f_1, \dots, f_m\}$ i $f' = \{f'_1, \dots, f'_m\}$ baze prostora W . Nadalje, neka su $A \in GL(V)$ operator koji povezuje bazu e s bazom e' i $B \in GL(W)$ operator koji povezuje bazu f s bazom f' :

$$Ae_i = e'_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad Bf_j = f'_j, \quad j = 1, \dots, m.$$

Označimo sa $A(e) = [\alpha_{ip}]$ matricu operatora A u bazi e i sa $B(f) = [\beta_{jq}]$ matricu operatora B u bazi f :

$$e'_p = Ae_p = \sum_{i=1}^n \alpha_{ip} e_i, \quad p = 1, \dots, n, \quad f'_q = Af_q = \sum_{j=1}^m \beta_{jq} f_j, \quad q = 1, \dots, m.$$

Tada imamo za bilo koje $p \in \{1, \dots, n\}$ i $q \in \{1, \dots, m\}$:

$$F(e'_p, f'_q) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ip} \beta_{jq} F(e_i, f_j).$$

To pokazuje da je

$$F(e', f') = A(e)^t F(e, f) B(f).$$

Pri tome za bilo koju matricu $C \in M_{k\ell}(K)$ sa $C^t \in M_{\ell k}(K)$ označavamo njoj transponiranu matricu. Kako su matrice $A(e)$ (dakle i $A(e)^t$) i $B(f)$ regularne, iz ove se jednakosti vidi da je rang matrice $F(e, f)$ jednak rang matrice $F(e', f')$. Drugim riječima, rang matrice bilinearne forme F ne ovisi o izboru baza u prostorima V i W . Taj se rang zove **rang bilinearne forme F** i označava sa $r(F)$.

Propozicija 2.6.4. *Neka su V i W konačnodimenzionalni vektorski prostori nad istim poljem K i $F \in L(V \times W, K)$ bilinearna forma.*

- (a) *Neka su X i Y potprostori od V i W takvi da je $V = W^F \dot{+} X$ i $W = {}^FV \dot{+} Y$. Tada je restrikcija $F|X \times Y$ nedegenerirana bilinearna forma.*
- (b) *Vrijedi $\dim V = \dim W^F + r(F)$ i $\dim W = \dim {}^FV + r(F)$.*

Dokaz: (a) Pretpostavimo da je $x \in X$ takav da je $F(x, y) = 0 \ \forall y \in Y$. Budući da vrijedi i $F(x, y) = 0 \ \forall y \in {}^FV$, i budući da je $W = {}^FV \dot{+} Y$, slijedi da je $F(x, y) = 0 \ \forall y \in W$. No tada je $x \in W^F$, a kako je $X \cap W^F = \{0\}$, zaključujemo da je $x = 0$. To pokazuje da je forma $F|X \times Y$ slijeva nedegenerirana. Sasvim analogno dokazuje se da je ta forma i zdesna nedegenerirana.

(b) Izaberimo potprostore X od V i Y od W takve da je $V = W^F \dot{+} X$ i $W = {}^FV \dot{+} Y$. Zbog nedegeneriranosti forme $F|X \times Y$, prema tvrdnji (d) propozicije 2.6.1. vrijedi $\dim X = \dim Y$; taj broj označimo sa r i neka su $n = \dim V$ i $m = \dim W$. Izaberimo sada bazu $\{e_1, \dots, e_r\}$ od X , bazu $\{e_{r+1}, \dots, e_n\}$ od W^F , bazu $\{f_1, \dots, f_r\}$ od Y i bazu $\{f_{r+1}, \dots, f_m\}$ od FV . Tada je $\{e_1, \dots, e_n\}$ baza prostora V i $\{f_1, \dots, f_m\}$ je baza od W . U tom paru baza forma F ima matricu kojoj je u gornjem lijevom $r \times r$ bloku matrica nedegenerirane forme $F|X \times Y$, dakle, matrica iz $GL(r, K)$, a svi su ostali elementi te matrice 0. To pokazuje da je $r(F) = r$, a odatle je

$$r(F) = \dim X = \dim V - \dim W^F \quad \text{i} \quad r(F) = \dim Y = \dim W - \dim {}^FV.$$

Propozicija 2.6.5. *Neka je $F \in L(V \times V, K)$ nedegenerirana simetrična ili antisimetrična bilinearna forma i neka je U potprostor od V . Sljedeća su svojstva međusobno ekvivalentna:*

- (a) *Restrikcija $F|U \times U$ je nedegenerirana.*
- (b) *$V = U + U^F$.*
- (c) *$U \cap U^F = \{0\}$.*
- (d) *Restrikcija $F|U^F \times U^F$ je nedegenerirana.*

Dokaz: Prije svega, uočimo da za simetričnu ili antisimetričnu formu $F \in L(V \times V, K)$ za svaki potprostor U od V vrijedi $U^F = {}^FU$. Kako je forma F nedegenerirana, po propoziciji 2.6.3. za svaki potprostor U od V vrijedi $\dim V = \dim U + \dim U^F$. Prema tome, svojstva (b) i (c) su međusobno ekvivalentna. Iz tih svojstava slijedi svojstvo (a). Doista, ako je $u \in U$ takav da je $F(u, x) = 0 \ \forall x \in U$, onda zbog (b) vrijedi $F(u, x) = 0 \ \forall x \in V$, pa zbog nedegeneriranosti forme F slijedi $u = 0$. Pretpostavimo sada da vrijedi svojstvo (a). Tada je očito $U \cap U^F = \{0\}$, tj. vrijedi (c). Time je dokazano da su svojstva (a), (b) i (c) međusobno ekvivalentna.

Za svaki potprostor U od V je očito $U \subseteq (U^F)^F$. Nadalje, iz propozicije 2.6.3. primijenjene najprije na potprostor $X = U^F$ a zatim na potprostor $X = U$ dobivamo

$$\dim (U^F)^F = \dim V - \dim U^F = \dim V - (\dim V - \dim U) = \dim U.$$

Dakle, za svaki potprostor U od V je $U = (U^F)^F$. Primijenimo li dokazano na potprostor U^F nalazimo da je svojstvo (d) ekvivalentno npr. svojstvu (c).

Poglavlje 3

TEŽINE I KORIJENI

3.1 Nilpotentne Liejeve algebre operatora

Neka je V konačnodimenzijski vektorski prostor nad poljem K (karakteristike 0) i neka je x linearan operator na prostoru V . Prisjetimo se nekih rezultata iz odjeljka 1.3. Prije svega, imamo Fittingovu dekompoziciju prostora V u odnosu na operator x (teorem 1.3.2.):

$$V = V_{(0)}(x) \dot{+} V_*(x), \quad V_{(0)}(x) = \bigcup_{k \in \mathbb{Z}_+} \text{Ker } x^k, \quad V_*(x) = \bigcap_{k \in \mathbb{N}} \text{Im } x^k. \quad (3.1)$$

Pri tome je naravno za neki $p \in \mathbb{N}$ $V_{(0)}(x) = \text{Ker } x^p$ i $V_*(x) = \text{Im } x^p$.

Nadalje, za $\lambda \in Sp(x)$ definirali smo pripadni svojstveni potprostor i korijenski potprostor od V u odnosu na operator x :

$$V_\lambda(x) = \{v \in V; xv = \lambda v\} = \text{Ker } (\lambda I - x) \quad \text{i} \quad V_{(\lambda)}(x) = V_{(0)}(\lambda I - x) = \bigcup_{k \in \mathbb{Z}_+} \text{Ker } (\lambda I - x)^k.$$

Korijenski potprostori $V_{(\lambda)}(x)$ čine direktnu sumu, a ako je operator x rascjepiv, tj. ako se njegov minimalni polinom razlaže nad K , ta je direktna suma jednaka čitavom prostoru V :

$$V = \sum_{\lambda \in Sp(x)} \dot{+} V_{(\lambda)}(x). \quad (3.2)$$

U ovom ćemo odjeljku generalizirati te rezultate na slučaj kad imamo ne samo jedan operator nego Liejevu podalgebru $\mathfrak{g}$ od $\mathfrak{gl}(V)$ koja je nilpotentna.

Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$. Ako je $v \in V \setminus \{0\}$ svojstven vektor svih operatora $x \in \mathfrak{g}$, onda za neku funkciju $\alpha : \mathfrak{g} \rightarrow K$ vrijedi

$$xv = \alpha(x)v \quad \forall x \in \mathfrak{g}.$$

Tada je α jednodimenzijska reprezentacija od $\mathfrak{g}$, a to znači da je α linearan funkcional na $\mathfrak{g}$ i da je $\alpha([x, y]) = \alpha(x)\alpha(y) - \alpha(y)\alpha(x) = 0 \quad \forall x, y \in \mathfrak{g}$, odnosno, $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] \subseteq \text{Ker } \alpha$. Za svaki takav linearan funkcional α skup svih pripadnih svojstvenih vektora označavamo sa

$$V_\alpha(\mathfrak{g}) = \{v \in V; xv = \alpha(x)v \quad \forall x \in \mathfrak{g}\}.$$

Ako je $V_\alpha(\mathfrak{g}) \neq \{0\}$, linearni funkcional α zove se **težina** $\mathfrak{g}$ -modula V , a $V_\alpha(\mathfrak{g})$ se zove **težinski potprostor** od V . Naravno, težinski potprostor je $\mathfrak{g}$ -podmodul. Oponašamo sada situaciju s jednim operatorom na prostoru V pa definiramo pripadni **korijenski potprostor**

$$V_{(\alpha)}(\mathfrak{g}) = \{v \in V; \forall x \in \mathfrak{g} \exists k \in \mathbb{N} (x - \alpha(x)I)^k v = 0\}.$$

U stvari, $V_{(\alpha)}(\mathfrak{g})$ je unija rastućeg niza $\mathfrak{g}$ -podmodula $(V_{\alpha}^k(\mathfrak{g}))_{k \in \mathbb{Z}_+}$ definiranih sa

$$V_{\alpha}^k(\mathfrak{g}) = \{v \in V; (x - \alpha(x)I)^k v = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g}\} = \bigcap_{x \in \mathfrak{g}} \text{Ker} [(x - \alpha(x)I)^k],$$

tj.

$$V_{\alpha}^0(\mathfrak{g}) = \{0\}, \quad V_{\alpha}^1(\mathfrak{g}) = V_{\alpha}(\mathfrak{g}), \quad V_{\alpha}^{k+1}(\mathfrak{g}) = \{v \in V; (x - \alpha(x)I)v \in V_{\alpha}^k(\mathfrak{g}) \ \forall x \in \mathfrak{g}\}.$$

Prema tome, svaki $V_{(\alpha)}(\mathfrak{g})$ je $\mathfrak{g}$ -podmodul od V .

Imamo sljedeću generalizaciju tvrdnje (a) leme 1.3.1.:

Lema 3.1.1. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$ i $\alpha \in \mathfrak{g}^*$. Ako za neki $k \in \mathbb{Z}_+$ vrijedi $V_{\alpha}^k(\mathfrak{g}) = V_{\alpha}^{k+1}(\mathfrak{g})$ onda je $V_{\alpha}^k(\mathfrak{g}) = V_{\alpha}^m(\mathfrak{g}) \ \forall m \geq k$.*

Dokaz: Dovoljno je dokazati da iz $V_{\alpha}^k(\mathfrak{g}) = V_{\alpha}^{k+1}(\mathfrak{g})$ slijedi $V_{\alpha}^{k+1}(\mathfrak{g}) = V_{\alpha}^{k+2}(\mathfrak{g})$. U stvari, zbog toga što je $V_{\alpha}^{k+1}(\mathfrak{g}) \subseteq V_{\alpha}^{k+2}(\mathfrak{g})$ dovoljno je dokazati inkluziju $V_{\alpha}^{k+2}(\mathfrak{g}) \subseteq V_{\alpha}^{k+1}(\mathfrak{g})$. Dakle, neka je $v \in V_{\alpha}^{k+2}(\mathfrak{g})$. Tada je $(x - \alpha(x))v \in V_{\alpha}^{k+1}(\mathfrak{g}) \ \forall x \in \mathfrak{g}$. Po pretpostavci je $V_{\alpha}^{k+1}(\mathfrak{g}) = V_{\alpha}^k(\mathfrak{g})$, pa imamo $(x - \alpha(x))v \in V_{\alpha}^k(\mathfrak{g})$, a to znači da je $v \in V_{\alpha}^{k+1}(\mathfrak{g})$. Time je dokazana inkluzija $V_{\alpha}^{k+2}(\mathfrak{g}) \subseteq V_{\alpha}^{k+1}(\mathfrak{g})$.

Lema 3.1.2. *Za Liejevu podalgebru $\mathfrak{g}$ od $\mathfrak{gl}(V)$ i $\alpha \in \mathfrak{g}^*$ vrijedi*

$$V_{(\alpha)}(\mathfrak{g}) = \bigcap_{x \in \mathfrak{g}} V_{(\alpha(x))}(x).$$

Dokaz: Doista

$$V_{(\alpha)}(\mathfrak{g}) = \bigcup_{k \in \mathbb{Z}_+} V_{\alpha}^k(\mathfrak{g}) = \bigcup_{k \in \mathbb{Z}_+} \bigcap_{x \in \mathfrak{g}} \text{Ker} [(x - \alpha(x)I)^k] = \bigcap_{x \in \mathfrak{g}} \bigcup_{k \in \mathbb{Z}_+} \text{Ker} [(x - \alpha(x)I)^k] = \bigcap_{x \in \mathfrak{g}} V_{(\alpha(x))}(x).$$

Promatrat ćemo sada slučaj $\alpha = 0$. To će razmatranje u slučaju nilpotentne Liejeve podalgebre $\mathfrak{g}$ od $\mathfrak{gl}(V)$ voditi na generalizaciju Fittingove dekompozicije (3.1) prostora V u odnosu na jedan linearan operator. Definiramo induktivno sljedeći padajući niz $\mathfrak{g}$ -podmodula $(V_*^k(\mathfrak{g}))_{k \in \mathbb{Z}_+}$ od V :

$$V_*^0(\mathfrak{g}) = V, \quad V_*^{k+1}(\mathfrak{g}) = \text{span} \{xv; x \in \mathfrak{g}, v \in V_*^k(\mathfrak{g})\}, \quad k \in \mathbb{Z}_+.$$

Dakle,

$$V_*^0(\mathfrak{g}) = V, \quad V_*^k(\mathfrak{g}) = \text{span} \{x_1 \cdots x_k v; x_1, \dots, x_k \in \mathfrak{g}, v \in V\}, \quad k \in \mathbb{N}. \quad (3.3)$$

I tvrdnja (b) leme 1.3.1. se generalizira:

Lema 3.1.3. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$. Ako za neki $k \in \mathbb{Z}_+$ vrijedi $V_*^k(\mathfrak{g}) = V_*^{k+1}(\mathfrak{g})$, onda je $V_*^k(\mathfrak{g}) = V_*^m(\mathfrak{g}) \ \forall m \geq k$.*

Dokaz: Kao kod leme 3.1.1. dovoljno je dokazati da iz jednakosti $V_*^k(\mathfrak{g}) = V_*^{k+1}(\mathfrak{g})$ slijedi jednakost $V_*^{k+1}(\mathfrak{g}) = V_*^{k+2}(\mathfrak{g})$. No to je očigledno:

$$V_*^{k+1}(\mathfrak{g}) = \text{span} \{xv; x \in \mathfrak{g}, v \in V_*^k(\mathfrak{g})\} = \text{span} \{xv; x \in \mathfrak{g}, v \in V_*^{k+1}(\mathfrak{g})\} = V_*^{k+2}(\mathfrak{g}).$$

Za Liejevu podalgebru $\mathfrak{g}$ od $\mathfrak{gl}(V)$ definiramo

$$V_*(\mathfrak{g}) = \bigcap_{k \in \mathbb{Z}_+} V_*^k(\mathfrak{g}).$$

Naravno, zbog konačnodimenzijskosti je $V_*(\mathfrak{g}) = V_*^k(\mathfrak{g})$ za neki k .

Za generalizaciju Fittingove dekompozicije na nilpotentne Liejeve algebre operatora trebaju nam sljedeće dvije leme.

Lema 3.1.4. Za bilo koje $x, y \in \mathfrak{gl}(V)$ i bilo koji $n \in \mathbb{Z}_+$ vrijede sljedeće dvije jednakosti:

$$x^n y = \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} [(ad x)^j y] x^{n-j}, \quad (3.4)$$

$$y x^n = \sum_{j=0}^n (-1)^j \binom{n}{j} x^{n-j} [(ad x)^j y]. \quad (3.5)$$

Dokaz se provodi indukcijom po $n \in \mathbb{Z}_+$. Baza indukcije $n = 0$ je trivijalna za obje tvrdnje. Pretpostavimo da za neki $n \in \mathbb{Z}_+$ vrijedi (3.4). Sada ćemo jednakost

$$xab = abx + [x, ab] = abx + [x, a]b + a[x, b] \quad \forall x, a, b \in \mathfrak{gl}(V)$$

primijeniti na slučaj $a = (ad x)^j y$ i $b = x^{n-j}$. Tada je $[x, a] = (ad x)^{j+1} y$ i $[x, b] = 0$, pa imamo

$$x[(ad x)^j y] x^{n-j} = [(ad x)^j y] x^{n-j+1} + [(ad x)^{j+1} y] x^{n-j},$$

pa nalazimo

$$\begin{aligned} x^{n+1} y &= x x^n y = x \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} [(ad x)^j y] x^{n-j} = \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} [(ad x)^j y] x^{n-j+1} + \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} [(ad x)^{j+1} y] x^{n-j} = \\ &= \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} [(ad x)^j y] x^{n+1-j} + \sum_{j=1}^{n+1} \binom{n}{j-1} [(ad x)^j y] x^{n+1-j} = \\ &= y x^{n+1} + \sum_{j=1}^n \left(\binom{n}{j} + \binom{n}{j-1} \right) [(ad x)^j y] x^{n+1-j} + (ad x)^{n+1} y = \sum_{j=0}^{n+1} \binom{n+1}{j} [(ad x)^j y] x^{n+1-j}. \end{aligned}$$

Time je proveden korak indukcije i jednakost (3.4) je dokazana.

Zadatak 3.1.1. Dokažite jednakost (3.5).

Lema 3.1.5. Neka su $x, y \in \mathfrak{gl}(V)$ takvi da je $(ad x)^\ell y = 0$ za neki $\ell \in \mathbb{N}$. Tada su Fittingovi potprostori $V_{(0)}(x)$ i $V_*(x)$ u odnosu na operator x invarijantni s obzirom na operator y .

Dokaz: Za $v \in V_{(0)}(x)$ je $x^k v = 0$ za neki $k \in \mathbb{N}$, pa za $n = \ell + k - 1$ prema (3.4) nalazimo

$$x^n y v = \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} [(ad x)^j y] x^{n-j} v = 0,$$

jer za $j < \ell$ je $n - j \geq k$, pa je $x^{n-j} v = 0$, a za $j \geq \ell$ je $(ad x)^j y = 0$. Dakle, vrijedi $y v \in V_{(0)}(x)$.

Neka je sada $v \in V_*(x)$. Neka je $k \in \mathbb{N}$ takav da je $V_*(x) = \text{Im } x^k$. Tada je $V_*(x) = \text{Im } x^n$ za $n = \ell + k - 1 \geq k$, dakle, postoji $w \in V$ takav da je $v = x^n w$. Sada prema (3.5) imamo

$$y v = y x^n w = \sum_{j=0}^n (-1)^j \binom{n}{j} x^{n-j} [(ad x)^j y] w = \sum_{j=0}^{\ell-1} (-1)^j \binom{n}{j} x^{n-j} [(ad x)^j y] w \quad (3.6)$$

jer je $(ad x)^j y = 0$ za $j \geq \ell$. Međutim, za $j \leq \ell - 1$ vrijedi $n - j = \ell + k - 1 - j \geq k$, pa slijedi $\text{Im } x^{n-j} = V_*(x)$. To znači da su u (3.6) svi članovi u sumi s desne strane elementi od $V_*(x)$. Zaključujemo da je $y v \in V_*(x)$ i time je dokazano da je i potprostor $V_*(x)$ invarijantan s obzirom na operator y .

Teorem 3.1.6. (Fittingova dekompozicija za nilpotentne Liejeve algebre operatora) *Za nilpotentnu Liejevu podalgebru $\mathfrak{g}$ od $\mathfrak{gl}(V)$ vrijedi*

$$V = V_{(0)}(\mathfrak{g}) \dot{+} V_*(\mathfrak{g}).$$

Nadalje,

$$V_*(\mathfrak{g}) = \sum_{x \in \mathfrak{g}} V_*(x).$$

Dokaz: Pretpostavimo najprije da je svaki operator $x \in \mathfrak{g}$ nilpotentan. Tada je $V_{(0)}(x) = V$ za svaki $x \in \mathfrak{g}$, pa je prema lemi 3.1.2.

$$V_{(0)}(\mathfrak{g}) = \bigcap_{x \in \mathfrak{g}} V_{(0)}(x) = V.$$

Nadalje, tada je $V_*(x) = \{0\}$, pa je i $\sum_{x \in \mathfrak{g}} V_*(x) = \{0\}$. Prema Engelovom teoremu, odnosno, prema njegovoj posljedici 2.1.4., postoji $s \in \mathbb{N}$ takav da je $x_1 \cdots x_s = 0 \ \forall x_1, \dots, x_s \in \mathfrak{g}$. No tada je prema (3.3) $V_*^s(\mathfrak{g}) = \{0\}$, a odatle slijedi $V_*(\mathfrak{g}) = \{0\}$. Time je teorem dokazan u slučaju da su svi operatori $x \in \mathfrak{g}$ nilpotentni.

Dokaz za opći slučaj provodimo indukcijom u odnosu na $\dim V$. Baza indukcije $\dim V = 1$ je trivijalna, pa prelazimo na korak indukcije: pretpostavljamo da je $\dim V \geq 2$ i da je teorem dokazan za prostore dimenzije manje od $\dim V$. Prema prvom dijelu dokaza možemo pretpostaviti da neki $y \in \mathfrak{g}$ nije nilpotentan, tj. da je $V_{(0)}(y) \neq V$. Imamo Fittingovu dekompoziciju prostora V u odnosu na operator y :

$$V = V_{(0)}(y) \dot{+} V_*(y).$$

Prema lemi 3.1.5. tada su potprostori $V_{(0)}(y)$ i $V_*(y)$ invarijantni u odnosu na sve operatore $x \in \mathfrak{g}$, tj. $V_{(0)}(y)$ i $V_*(y)$ su $\mathfrak{g}$ -podmoduli od V . Po pretpostavci indukcije teorem vrijedi za prostor $W = V_{(0)}(y)$ i za nilpotentnu Liejevu podalgebru $\mathfrak{a} = \{x|W; x \in \mathfrak{g}\}$ od $\mathfrak{gl}(W)$. Dakle,

$$V_{(0)}(y) = W = W_{(0)}(\mathfrak{a}) \dot{+} W_*(\mathfrak{a}) \quad \text{i} \quad W_*(\mathfrak{a}) = \sum_{z \in \mathfrak{a}} W_*(z).$$

Dakle,

$$V = V_{(0)}(y) \dot{+} V_*(y) = W \dot{+} V_*(y) = W_{(0)}(\mathfrak{a}) \dot{+} W_*(\mathfrak{a}) \dot{+} V_*(y).$$

Prema lemi 3.1.3. imamo

$$V_{(0)}(\mathfrak{g}) = \bigcap_{x \in \mathfrak{g}} V_{(0)}(x) = W \cap \bigcap_{x \in \mathfrak{g}} V_{(0)}(x) = \bigcap_{x \in \mathfrak{g}} (W \cap V_{(0)}(x)) = \bigcap_{z \in \mathfrak{a}} W_{(0)}(z) = W_{(0)}(\mathfrak{a}),$$

pa iz prethodne jednakosti dobivamo

$$V = V_{(0)}(\mathfrak{g}) \dot{+} W_*(\mathfrak{a}) \dot{+} V_*(y). \quad (3.7)$$

Dokazat ćemo sada da vrijedi

$$W_*(\mathfrak{a}) \dot{+} V_*(y) = \sum_{x \in \mathfrak{g}} V_*(x) = V_*(\mathfrak{g}). \quad (3.8)$$

Odatle i iz (3.7) će slijediti

$$V = V_{(0)}(\mathfrak{g}) \dot{+} V_*(\mathfrak{g}) \quad \text{i} \quad V_*(\mathfrak{g}) = \sum_{x \in \mathfrak{g}} V_*(x).$$

Time će biti proveden korak indukcije, odnosno, teorem 3.1.6. će biti u potpunosti dokazan.

Jednakost (3.8) ćemo dokazati tako da dokažemo tri inkluzije:

$$W_*(\mathfrak{a}) \dot{+} V_*(y) \subseteq \sum_{x \in \mathfrak{g}} V_*(x), \quad (3.9)$$

$$\sum_{x \in \mathfrak{g}} V_*(x) \subseteq V_*(\mathfrak{g}) \quad (3.10)$$

i

$$V_*(\mathfrak{g}) \subseteq W_*(\mathfrak{a}) \dot{+} V_*(y). \quad (3.11)$$

Prije svega, očito je

$$W_*(\mathfrak{a}) \dot{+} V_*(y) = \sum_{z \in \mathfrak{a}} W_*(z) + V_*(y) \subseteq \sum_{x \in \mathfrak{g}} V_*(x),$$

dakle, vrijedi (3.9). Nadalje, za svaki $x \in \mathfrak{g}$ očito vrijedi $\text{Im } x^k \subseteq V_*^k(\mathfrak{g}) \quad \forall k \in \mathbb{Z}_+$ pa je

$$V_*(x) = \bigcap_{k \in \mathbb{Z}_+} \text{Im } x^k \subseteq \bigcap_{k \in \mathbb{Z}_+} V_*^k(\mathfrak{g}) = V_*(\mathfrak{g}),$$

a odatle slijedi (3.10). Da dokažemo posljednju inkluziju (3.11), uočimo da se Liejeva algebra $\{x|V_{(0)}(\mathfrak{g}); x \in \mathfrak{g}\}$ sastoji od nilpotentnih linearnih operatora na $V_{(0)}(\mathfrak{g})$. Prema posljedici 2.1.4. Engelovog teorema postoji $s \in \mathbb{N}$ takav da je

$$x_1 \cdots x_s V_{(0)}(\mathfrak{g}) = \{0\} \quad \forall x_1, \dots, x_s \in \mathfrak{g}.$$

Stoga zbog (3.7) za proizvoljne $x_1, \dots, x_s \in \mathfrak{g}$ imamo

$$\begin{aligned} x_1 \cdots x_s V &= x_1 \cdots x_s (V_{(0)}(\mathfrak{g}) \dot{+} W_*(\mathfrak{a}) \dot{+} V_*(y)) \subseteq \\ &\subseteq x_1 \cdots x_s V_{(0)}(\mathfrak{g}) + x_1 \cdots x_s W_*(\mathfrak{a}) + x_1 \cdots x_s V_*(y) = \\ &= x_1 \cdots x_s W_*(\mathfrak{a}) + x_1 \cdots x_s V_*(y) \subseteq W_*(\mathfrak{a}) + V_*(y), \end{aligned}$$

budući da su $W_*(\mathfrak{a})$ i $V_*(y)$ $\mathfrak{g}$ -podmoduli od V . Kako su $x_1, \dots, x_s \in \mathfrak{g}$ bili proizvoljni, dobivamo

$$V_*(\mathfrak{g}) \subseteq V_*^s(\mathfrak{g}) \subseteq W_*(\mathfrak{a}) \dot{+} V_*(y),$$

odnosno, dokazana je i inkluzija (3.11).

Teorem 3.1.7. *Neka je V konačnodimenzionalan vektorski prostor i $\mathfrak{g}$ nilpotentna Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$ takva da je svaki operator $x \in \mathfrak{g}$, rascjepiv. Tada vrijedi*

$$V = \sum_{\alpha \in \mathfrak{g}^*} \dot{+} V_{(\alpha)}(\mathfrak{g}).$$

Nadalje,

$$V_*(\mathfrak{g}) = \sum_{\alpha \in \mathfrak{g}^* \setminus \{0\}} \dot{+} V_{(\alpha)}(\mathfrak{g}).$$

Dokaz prve tvrdnje provodimo indukcijom po dimenziji prostora V . Baza indukcije $\dim V = 1$ je trivijalna, pa prelazimo na korak indukcije. Dakle, pretpostavljamo da je $\dim V \geq 2$ i da je teorem dokazan za prostore dimenzije manje od $\dim V$. Svaki $x \in \mathfrak{g}$ može se pisati u obliku $x = x_s + x_n$, gdje je x_s dijagonalizabilan a x_n nilpotentan operator na V i $x_s x_n = x_n x_s$. Prema propoziciji 1.3.11. tada je $(ad x)_s = ad x_s$ i $(ad x)_n = ad x_n$. Budući da je $\mathfrak{g}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(V)$, ona je potprostor od $\mathfrak{gl}(V)$ koji je $(ad x)$ -invarijantan za svaki $x \in \mathfrak{g}$. Iz tvrdnje (c)

teorema 1.3.8. slijedi da je potprostor $\mathfrak{g}$ i $(ad x_s)$ –invarijantan i $(ad x_n)$ –invarijantan potprostor od $\mathfrak{gl}(V)$. Međutim, Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ je nilpotentna, pa je svaki operator $(ad x)|_{\mathfrak{g}} = ad_{\mathfrak{g}} x$, $x \in \mathfrak{g}$, nilpotentan. To znači da je $(ad x)|_{\mathfrak{g}} = (ad x_n)|_{\mathfrak{g}}$, odnosno, $(ad x_s)|_{\mathfrak{g}} = 0 \ \forall x \in \mathfrak{g}$. Drugim riječima, vrijedi $x_s y = y x_s \ \forall x, y \in \mathfrak{g}$, odnosno, $\{x_s; x \in \mathfrak{g}\}$ je skup dijagonalizabilnih operatora koji komutiraju sa svim operatorima iz $\mathfrak{g}$.

Pretpostavimo najprije da za neki $x \in \mathfrak{g}$ operator x_s nije multipl jediničnog operatora, odnosno, da spektar $Sp(x_s)$ nije jednočlan skup. Neka je $Sp(x_s) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_k\}$ pri čemu je $k \geq 2$ i $\lambda_i \neq \lambda_j$ za $i \neq j$. Tada imamo svojstveni rastav prostora V u odnosu na dijagonalizabilan operator x_s :

$$V = \sum_{j=1}^k \dot{+} V_{\lambda_j}(x_s).$$

Budući da operator x_s komutira sa svim operatorima $y \in \mathfrak{g}$, svaki od svojstvenih potprostora $V_{\lambda_j}(x_s)$ je pravi $\mathfrak{g}$ –podmodul od V , pa tvrdnja teorema slijedi iz pretpostavke indukcije.

Dakle, dokaz se svodi na situaciju kad je operator x_s skalarni multipl jediničnog operatora za svaki $x \in \mathfrak{g}$. Pripadnu jedinu svojstvenu vrijednost operatora x_s označimo sa $\alpha(x)$. No tada je $\alpha(x)$ jedina svojstvena vrijednost operatora x , pa vrijedi $V = V_{(\alpha(x))}(x)$ za svaki $x \in \mathfrak{g}$. Dokažimo sada da je α linearan funkcional na $\mathfrak{g}$. Homogenost preslikavanja $\alpha : \mathfrak{g} \rightarrow K$ je očita: za $x \in \mathfrak{g}$ i $\lambda \in K$ je s jedne strane $Sp(\lambda x) = \{\alpha(\lambda x)\}$, a s druge je $Sp(x) = \{\alpha(x)\}$, pa slijedi $Sp(\lambda x) = \{\lambda \alpha(x)\}$; dakle, $\alpha(\lambda x) = \lambda \alpha(x)$. Dokažimo aditivnost. Neka su $x, y \in \mathfrak{g}$. Neka je $v \neq 0$ vektor iz V koji je svojstven za operator $x + y$, naravno, u odnosu na jedinu njegovu svojstvenu vrijednost $\alpha(x + y)$. Dakle,

$$(x + y)v = \alpha(x + y)v, \quad \text{odnosno,} \quad xv = \alpha(x + y)v - yv.$$

Odatle je

$$(x - \alpha(x)I)v = -(y - [\alpha(x + y) - \alpha(x)]I)v,$$

dakle, za svako $k \in \mathbb{N}$ vrijedi

$$(x - \alpha(x)I)^k v = (-1)^k (y - [\alpha(x + y) - \alpha(x)]I)^k v.$$

Međutim, $V = V_{(\alpha(x))}(x)$, pa postoji $k \in \mathbb{N}$ takav da je $(x - \alpha(x)I)^k v = 0$. Slijedi

$$(y - [\alpha(x + y) - \alpha(x)]I)^k v = 0.$$

To znači da je $\alpha(x + y) - \alpha(x)$ svojstvena vrijednost operatora y . Ali $\alpha(y)$ je po pretpostavci jedina svojstvena vrijednost operatora y , pa zaključujemo da je $\alpha(x + y) - \alpha(x) = \alpha(y)$, odnosno, $\alpha(x + y) = \alpha(x) + \alpha(y)$. Dakle, $\alpha : \mathfrak{g} \rightarrow K$ je linearni funkcional i za svako $v \in V$ i svako $x \in \mathfrak{g}$ postoji $k \in \mathbb{N}$ takav da je $(x - \alpha(x)I)^k v = 0$. Time je dokazano da je $V = V_{(\alpha)}(\mathfrak{g})$, dakle, dokazana je prva tvrdnja teorema 3.1.7.

Neka je $\alpha \in \mathfrak{g}^* \setminus \{0\}$. Izaberimo $x_0 \in \mathfrak{g}$ takav da je $\alpha(x_0) \neq 0$. Tada je

$$V_{(\alpha)}(\mathfrak{g}) = \bigcap_{x \in \mathfrak{g}} V_{(\alpha(x))}(x) \subseteq V_{(\alpha(x_0))}(x_0) \subseteq V_*(x_0).$$

No prema teoremu 3.1.6. je $V_*(x) \subseteq V_*(\mathfrak{g}) \ \forall x \in \mathfrak{g}$. Zaključujemo da je $V_{(\alpha)}(\mathfrak{g}) \subseteq V_*(\mathfrak{g})$. Kako to vrijedi za svaki $\alpha \in \mathfrak{g}^* \setminus \{0\}$, dobivamo inkluziju

$$\sum_{\alpha \in \mathfrak{g}^* \setminus \{0\}} V_{(\alpha)}(\mathfrak{g}) \subseteq V_*(\mathfrak{g}). \quad (3.12)$$

Prema prvoj tvrdnji teorema je

$$V = V_{(0)}(\mathfrak{g}) + \sum_{\alpha \in \mathfrak{g}^* \setminus \{0\}} + V_{(\alpha)}(\mathfrak{g}),$$

a prema teoremu 3.1.6. je $V = V_{(0)}(\mathfrak{g}) + V_*(\mathfrak{g})$. To pokazuje je inkluzija u (3.12) zapravo jednakost, odnosno, dokazana je i druga tvrdnja teorema 3.1.7.

Ako je $\mathfrak{n}$ nilpotentna podalgebra neke Liejeve algebre $\mathfrak{g}$, onda je $\mathfrak{g}$ $\mathfrak{n}$ -modul u odnosu na restrikciju $ad_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{n}}$ adjungirane reprezentacije, pa je za svaki linearan funkcional $\alpha \in \mathfrak{n}^*$ (takav da je $[\mathfrak{n}, \mathfrak{n}] \subseteq \text{Ker } \alpha$) dobro definiran potprostor $\mathfrak{g}_{(\alpha)}(\mathfrak{n})$ od $\mathfrak{g}$ i vrijedi $[\mathfrak{n}, \mathfrak{g}_{(\alpha)}(\mathfrak{n})] \subseteq \mathfrak{g}_{(\alpha)}(\mathfrak{n})$. Kažemo da je **Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ rascjepiva u odnosu na nilpotentnu podalgebru $\mathfrak{n}$** ako su svi operatori $ad_{\mathfrak{g}} x$, $x \in \mathfrak{n}$, rascjepivi. Prema teoremu 3.1.7. tada vrijedi

$$\mathfrak{g} = \sum_{\alpha \in \mathfrak{n}^*} + \mathfrak{g}_{(\alpha)}(\mathfrak{n}).$$

Teorem 3.1.8. *Neka je V konačnodimenzionalan $\mathfrak{g}$ -modul i $\mathfrak{n}$ nilpotentna Liejeva podalgebra od $\mathfrak{g}$. Tada za bilo koje $\alpha, \beta \in \mathfrak{n}^*$ vrijedi $\mathfrak{g}_{(\alpha)}(\mathfrak{n})V_{(\beta)}(\mathfrak{n}) \subseteq V_{(\alpha+\beta)}(\mathfrak{n})$.*

Dokaz ćemo provesti pomoću sljedeće konstrukcije:

Lema 3.1.9. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra i V konačnodimenzionalan $\mathfrak{g}$ -modul. Na vektorskom prostoru $\mathfrak{g}^V = \mathfrak{g} \times V$ definiramo operaciju $[\cdot, \cdot] : \mathfrak{g}^V \times \mathfrak{g}^V \rightarrow \mathfrak{g}^V$ ovako:*

$$[(x, v), (y, w)] = ([x, y], xw - yv), \quad x, y \in \mathfrak{g}, \quad v, w \in V.$$

- (a) *Uz tako definiranu operaciju $\mathfrak{g}^V$ je Liejeva algebra.*
- (b) *$x \mapsto (x, 0)$ je izomorfizam Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na Liejevu podalgebru $\mathfrak{g} \times \{0\} = \{(x, 0); x \in \mathfrak{g}\}$ od $\mathfrak{g}^V$.*
- (c) *$\{0\} \times V = \{(0, v); v \in V\}$ je komutativni ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}^V$.*
- (d) *$v \mapsto (0, v)$ je izomorfizam prostora V na prostor $\{0\} \times V$.*
- (e) *Za svaki $x \in \mathfrak{g}$ preslikavanje $D_x : \mathfrak{g}^V \rightarrow \mathfrak{g}^V$, definirano sa $D_x(y, v) = ([x, y], xv)$, $(x, v) \in \mathfrak{g}^V$, je derivacija Liejeve algebre $\mathfrak{g}^V$ i $x \mapsto D_x$ je homomorfizam Liejevih algebri sa $\mathfrak{g}$ u $\text{Der}(\mathfrak{g}^V)$.*

Dokaz: (a) Dokažimo najprije da je definirana operacija linearna u prvoj varijabli: za bilo koje $\alpha_1, \alpha_2 \in K$, $x_1, x_2, y \in \mathfrak{g}$ i $v_1, v_2, w \in V$ imamo redom

$$\begin{aligned} [\alpha_1(x_1, v_1) + \alpha_2(x_2, v_2), (y, w)] &= [(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2, \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2), (y, w)] = \\ &= ([\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2, y], (\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2)w - y(\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2)) = \\ &= (\alpha_1[x_1, y] + \alpha_2[x_2, y], \alpha_1 x_1 w + \alpha_2 x_2 w - \alpha_1 y v_1 - \alpha_2 y v_2) = \\ &= (\alpha_1[x_1, y] + \alpha_2[x_2, y], \alpha_1(x_1 w - y v_1) + \alpha_2(x_2 w - y v_2)) = \\ &= \alpha_1([x_1, y], x_1 w - y v_1) + \alpha_2([x_2, y], x_2 w - y v_2) = \alpha_1[(x_1, v_1), (y, w)] + \alpha_2[(x_2, v_2), (y, w)]. \end{aligned}$$

Time je dokazana linearnost operacije $[\cdot, \cdot]$ na $\mathfrak{g}^V$ u prvoje varijabli. Nadalje, vrijedi

$$[(x, v), (x, v)] = ([x, x], xv - xv) = (0, 0) = 0,$$

dakle i

$$[(x, v), (y, w)] = -[(y, w), (x, v)].$$

Odatle slijedi da je operacija $[\cdot, \cdot]$ na $\mathfrak{g}^V$ linearna i u drugoj varijabli. Napokon, vrijedi Jacobijev identitet: za $x, y, z \in \mathfrak{g}$ i $u, v, w \in V$ imamo

$$\begin{aligned} & [(x, u), [(y, v), (z, w)]] + [(y, v), [(z, w), (x, u)]] + [(z, w), [(x, u), (y, v)]] = \\ & = [(x, u), ([y, z], yw - zv)] + [(y, v), ([z, x], zu - xw)] + [(z, w), ([x, y], xv - yu)] = \\ & = ([x, [y, z]], xyw - xzv - [y, z]u) + ([y, [z, x]], yzu - yxw - [z, x]v) + ([z, [x, y]], zxv - zyu - [x, y]w) = \\ & = ([x, [y, z]] + [y, [z, x]] + [z, [x, y]], xyw - xzv - yzu + zyu + yzu - yxw - zxv + xzv + zxv - zyu - xyw + yxw) = 0. \end{aligned}$$

Time je dokazana tvrdnja (a).

Zadatak 3.1.2. Dokažite preostale tvrdnje (b), (c), (d) i (e) leme 3.1.9.

Dokaz teorema 3.1.8.: Na temelju leme 3.1.9. možemo identificirati Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ s podalgebrom $\mathfrak{g} \times \{0\}$ Liejeve algebre $\mathfrak{g}^V$ i prostor V s komutativnim idealom $\{0\} \times V$ u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}^V$. Uz te identifikacije je $\mathfrak{g}^V = \mathfrak{g} \dot{+} V$, a za $x \in \mathfrak{g}$ derivacija D_x Liejeve algebre $\mathfrak{g}^V$ iz tvrdnje (e) leme 3.1.9. je dana svojim restrikcijama na potprostore $\mathfrak{g}$ i V ovako:

$$D_x|_{\mathfrak{g}} = ad_{\mathfrak{g}} x, \quad D_x|_V = x \cdot .$$

Neka je u daljnjem $x \in \mathfrak{n}$. Budući da su potprostori $\mathfrak{g}$ i V invarijantni s obzirom na operator D_x , za svaki $\lambda \in Sp(D_x)$ vrijedi

$$(\mathfrak{g}^V)_{(\lambda)}(D_x) = \mathfrak{g}_{(\lambda)}(ad_{\mathfrak{g}} x) \dot{+} V_{(\lambda)}(x).$$

Nadalje, iz dokaza propozicije 1.3.12., preciznije iz jednakosti u zadatku 1.3.2. primijenjene na Liejevu algebru $\mathfrak{g}^V$ i na njenu derivaciju D_x , za bilo koje $\lambda, \mu \in K$ vrijedi

$$\left[(\mathfrak{g}^V)_{(\lambda)}(D_x), (\mathfrak{g}^V)_{(\mu)}(D_x) \right] \subseteq (\mathfrak{g}^V)_{(\lambda+\mu)}(D_x).$$

Kako je V ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}^V$, odatle slijedi

$$\begin{aligned} & \mathfrak{g}_{(\lambda)}(ad_{\mathfrak{g}} x)V_{(\mu)}(x) = [\mathfrak{g}_{(\lambda)}(ad_{\mathfrak{g}} x) \times \{0\}, \{0\} \times V_{(\mu)}(x)] \subseteq \\ & \subseteq \left[(\mathfrak{g}^V)_{(\lambda)}(D_x), (\mathfrak{g}^V)_{(\mu)}(D_x) \right] \cap V \subseteq (\mathfrak{g}^V)_{(\lambda+\mu)}(D_x) \cap V = V_{(\lambda+\mu)}(x). \end{aligned}$$

Napokon, kako za linearne funkcionalne $\alpha, \beta \in \mathfrak{n}^*$ vrijedi

$$\mathfrak{g}_{(\alpha)}(\mathfrak{n}) = \bigcap_{x \in \mathfrak{n}} \mathfrak{g}_{(\alpha(x))}(ad_{\mathfrak{g}} x) \quad \text{i} \quad V_{(\beta)}(\mathfrak{n}) = \bigcap_{x \in \mathfrak{n}} V_{(\beta(x))}(x),$$

dobivamo

$$\mathfrak{g}_{(\alpha)}(\mathfrak{n})V_{(\beta)}(\mathfrak{n}) \subseteq \mathfrak{g}_{(\alpha(x))}(ad_{\mathfrak{g}} x)V_{(\beta(x))}(x) \subseteq V_{(\alpha(x)+\beta(x))}(x) = V_{((\alpha+\beta)(x))}(x) \quad \forall x \in \mathfrak{n},$$

pa slijedi

$$\mathfrak{g}_{(\alpha)}(\mathfrak{n})V_{(\beta)}(\mathfrak{n}) \subseteq \bigcap_{x \in \mathfrak{n}} V_{((\alpha+\beta)(x))}(x) = V_{(\alpha+\beta)}(\mathfrak{n}).$$

Korolar 3.1.10. Neka je $\mathfrak{n}$ nilpotentan ideal u Liejevoj algebri $\mathfrak{g}$ i neka je V konačnodimenzionalan $\mathfrak{g}$ -modul. Za svaki linearan funkcional $\alpha \in \mathfrak{n}^*$ tada je $V_{(\alpha)}(\mathfrak{n})$ $\mathfrak{g}$ -podmodul od V .

Zadatak 3.1.3. Dokažite korolar 3.1.10.

3.2 Cartanove podalgebre

Cartanova podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ je izvjesna nilpotentna podalgebra, koja je pogodno smještena u $\mathfrak{g}$, tako da rastav $\mathfrak{g}$ u sumu korijenskih potprostora daje grubi opis operacije $[\cdot, \cdot]$ u $\mathfrak{g}$. Definicija je sljedeća: nilpotentna podalgebra $\mathfrak{h}$ Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ zove se **Cartanova podalgebra** od $\mathfrak{g}$ ako je $\mathfrak{h} = N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h})$.

Zadatak 3.2.1. *Neka je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{g}$. Dokažite da je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra svake Liejeve podalgebre od $\mathfrak{g}$ koja sadrži $\mathfrak{h}$.*

Propozicija 3.2.1. *Cartanova podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ je maksimalna nilpotentna podalgebra od $\mathfrak{g}$.*

Dokaz: Pretpostavimo da je $\mathfrak{k}$ nilpotentna podalgebra od $\mathfrak{g}$ i da je $\mathfrak{h} \subsetneq \mathfrak{k}$. Tada je $x \mapsto \text{ad}_{\mathfrak{k}} x$ nil-reprezentacija od $\mathfrak{h}$ na prostoru $\mathfrak{k}$. Potprostor $\mathfrak{h}$ od $\mathfrak{k}$ je invarijantan s obzirom na tu reprezentaciju. Slijedi da je kvocijentna reprezentacija π od $\mathfrak{h}$ na prostoru $\mathfrak{k}/\mathfrak{h}$, zadana sa

$$\pi(x)(y + \mathfrak{h}) = [x, y] + \mathfrak{h}, \quad x \in \mathfrak{h}, \quad y \in \mathfrak{k},$$

nil-reprezentacija. Prema Engelovom teoremu 2.1.3. postoji $v \in \mathfrak{k}/\mathfrak{h}$, $v \neq 0$, takav da je $\pi(x)v = 0 \quad \forall x \in \mathfrak{h}$. No tada je $v = y + \mathfrak{h}$ za neki $y \in \mathfrak{k} \setminus \mathfrak{h}$ i vrijedi $[\mathfrak{h}, y] \subseteq \mathfrak{h}$, odnosno, $y \in N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h})$. To je nemoguće jer je $N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h}) = \mathfrak{h}$. Ova kontradikcija dokazuje propoziciju.

Propozicija 3.2.2. *Neka je $\mathfrak{h}$ nilpotentna podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{g}$.*

(a) *Vrijedi $N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h}) \subseteq \mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h})$.*

(b) *$\mathfrak{h}$ je Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$ ako i samo ako je $\mathfrak{h} = \mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h})$.*

Dokaz: (a) Imamo prema definiciji

$$\mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h}) = \{x \in \mathfrak{g}; \forall h \in \mathfrak{h}, \exists k \in \mathbb{N}, (\text{ad } h)^k x = 0\}.$$

Za $x \in N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h})$ je $(\text{ad } h)x = [h, x] \in \mathfrak{h}$ za svaki $h \in \mathfrak{h}$. Kako je $\mathfrak{h}$ nilpotentna Liejeva algebra, svaki operator $\text{ad}_h|_{\mathfrak{h}} = (\text{ad } h)|_{\mathfrak{h}}$, $h \in \mathfrak{h}$, je nilpotentan. Dakle, za svaki $h \in \mathfrak{h}$ postoji $k \in \mathbb{N}$ takav da je $(\text{ad } h)^k|_{\mathfrak{h}} = 0$. No tada je $(\text{ad } h)^{k+1}x = (\text{ad } h)^k[h, x] = 0$, pa slijedi $x \in \mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h})$. Dakle, $N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h}) \subseteq \mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h})$.

(b) Budući da je $\mathfrak{h} \subseteq N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h})$, prema tvrdnji (a) iz $\mathfrak{h} = \mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h})$ slijedi da je $\mathfrak{h} = N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h})$, tj. $\mathfrak{h}$ je Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$.

Pretpostavimo sada da je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$, ali da je $\mathfrak{h} \neq \mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h})$. Za svaki $h \in \mathfrak{h}$ operator $(\text{ad } h)|_{\mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h})}$ je nilpotentan. Stoga je nilpotentan i operator $\pi(h)$ koji $(\text{ad } h)|_{\mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h})}$ definira na kvocijentnom prostoru $V = \mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h})/\mathfrak{h}$:

$$\pi(h)(x + \mathfrak{h}) = [x, h] + \mathfrak{h}, \quad x \in \mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h}).$$

Dakle, π je nil-reprezentacija Liejeve algebre $\mathfrak{h}$ na prostoru $V \neq \{0\}$. Prema Engelovom teoremu 2.1.3. postoji $v \in V \setminus \{0\}$ takav da je $\pi(h)v = 0 \quad \forall h \in \mathfrak{h}$. Tada je $v = x + \mathfrak{h}$ za neki $x \in \mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h}) \setminus \mathfrak{h}$ i vrijedi $[h, x] \in \mathfrak{h} \quad \forall h \in \mathfrak{h}$. No tada je $x \in N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h}) = \mathfrak{h}$, suprotno pretpostavci da $x \notin \mathfrak{h}$. Ova kontradikcija pokazuje da za Cartanovu podalgebru $\mathfrak{h}$ vrijedi $\mathfrak{h} = \mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h})$.

Za Cartanovu podalgebru $\mathfrak{h}$ Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ kažemo da je **rascjepiva** ili **razloživa**, ako je za svaki $h \in \mathfrak{h}$ operator $\text{ad } h$ na $\mathfrak{g}$ rascjepiv. Naravno, u slučaju algebarski zatvorenog polja svaka je Cartanova podalgebra rascjepiva.

Iz propozicije 3.2.2. i iz teorema 3.1.6. i 3.1.7. neposredno slijedi

Korolar 3.2.3. *Neka je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{g}$.*

(a) $\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \dot{+} \mathfrak{g}_*(\mathfrak{h})$.

(b) *Ako je $\mathfrak{h}$ rascjepiva, onda je*

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \dot{+} \sum_{\alpha \in \mathfrak{h}^* \setminus \{0\}} \dot{+} \mathfrak{g}_{(\alpha)}(\mathfrak{h}).$$

Za Cartanovu podalgebru $\mathfrak{h}$ Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ stavljamo

$$R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h}) = \{\alpha \in \mathfrak{h}^*; \mathfrak{g}_{(\alpha)}(\mathfrak{h}) \neq \{0\}, \alpha \neq 0\}.$$

Taj se skup linearnih funkcionala na $\mathfrak{h}$ zove **sistem korijena Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ u odnosu na Cartanovu podalgebru $\mathfrak{h}$** . Njegovi elementi su **korijeni** od $\mathfrak{g}$ u odnosu na $\mathfrak{h}$, a za $\alpha \in \{0\} \cup R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ kažemo da je $\mathfrak{g}_{(\alpha)} = \mathfrak{g}_{(\alpha)}(\mathfrak{h})$ pripadni **korijenski potprostor**. Ako je Cartanova podalgebra $\mathfrak{h}$ rascjepiva, prema tvrdnji (b) korolara 3.2.3. imamo tzv. **korijenski rastav Liejeve algebre $\mathfrak{g}$** :

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \dot{+} \sum_{\alpha \in R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})} \dot{+} \mathfrak{g}_{(\alpha)}.$$

Teorem 3.2.4. *Neka je $\mathfrak{h}$ rascjepiva Cartanova podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{g}$.*

(a) *Za $\alpha, \beta \in \{0\} \cup R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ vrijedi $[\mathfrak{g}_{(\alpha)}, \mathfrak{g}_{(\beta)}] \subseteq \mathfrak{g}_{(\alpha+\beta)}$.*

(b) *Ako su $\alpha, \beta \in \{0\} \cup R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ takvi da je $0 \neq \alpha + \beta \notin R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$, onda je $[\mathfrak{g}_{(\alpha)}, \mathfrak{g}_{(\beta)}] = \{0\}$.*

(c) *Za $\alpha, \beta \in \{0\} \cup R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ takve da je $\alpha + \beta \neq 0$ vrijedi $B_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{g}_{(\alpha)}, \mathfrak{g}_{(\beta)}) = \{0\}$.*

Dokaz: Tvrdnja (a) je neposredna posljedica teorema 3.1.8. a tvrdnja (b) slijedi iz tvrdnje (a) jer ako $\alpha + \beta \notin \{0\} \cup R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$, onda je $\mathfrak{g}_{(\alpha+\beta)} = \{0\}$.

(c) Neka su $x \in \mathfrak{g}_{(\alpha)}$ i $y \in \mathfrak{g}_{(\beta)}$. Prema tvrdnji (a) linearan operator $(ad x)(ad y)$ preslikava svaki potprostor u korijenskom rastavu Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ u odnosu na $\mathfrak{h}$ u neki drugi potprostor u tom rastavu. Dakle, ako izaberemo bazu u $\mathfrak{g}$ sastavljenu od baza svih korijenskih potprostora, matrica operatora $(ad x)(ad y)$ u toj bazi ima nule na dijagonali. Stoga mu je trag jednak nuli, a to znači da je $B_{\mathfrak{g}}(x, y) = 0$.

Za linearan operator A na n -dimenzionalnom vektorskom prostoru V označimo sa $P_A(T)$ njegov svojstveni polinom, a njegove koeficijente sa $-\sigma_1(A), \dots, -\sigma_n(A)$:

$$P_A(T) = \det(T I_V - A) = T^n - \sigma_1(A)T^{n-1} - \dots - \sigma_{n-1}(A)T - \sigma_n(A).$$

Tada vrijede tzv. *Newtonove formule*:

$$\sigma_1(A) = \text{Tr } A, \quad j\sigma_j(A) = \text{Tr } A^j - \sigma_1(A)\text{Tr } A^{j-1} - \dots - \sigma_{j-1}(A)\text{Tr } A, \quad 1 < j \leq n.$$

Uočimo da je operator A nilpotentan ako i samo ako je $P_A(T) = T^n$, a po Newtonovim formulama to je ispunjeno ako i samo ako je $\text{Tr } A^j = 0$ za $j = 1, \dots, n$. Dimenzija Fittingovog potprostora $V_{(0)}(A)$ u odnosu na operator A jednaka je kratnosti 0 kao nultočke polinoma $P_A(T)$. Dakle, $\dim V_*(A) = \max\{j; \sigma_j(A) \neq 0\}$.

Neka je i dalje V n -dimenzionalan vektorski prostor nad poljem K karakteristike 0. Skup K^V svih funkcija sa V u K je unitalna komutativna algebra u odnosu operacije po točkama:

$$(f + g)(v) = f(v) + g(v), \quad (\lambda f)(v) = \lambda f(v), \quad (fg)(v) = f(v)g(v), \quad f, g \in K^V, \lambda \in K, v \in V.$$

Označimo sa $\mathcal{P}(V)$ unitalnu podalgebru od K^V generiranu skupom V^* svih linearnih funkcionala na V . Dakle, $\mathcal{P}(V)$ je skup svih linearnih kombinacija produkata linearnih funkcionala. Izaberemo li bazu $\{f_1, \dots, f_n\}$ od V^* , vidimo da algebru $\mathcal{P}(V)$ možemo identificirati s algebrom polinoma $K[f_1, \dots, f_n]$.

Neka je sada $\mathfrak{g}$ n -dimenzionalna Liejeva algebra. Definiramo **rang** $r(\mathfrak{g})$ **Liejeve algebre** $\mathfrak{g}$ kao minimum dimenzija Fittingovih potprostora $\mathfrak{g}_{(0)}(ad x)$ za $x \in \mathfrak{g}$:

$$r(\mathfrak{g}) = \min \{ \dim \mathfrak{g}_{(0)}(ad x); x \in \mathfrak{g} \}.$$

Naravno, zbog Fittingovih dekompozicija za operatore $ad x$, $x \in \mathfrak{g}$, imamo

$$r(\mathfrak{g}) = n - \max \{ \dim \mathfrak{g}_*(ad x); x \in \mathfrak{g} \}.$$

Za svaki $x \in \mathfrak{g}$ operator $ad x$ ima nulu u spektru jer je $(ad x)x = 0$. Dakle, $\mathfrak{g}_{(0)}(ad x) \neq \{0\}$. Prema tome, za Liejevu algebru $\mathfrak{g} \neq \{0\}$ je $r(\mathfrak{g}) \geq 1$. Element $x \in \mathfrak{g}$ zove se **regularan** ako je

$$\dim \mathfrak{g}_{(0)}(ad x) = r(\mathfrak{g}).$$

Skup svih regularnih elemenata Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ označavat ćemo sa $\mathfrak{g}'$.

Za $x \in \mathfrak{g}$ svojstveni polinom $P_{ad x}$ operatora $ad x$ označavat ćemo kraće sa P_x , a njegove koficijente sa $-\sigma_j(x)$. Dakle,

$$P_x(T) = \det(T I_{\mathfrak{g}} - ad x) = T^n - \sum_{j=1}^n \sigma_j(x) T^{n-j}.$$

Prema Newtonovim formulama je

$$\sigma_1(x) = \text{Tr}(ad x), \quad j\sigma_j(x) = \text{Tr}(ad x)^j - \sum_{i=1}^{j-1} \sigma_i(x) \text{Tr}(ad x)^{j-i}, \quad 1 < j \leq n.$$

Iz tih se formula vidi da su sve funkcije $\sigma_j : \mathfrak{g} \rightarrow K$ polinomijalne.

Ako je $\ell = r(\mathfrak{g})$, onda je 0 barem ℓ -struka nultočka polinoma P_x i postoji $x \in \mathfrak{g}$ takav da je ona točno ℓ -struka. To znači da su $\sigma_j \equiv 0$ za $n - \ell + 1 \leq j \leq n$ i $\sigma_{n-\ell} \neq 0$. Dakle,

$$P_x(T) = T^n - \sum_{j=1}^{n-\ell} \sigma_j(x) T^{n-j}, \quad \sigma_{n-\ell} \neq 0.$$

Nadalje,

$$\mathfrak{g}' = \{x \in \mathfrak{g}; \sigma_{n-\ell}(x) \neq 0\}.$$

Propozicija 3.2.5. *Neka je $\mathfrak{g}$ Liejeva algebra nad poljem k i neka je K proširenje polja k .*

(a) *Vrijedi $\mathfrak{g}' = \mathfrak{g} \cap (\mathfrak{g}^K)'$; tj. $x \in \mathfrak{g}$ je regularan u $\mathfrak{g}$ ako i samo ako je on regularan u $\mathfrak{g}^K$.*

(b) $r(\mathfrak{g}) = r(\mathfrak{g}^K)$.

Dokaz: Za $x \in \mathfrak{g}$ svojstveni polinom operatora $ad_{\mathfrak{g}} x$ podudara se sa svojstvenim polinomom $ad_{\mathfrak{g}^K} x$. Doista, ako je $e = \{e_1, \dots, e_n\}$ baza od $\mathfrak{g}$, onda je e ujedno baza od $\mathfrak{g}^K$, a u toj bazi operatori $ad_{\mathfrak{g}} x$ i $ad_{\mathfrak{g}^K} x$ imaju istu matricu. To znači da ako pišemo

$$P_x(T) = T^n - \sum_{j=1}^n \sigma_j(x) T^{n-j}, \quad x \in \mathfrak{g}, \quad \text{ i } \quad P_y(T) = T^n - \sum_{j=1}^n \tau_j(y) T^{n-j}, \quad y \in \mathfrak{g}^K,$$

onda za polinomijalne funkcije $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in \mathcal{P}(\mathfrak{g})$ i $\tau_1, \dots, \tau_n \in \mathcal{P}(\mathfrak{g}^K)$ vrijedi $\sigma_j = \tau_j|_{\mathfrak{g}}$ za $j = 1, \dots, n$.

Dokažimo sada da za polinomijalnu funkciju $f \in \mathcal{P}(\mathfrak{g}^K)$ takvu da je $f|_{\mathfrak{g}} = 0$ vrijedi $f = 0$. Doista, ako izaberemo bazu $\{e_1, \dots, e_n\}$ od $\mathfrak{g}$, dakle i od $\mathfrak{g}^K$, onda vrijedi

$$f(\xi_1 e_1 + \dots + \xi_n e_n) = P(\xi_1, \dots, \xi_n), \quad \xi_1, \dots, \xi_n \in K,$$

gdje je $P \in K[T_1, \dots, T_n]$ polinom u n varijabli s koeficijentima iz K . Dakle, tvrdnja se svodi na sljedeće: ako za $P \in K[T_1, \dots, T_n]$ vrijedi $P(\xi_1, \dots, \xi_n) = 0 \quad \forall \xi_1, \dots, \xi_n \in k$, onda je $P = 0$. Tu ćemo činjenicu dokazati indukcijom u odnosu na n . Ako je $n = 1$, tj. ako je $P \in K[T]$ takav da je $P(\xi) = 0 \quad \forall \xi \in k$, onda je nužno $P = 0$, jer $P \neq 0$ ima samo konačno mnogo nultočki, a polje k je beskonačno. Time je dokazana baza indukcije. Provedimo sada korak indukcije. Neka je $n \geq 2$ i pretpostavimo da tvrdnja vrijedi za polinome u $n - 1$ varijabli. Neka je $P \in K[T_1, \dots, T_n]$ takav da je $P(\xi_1, \dots, \xi_n) = 0 \quad \forall \xi_1, \dots, \xi_n \in k$. Možemo pisati

$$P(T_1, \dots, T_n) = \sum_{j=0}^m P_j(T_1, \dots, T_{n-1}) T_n^j$$

gdje je $m \in \mathbb{Z}_+$ i $P_j \in K[T_1, \dots, T_{n-1}]$ za $j = 0, \dots, m$. Fiksirajmo sada $\xi_1, \dots, \xi_{n-1} \in k$ i definirajmo polinom $Q \in K[T]$ sa $Q(T) = P(\xi_1, \dots, \xi_{n-1}, T)$. Tada je

$$Q(T) = \sum_{j=0}^m P_j(\xi_1, \dots, \xi_{n-1}) T^j.$$

Po pretpostavci je $Q(\xi) = P(\xi_1, \dots, \xi_{n-1}, \xi) = 0 \quad \forall \xi \in k$. Prema bazi indukcije znamo da je tada $Q(T)$ nul–polinom, odnosno svi su mu koeficijenti jednaki nuli. Budući da je izbor $\xi_1, \dots, \xi_{n-1} \in k$ bio proizvoljan, zaključujemo da je

$$P_j(\xi_1, \dots, \xi_{n-1}) = 0 \quad \forall \xi_1, \dots, \xi_{n-1} \in k \quad \text{i za } j = 0, \dots, m.$$

No tada su po pretpostavci indukcije $P_0, \dots, P_m$ nul–polinomi. To znači da je P nul–polinom.

Vratimo sa sada dokazu propozicije 3.2.5. Prema upravo dokazanom vidimo da za svaki $j \in \{1, \dots, n\}$ vrijedi $\sigma_j = 0$ ako i samo ako je $\tau_j = 0$. Odatle neposredno slijede obje tvrdnje propozicije.

Propozicija 3.2.6. *Neka je $\varphi : \mathfrak{g}_1 \rightarrow \mathfrak{g}_2$ epimorfizam Liejevih algebri.*

(a) $\varphi(\mathfrak{g}'_1) \subseteq \mathfrak{g}'_2$.

(b) Ako je $\text{Ker } \varphi \subseteq Z(\mathfrak{g}_1)$, onda je $\varphi(\mathfrak{g}'_1) = \mathfrak{g}'_2$.

(c) $r(\mathfrak{g}_1) \geq r(\mathfrak{g}_2)$.

Dokaz: Stavimo $r(\mathfrak{g}_1) = r_1$, $\rho(\mathfrak{g}_2) = r_2$, $\dim \mathfrak{g}_1 = n$ i $\dim \mathfrak{g}_2 = m$, dakle, $\dim \text{Ker } \varphi = n - m$. Za $x \in \mathfrak{g}$ svojstveni polinomi P_x , $P_{\varphi(x)}$ i Q operatora $ad x$, $ad \varphi(x)$ i $(ad x)|_{\text{Ker } \varphi}$ imaju oblik

$$P_x(T) = T^n - \sum_{j=1}^{n-r_1} \sigma_j(x) T^{n-j}, \quad P_{\varphi(x)}(T) = T^m - \sum_{i=1}^{m-r_2} \tau_i(x) T^{m-i},$$

$$Q(T) = T^{n-m} - \sum_{k=1}^{n-m-p} \omega_k(x) T^{n-m-k},$$

gdje su $\sigma_j, \tau_i, \omega_k \in \mathcal{P}(\mathfrak{g}_1)$ i vrijedi $\sigma_{n-r_1} \neq 0$ i $\tau_{m-r_2} \neq 0$, a i p je izabran tako da je $\omega_{n-m-p} \neq 0$. Izaberemo li bazu $e = \{e_1, \dots, e_n\}$ od $\mathfrak{g}_1$ tako da je $e' = \{e_{m+1}, \dots, e_n\}$ baza od $\text{Ker } \varphi$, onda

je $e'' = \{\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_m)\}$ baza od $\mathfrak{g}_2$. Tada φ inducira izomorfizam sa $\mathfrak{g}_1/(\text{Ker } \varphi)$ na $\mathfrak{g}_2$, koji za $x \in \mathfrak{g}_1$ prevodi operator induciran sa $\text{ad } x$ na kvocijentnom prostoru $\mathfrak{g}_1/(\text{Ker } \varphi)$ u operator $\text{ad } \varphi(x)$ (jer je φ homomorfizam Liejevih algebri). Odatle slijedi da je u bazi e matrica operatora $\text{ad } x$ oblika $\begin{bmatrix} A & B \\ 0 & C \end{bmatrix}$, gdje je A matrica operatora $\text{ad } \varphi(x)$ u bazi e'' , a C je matrica operatora $(\text{ad } x)|_{\text{Ker } \varphi}$ u bazi e' . Odatle slijedi da je $P_x = P_{\varphi(x)}Q$, pa imamo $n - r_1 = m - r_2 + n - m - p$, tj. $r_1 = r_2 + p$, i $\sigma_{n-r_1}(x) = \tau_{m-r_2}(x)\omega_{n-m-p}(x) \quad \forall x \in \mathfrak{g}_1$. Iz $r_1 = r_2 + p$ slijedi da je $r_1 \geq r_2$, a to je tvrdnja (c). Nadalje, ako je $x \in \mathfrak{g}'_1$, onda je $\sigma_{n-r_1}(x) \neq 0$, pa slijedi da je $\tau_{m-r_2}(x) \neq 0$, dakle, $\varphi(x) \in \mathfrak{g}'_2$. Time je dokazana tvrdnja (a). Napokon, pretpostavimo da je $\text{Ker } \varphi \subseteq Z(\mathfrak{g}_1)$. Tada je $(\text{ad } x)|_{\text{Ker } \varphi} = 0$ za svaki $x \in \mathfrak{g}_1$, pa slijedi da je $Q(T) = T^{n-m}$. Tada je $\sigma_{n-r_1}(x) = \tau_{m-r_2}(x)$, dakle, $x \in \mathfrak{g}'_1$ ako i samo ako je $\varphi(x) \in \mathfrak{g}'_2$. Time je dokazana i tvrdnja (c).

Propozicija 3.2.7. *Neka je $\mathfrak{k}$ podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{g}$. Tada je $\mathfrak{g}' \cap \mathfrak{k} \subseteq \mathfrak{k}'$.*

Dokaz: Za $x \in \mathfrak{k}$ vrijedi $(\text{ad}_{\mathfrak{k}} x = (\text{ad}_{\mathfrak{g}} x)|_{\mathfrak{k}}$. Neka je $A(x)$ operator na kvocijentnom prostoru $\mathfrak{g}/\mathfrak{k}$ induciran sa $\text{ad}_{\mathfrak{g}} x$:

$$A(x)(y + \mathfrak{k}) = (\text{ad}_{\mathfrak{g}} x)y + \mathfrak{k} = [x, y] + \mathfrak{k}, \quad y \in \mathfrak{g}.$$

Za svaki $x \in \mathfrak{k}$ neka su $d_0(x)$ i $d_1(x)$ dimenzije Fittingovih nul-komponenti operatora $\text{ad}_{\mathfrak{k}} x$ i $A(x)$:

$$d_0(x) = \dim \mathfrak{k}_{(0)}(\text{ad}_{\mathfrak{k}} x), \quad d_1(x) = \dim (\mathfrak{g}/\mathfrak{k})_{(0)}(A(x)).$$

Nadalje, neka su

$$c_0 = \min \{d_0(x); x \in \mathfrak{k}\} \quad \text{i} \quad c_1 = \min \{d_1(x); x \in \mathfrak{k}\}.$$

Tada za neke polinomijalne funkcije $P_0, P_1 \in \mathcal{P}(\mathfrak{k}) \setminus \{0\}$ vrijedi

$$d_0(x) = c_0 \iff P_0(x) \neq 0 \quad \text{i} \quad d_1(x) = c_1 \iff P_1(x) \neq 0.$$

Stavimo sada

$$S = \{x \in \mathfrak{k}; d_0(x) = c_0 \text{ i } d_1(x) = c_1\} = \{x \in \mathfrak{k}; P_0(x) \neq 0 \neq P_1(x)\} = \{x \in \mathfrak{k}; P(x) \neq 0\}$$

gdje je $P = P_0 P_1 \in \mathcal{P}(\mathfrak{k}) \setminus \{0\}$. Budući da je polje k beskonačno, skup S je neprazan. Svaki element od S je regularan u $\mathfrak{k}$. Nadalje, za svaki $x \in \mathfrak{k}$ je $\mathfrak{k}_{(0)}(\text{ad}_{\mathfrak{k}} x) \subseteq \mathfrak{g}_{(0)}(\text{ad}_{\mathfrak{g}} x)$ i budući da je $\mathfrak{k}_{(0)}(\text{ad}_{\mathfrak{k}} x)$ potprostor od $\mathfrak{g}$ koji je $(\text{ad}_{\mathfrak{g}} x)$ -invarijantan, vrijedi $(\mathfrak{g}/\mathfrak{k})_{(0)}(A(x)) = \mathfrak{g}_{(0)}(\text{ad}_{\mathfrak{g}} x)/\mathfrak{k}_{(0)}(\text{ad}_{\mathfrak{k}} x)$. Prema tome,

$$S = \{x \in \mathfrak{k}; \dim \mathfrak{g}_{(0)}(\text{ad}_{\mathfrak{g}} x) \text{ je minimalna}\}.$$

Odatle slijedi da je svaki $x \in \mathfrak{g}' \cap \mathfrak{k}$ sadržan u S , . Dakle, $\mathfrak{g}' \cap \mathfrak{k} \subseteq S \subseteq \mathfrak{k}'$.

Napomena: Za Liejevu podalgebru $\mathfrak{k}$ od $\mathfrak{g}$ skup $\mathfrak{g}' \cap \mathfrak{k}$ ne mora biti neprazan. Ali ako jest neprazan, onda je on upravo jednak skupu S iz dokaza prethodne propozicije.

Teorem 3.2.8. (a) *Za $x \in \mathfrak{g}'$ Fittingov potprostor*

$$\mathfrak{g}_{(0)}(\text{ad } x) = \{y \in \mathfrak{g}; \exists k \in \mathbb{N} (\text{ad } x)^k y = 0\}$$

je Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$.

(b) *Ako je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$ i $x \in \mathfrak{h} \cap \mathfrak{g}'$, onda je $\mathfrak{h} = \mathfrak{g}_{(0)}(\text{ad } x)$. Posebno, ako su $\mathfrak{h}_1$ i $\mathfrak{h}_2$ Cartanove podalgebre i ako je $\mathfrak{h}_1 \cap \mathfrak{h}_2 \cap \mathfrak{g}' \neq \emptyset$, onda je $\mathfrak{h}_1 = \mathfrak{h}_2$.*

Dokaz: (a) Neka je $x \in \mathfrak{g}'$ i stavimo $\mathfrak{h} = \mathfrak{g}_{(0)}(ad\,x)$. Tada je očito $\mathfrak{h}_{(0)}(ad_{\mathfrak{h}}\,x) = \mathfrak{h}$. Po propoziciji 3.2.7. vrijedi $x \in \mathfrak{h}'$. To znači da je $r(\mathfrak{h}) = \dim \mathfrak{h}$, pa slijedi da je Liejeva algebra $\mathfrak{h}$ nilpotentna. Nadalje, imamo

$$\mathfrak{h} = \mathfrak{g}_{(0)}(ad\,x) \supseteq \mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h}) \supseteq \mathfrak{h}.$$

Dakle, $\mathfrak{h} = \mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h})$, a to prema tvrdnji (b) propozicije 3.2.2. znači da je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$.

(b) Neka je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$ i pretpostavimo da je $x \in \mathfrak{g}' \cap \mathfrak{h}$. Tada je prema (a) $\mathfrak{g}_{(0)}(ad\,x)$ Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$. No kako je $\mathfrak{h}$ nilpotentna Liejeva algebra, operator $(ad\,x)|_{\mathfrak{h}}$ je nilpotentan. Odatle slijedi da je $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}_{(0)}(ad\,x)$, dakle, $\mathfrak{h} = \mathfrak{g}_{(0)}(ad\,x)$.

3.3 Polinomijalna preslikavanja i topologija Zariskog

U ovom odjeljku promatramo isključivo konačnodimenzionalne vektorske prostore nad poljem K karakteristike 0. U prethodnom odjeljku definirali smo algebru polinomijalnih funkcija $\mathcal{P}(V)$ na vektorskom prostoru V kao unitalnu podalgebru algebre K^V svih funkcija sa V u K generiranu s dualnim prostorom V^* . Uočili smo da se $\mathcal{P}(V)$ može identificirati s algebrom polinoma $K[f_1, \dots, f_n]$ za bilo koju bazu $\{f_1, \dots, f_n\}$ dualnog prostora V^* . Važno je uočiti da odatle slijedi da je prsten $\mathcal{P}(V)$ integralna domena: ako su $f, g \in \mathcal{P}(V) \setminus \{0\}$ onda je i $fg \neq 0$. Kažemo da je **polinomijalna funkcija** $f \in \mathcal{P}(V)$ **homogena stupnja** $k \in \mathbb{Z}_+$, ako vrijedi

$$f(\lambda v) = \lambda^k f(v) \quad \forall v \in V \quad \text{i} \quad \forall \lambda \in K.$$

Skup svih homogenih polinomijalnih funkcija stupnja k označavamo sa $\mathcal{P}^k(V)$. To je potprostor od $\mathcal{P}(V)$ i čitava algebra $\mathcal{P}(V)$ je direktna suma tih potprostora:

$$\mathcal{P}(V) = \sum_{k \in \mathbb{Z}_+} \dot{+} \mathcal{P}^k(V).$$

Očito vrijedi

$$\mathcal{P}^0(V) = K, \quad \mathcal{P}^k(V) = \text{span} \{g_1 \cdots g_k; \ g_1, \dots, g_k \in V^*\}.$$

Za $f \in \mathcal{P}(V)$ stavimo

$$V_f = \{v \in V; \ f(v) \neq 0\}.$$

Za svaku polinomijalnu funkciju f osim nul-funkcije skup V_f je očito neprazan. Definiramo tzv. **topologiju Zariskog** na V kao topologiju čija je baza otvorenih skupova $\{V_f; \ f \in \mathcal{P}(V)\}$. Dakle, $U \subseteq V$ je **Zariski otvoren** podskup od V ako za svaku točku $v \in U$ postoji $f \in \mathcal{P}(V)$ takav da je $v \in V_f \subseteq U$. Definicija ima smisla jer skup $\{V_f; \ f \in \mathcal{P}(V)\}$ zadovoljava uvjete nužne da bi mogao biti baza otvorenih skupova za neku topologiju, jer je $\emptyset = V_0$ i konačan presjek skupova oblika V_f je ponovo skup takvog oblika:

$$V_{f_1} \cap \cdots \cap V_{f_m} = V_{f_1 \cdots f_m}.$$

Propozicija 3.3.1. *Svaka je točka $\{v\}$ zatvoren skup u odnosu na topologiju Zariskog.*

Dokaz: Ako je $w \in V \setminus \{v\}$, postoji linearan funkcional $g \in V^*$ takav da je $g(v) \neq g(w)$. Tada za $f = g - g(v)$ vrijedi $f(v) = 0$ i $f(w) \neq 0$. Dakle, $w \in V_f \subseteq V \setminus \{v\}$. Time je dokazano da je skup $V \setminus \{v\}$ Zariski otvoren, što znači da je skup $\{v\}$ Zariski zatvoren.

Međutim, topologija Zariskog nije Hausdorffova topologija, štoviše vrlo je daleko od tog svojstva:

Propozicija 3.3.2. *Ako su U_1 i U_2 Zariski otvoreni neprazni podskupovi vektorskog prostora V onda je $U_1 \cap U_2 \neq \emptyset$. Svaki neprazan Zariski otvoren podskup od V je Zariski gust u V .*

Dokaz: Izaberimo nekonstantne polinomijalne funkcije $f_1, f_2 \in \mathcal{P}(V)$ takve da je $V_{f_1} \subseteq U_1$ i $V_{f_2} \subseteq U_2$. Tada je

$$V_{f_1 f_2} = V_{f_1} \cap V_{f_2} \subseteq U_1 \cap U_2.$$

Umnožak $f_1 f_2$ je nekonstantna polinomijalna funkcija, pa vrijedi $V_{f_1 f_2} \neq \emptyset$. Dakle, $U_1 \cap U_2 \neq \emptyset$. Time je dokazana i druga tvrdnja. Naime, ako je U neprazan Zariski otvoren podskup od V , prema dokazanom njegov komplement $V \setminus U$ ne sadrži nijedan neprazan Zariski otvoren skup, a to upravo znači da je skup U gust u V u odnosu na topologiju Zariskog.

Za vektorske prostore V i W kažemo da je $F : V \rightarrow W$ **polinomijalno preslikavanje** ako je $\varphi \circ F \in \mathcal{P}(V)$ za svaki $\varphi \in W^*$.

Propozicija 3.3.3. *Za preslikavanje $F : V \rightarrow W$ sljedeća su svojstva međusobno ekvivalentna:*

- (a) F je polinomijalno preslikavanje.
 (b) Za svaku bazu $\{w_1, \dots, w_m\}$ od W vrijedi

$$F(v) = \sum_{i=1}^m F_i(v)w_i, \quad v \in V, \quad \text{za neke } F_1, \dots, F_m \in \mathcal{P}(V). \quad (3.13)$$

- (c) Za neku bazu $\{w_1, \dots, w_m\}$ od W vrijedi (3.13).

Dokaz: (a) $\Rightarrow$ (b). Neka je $\{w_1, \dots, w_m\}$ baza od W i neka je $\{\varphi_1, \dots, \varphi_m\}$ dualna baza od W^* . Tada za svaki $v \in V$ imamo

$$F(v) = \sum_{i=1}^m \varphi_i(F(v))w_i = \sum_{i=1}^m (\varphi_i \circ F)(v)w_i$$

i $\varphi_1 \circ F, \dots, \varphi_m \circ F \in \mathcal{P}(V)$.

Implikacija (b) $\Rightarrow$ (c) je trivijalna.

(c) $\Rightarrow$ (a). Pretpostavimo da je $\{w_1, \dots, w_m\}$ baza od W i da vrijedi (3.13). Tada za proizvoljne $\varphi \in W^*$ i $v \in V$ imamo

$$(\varphi \circ F)(v) = \varphi(F(v)) = \sum_{i=1}^m F_i(v)\varphi(w_i).$$

Dakle, $\varphi \circ F = \varphi(w_1)F_1 + \dots + \varphi(w_m)F_m \in \mathcal{P}(V)$.

Skup svih polinomijalnih preslikavanja $F : V \rightarrow W$ označavat ćemo sa $\mathcal{P}(V, W)$. To je očito vektorski prostor. Štoviše, $\mathcal{P}(V, W)$ je unitalni modul nad unitalnom algebrom $\mathcal{P}(V)$ u odnosu na množenje po točkama:

$$(fF)(v) = f(v)F(v), \quad v \in V, \quad f \in \mathcal{P}(V), \quad F \in \mathcal{P}(V, W).$$

Propozicija 3.3.4. *Ako su V, W i U vektorski prostori i ako su $F \in \mathcal{P}(V, W)$ i $G \in \mathcal{P}(W, U)$, onda je $G \circ F \in \mathcal{P}(V, U)$.*

Dokaz: Pretpostavimo prvo da je $U = K$, tj. da je $G \in \mathcal{P}(W)$. Tada je G suma produkata oblika $\varphi_1 \cdots \varphi_k$, gdje su $\varphi_1, \dots, \varphi_k \in W^*$. Za svaki takav produkt i za $v \in V$ imamo

$$\begin{aligned} [(\varphi_1 \cdots \varphi_k) \circ F](v) &= (\varphi_1 \cdots \varphi_k)(F(v)) = (\varphi_1(F(v))) \cdots (\varphi_k(F(v))) = \\ &= (\varphi_1 \circ F)(v) \cdots (\varphi_k \circ F)(v) = [(\varphi_1 \circ F) \cdots (\varphi_k \circ F)](v). \end{aligned}$$

Nadalje, kako je F polinomijalno preslikavanje, svaka od funkcija $\varphi_j \circ F$ je polinomijalna, pa je i njihov produkt polinomijalna funkcija na V .

U općem slučaju za $F \in \mathcal{P}(V, W)$, $G \in \mathcal{P}(W, U)$ i $\varphi \in U^*$ imamo $\varphi \circ (G \circ F) = (\varphi \circ G) \circ F$. Nadalje, kako je $\varphi \circ G \in \mathcal{P}(W)$, prema prvom dijelu dokaza je $(\varphi \circ G) \circ F \in \mathcal{P}(V)$. Dakle, $\varphi \circ (G \circ F) \in \mathcal{P}(V) \quad \forall \varphi \in U^*$, a to znači da je preslikavanje $G \circ F : V \rightarrow U$ polinomijalno.

Propozicija 3.3.5. *Svako polinomijalno preslikavanje $F \in \mathcal{P}(V, W)$ je neprekidno u odnosu na topologije Zariskog na V i W .*

Dokaz: Neka je $U \subseteq W$ Zariski otvoren podskup. Treba dokazati da je

$$F^{-1}(U) = \{v \in V; F(v) \in U\}$$

Zariski otvoren podskup od V . Neka je $v \in F^{-1}(U)$. Tada je $F(v) \in U$, pa zbog otvorenosti od U u W u topologiji Zariskog postoji $g \in \mathcal{P}(W)$ takva da je $F(v) \in W_g \subseteq U$. To znači da je

$$g(F(v)) \neq 0 \quad \text{ i } \quad g(w) = 0 \quad \forall w \in W \setminus U.$$

Stavimo $f = g \circ F$. Tada je prema propoziciji 3.3.4. $f \in \mathcal{P}(V)$ i po konstrukciji je $f(v) \neq 0$, odnosno, $v \in V_f$. Nadalje, za $v' \in V \setminus F^{-1}(U)$ vrijedi $F(v') \in W \setminus U$, pa je

$$f(v') = (g \circ F)(v') = g(F(v')) = 0.$$

To znači da je $v \in V_f \subseteq F^{-1}(U)$, odnosno, zbog proizvoljnosti točke $v \in F^{-1}(U)$ dokazano je da je $F^{-1}(U)$ Zariski otvoren podskup od V .

Kao i u slučaju polinomijalnih funkcija, za **polinomijalno preslikavanje** $F : V \rightarrow W$ kažemo da je **homogeno** stupnja $k \in \mathbb{Z}_+$ ako vrijedi

$$F(\lambda v) = \lambda^k F(v) \quad \forall \lambda \in K \quad \text{ i } \quad \forall v \in V.$$

Označit ćemo sa $\mathcal{P}^k(V, W)$ skup svih homogenih polinomijalnih preslikavanja sa V u W stupnja $k \in \mathbb{Z}_+$. Tada su očito $\mathcal{P}^k(V, W)$ potprostori vektorskog prostora $\mathcal{P}(V, W)$. Nadalje, vrijedi $\mathcal{P}^k(V)\mathcal{P}^\ell(V, W) \subseteq \mathcal{P}^{k+\ell}(V, W)$.

Propozicija 3.3.6. *Za vektorske prostore V, W i U vrijedi:*

- (a) *Za $F \in \mathcal{P}^k(V, W)$ i $G \in \mathcal{P}^\ell(W, U)$ je $G \circ F \in \mathcal{P}^{k\ell}(V, U)$.*
- (b) $\mathcal{P}^k(V, W) = \{F \in \mathcal{P}(V, W); \varphi \circ F \in \mathcal{P}^k(V) \forall \varphi \in W^*\}$.
- (c) $\mathcal{P}^1(V, W)$ je prostor $L(V, W)$ svih linearnih operatora sa V u W .
- (d)

$$\mathcal{P}(V, W) = \sum_{k \in \mathbb{Z}_+} \mathcal{P}^k(V, W).$$

Dokaz: (a) Ako su $F \in \mathcal{P}^k(V, W)$ i $G \in \mathcal{P}^\ell(W, U)$ onda za $\lambda \in K$ i $v \in V$ vrijedi

$$(G \circ F)(\lambda v) = G(F(\lambda v)) = G(\lambda^k F(v)) = (\lambda^k)^\ell G(F(v)) = \lambda^{k\ell} (G \circ F)(v).$$

Dakle, $G \circ F \in \mathcal{P}^{k\ell}(V, U)$.

(b) Prema (a) za svaki $\varphi \in W^* = \mathcal{P}^1(W)$ i za $F \in \mathcal{P}^k(V, W)$ vrijedi $\varphi \circ F \in \mathcal{P}^k(V)$. Obratno, pretpostavimo sada da je $\varphi \circ F \in \mathcal{P}^k(V)$ za svaki $\varphi \in W^*$. Za proizvoljne $\lambda \in K$ i $v \in V$ tada vrijedi

$$\varphi(F(\lambda v) - \lambda^k F(v)) = \varphi(F(\lambda v)) - \lambda^k \varphi(F(v)) = (\varphi \circ F)(\lambda v) - \lambda^k (\varphi \circ F)(v) = 0 \quad \forall \varphi \in W^*.$$

Dakle,

$$F(\lambda v) - \lambda^k F(v) = 0, \quad \text{ tj. } \quad F(\lambda v) = \lambda^k F(v), \quad \forall \lambda \in K \quad \text{ i } \quad \forall v \in V.$$

To znači da je $F \in \mathcal{P}^k(V, W)$.

(c) Za $\varphi \in W^*$ i $A \in L(V, W)$ je $\varphi \circ A \in V^* \subseteq \mathcal{P}(V)$. To znači da je $A \in \mathcal{P}(V, W)$. Nadalje, $A(\lambda v) = \lambda A(v)$ za svaki $\lambda \in K$ i svaki $v \in V$. Dakle, $L(V, W) \subseteq \mathcal{P}^1(V, W)$. Neka je sada $F \in \mathcal{P}^1(V, W)$. Prema (a) tada je $\varphi \circ F \in \mathcal{P}^1(V) = V^*$ za svaki $\varphi \in W^*$. Stoga za proizvoljne $v, v' \in V$ i $\varphi \in W^*$ imamo

$$\begin{aligned} \varphi(F(v + v') - F(v) - F(v')) &= \varphi(F(v + v')) - \varphi(F(v)) - \varphi(F(v')) = \\ &= (\varphi \circ F)(v + v') - (\varphi \circ F)(v) - (\varphi \circ F)(v') = 0. \end{aligned}$$

Odatle slijedi da je $F(v + v') = F(v) + F(v') \quad \forall v, v' \in V$. Dakle, preslikavanje $F : V \rightarrow W$ je aditivno, a kako je i homogeno, zaključujemo da je $F \in L(V, W)$. Time je dokazana i obrnuta inkluzija $\mathcal{P}^1(V, W) \subseteq L(V, W)$, odnosno, imamo jednakost $\mathcal{P}^1(V, W) = L(V, W)$.

(d) Neka je $F \in \mathcal{P}(V, W)$. Izaberimo bazu $\{w_1, \dots, w_m\}$ od W i neka su $F_1, \dots, F_m \in \mathcal{P}(V, W)$ takvi da vrijedi

$$F(v) = \sum_{i=1}^m F_i(v)w_i \quad \forall v \in V.$$

Tada se svaka polinomijalna funkcija F_i može pisati kao suma homogenih polinomijalnih funkcija:

$$F_i = \sum_{k \in \mathbb{Z}_+} F_{ik}, \quad F_{ik} \in \mathcal{P}^k(V) \quad \text{za} \quad k \in \mathbb{Z}_+ \quad \text{i} \quad i = 1, \dots, m.$$

Naravno, u svakoj od gornjih suma svi su članovi nula osim konačno mnogo njih. Za svaki $k \in \mathbb{Z}_+$ definiramo preslikavanje $F_{(k)} : V \rightarrow W$ sa

$$F_{(k)}(v) = \sum_{i=1}^m F_{ik}(v)w_i, \quad v \in V.$$

Tada je

$$F = \sum_{k \in \mathbb{Z}_+} F_{(k)}.$$

Po propoziciji 3.3.3. sva preslikavanja $F_{(k)}$ su polinomijalna. Nadalje, kako je polinomijalna funkcija F_{ki} homogena stupnja k , imamo za $\lambda \in K$ i $v \in V$:

$$F_{(k)}(\lambda v) = \sum_{i=1}^m F_{ik}(\lambda v)w_i = \sum_{i=1}^m \lambda^k F_{ik}(v)w_i = \lambda^k F_{(k)}(v).$$

Prema tome, $F_{(k)} \in \mathcal{P}^k(V, W)$ za svaki $k \in \mathbb{Z}_+$. Time je dokazano da je $\mathcal{P}(V, W)$ suma potprostora $\mathcal{P}^k(V, W)$, $k \in \mathbb{Z}_+$. Dokažimo da je ta suma direktna. Neka su $k_1, \dots, k_p \in \mathbb{Z}_+$ međusobno različiti i neka su $F_i \in \mathcal{P}^{k_i}(V, W) \setminus \{0\}$ za $i = 1, \dots, p$. Pretpostavimo da za neke $\lambda_1, \dots, \lambda_p \in K$ vrijedi

$$\lambda_1 F_1 + \dots + \lambda_p F_p = 0.$$

Tada je za svaki $\varphi \in W^*$

$$0 = \varphi \circ (\lambda_1 F_1 + \dots + \lambda_p F_p) = \lambda_1 (\varphi \circ F_1) + \dots + \lambda_p (\varphi \circ F_p).$$

Prema tvrdnji (b) vrijedi $\varphi \circ F_i \in \mathcal{P}^{k_i}(V)$. Budući da je $\mathcal{P}(V)$ direktna suma potprostora $\mathcal{P}^k(V)$, slijedi da za svaki $i \in \{1, \dots, p\}$ vrijedi ili $\lambda_i = 0$ ili $\varphi \circ F_i = 0$. Kako su sva polinomijalna preslikavanja F_i različita od 0, za svaki $i \in \{1, \dots, p\}$ postoji $\varphi \in W^*$ takav da je $\varphi \circ F_i \neq 0$. Zaključujemo da su svi λ_i jednaki 0. Time je dokazano da je suma potprostora $\mathcal{P}^k(V, W)$ direktna.

Dakle, svako polinomijalno preslikavanje $F : V \rightarrow W$ možemo na jedinstven pisati u obliku

$$F = \sum_{k \in \mathbb{Z}_+} F_k, \quad \text{gdje su } F_k \in \mathcal{P}^k(V, W).$$

Naravno, u gornjoj je sumi samo konačno mnogo članova različito od 0. Prostor $\mathcal{P}^0(V, W)$ identificira se s prostorom W , tako da se svaki vektor $w \in W$ identificira s konstantnom funkcijom na V , koja ima tu vrijednost w . Uz tu identifikaciju očito je $F_0 = F(o)$ i taj se vektor iz W zove **konstantni član polinomijalnog preslikavanja F** .

Linearan operator $F_1 \in \mathcal{P}^1(V, W) = L(V, W)$ zovemo **diferencijal polinomijalnog preslikavanja F u točki $0 \in V$** . Općenitije, za proizvoljan vektor $v \in V$ promatramo preslikavanje $F_v : V \rightarrow W$ definirano sa

$$F_v(v') = F(v + v'), \quad v' \in V.$$

Tada je očito $F_v \in \mathcal{P}(V, W)$. Diferencijal od F_v u točki 0 zove se **diferencijal polinomijalnog preslikavanja F u točki v** . Taj ćemo linearan operator sa V u W označavati sa $D_v F$; drugi je naziv za taj linearan operator **tangencijalno preslikavanje** polinomijalnog preslikavanja F u točki v . Dakle, imamo

$$F(v + v') = F(v) + (D_v F)v' + \sum_{k \geq 2} (D_v^{(k)} F)(v), \quad v' \in V, \quad \text{gdje su } D_v^{(k)} F \in \mathcal{P}^k(V, W) \text{ za } k \geq 2.$$

Neka je $F \in \mathcal{P}(V, W)$. Tada za svaku polinomijalnu funkciju $f \in \mathcal{P}(W)$ vrijedi $f \circ F \in \mathcal{P}(V)$.

Propozicija 3.3.7. *Za $f \in \mathcal{P}(V, W)$ preslikavanje $\Phi_F : \mathcal{P}(W) \rightarrow \mathcal{P}(V)$ definirano sa*

$$\Phi_F(f) = f \circ F, \quad f \in \mathcal{P}(W),$$

je unitalni homomorfizam unitalnih algebri.

Dokaz: Jedinica 1_W (odnosno, 1_V) u algebri $\mathcal{P}(W)$ (odn., $\mathcal{P}(V)$) je konstantna funkcija 1 na V (odn. W). Dakle,

$$\Phi_F(1_W) = 1_W \circ F = 1_V.$$

Nadalje, za $\lambda, \mu \in K$ i $f, g \in \mathcal{P}(W)$ imamo za svaki $v \in V$:

$$\begin{aligned} [\Phi_F(\lambda f + \mu g)](v) &= [(\lambda f + \mu g) \circ F](v) = (\lambda f + \mu g)(F(v)) = \\ &= \lambda f(F(v)) + \mu g(F(v)) = \lambda(f \circ F)(v) + \mu(g \circ F)(v) = [\lambda \Phi_F(f) + \mu \Phi_F(g)](v). \end{aligned}$$

Dakle, $\Phi_F(\lambda f + \mu g) = \lambda \Phi_F(f) + \mu \Phi_F(g)$, odnosno, preslikavanje $\Phi_F : \mathcal{P}(W) \rightarrow \mathcal{P}(V)$ je linearno. Napokon, za $f, g \in \mathcal{P}(W)$ i za $v \in V$ je

$$\begin{aligned} [\Phi_F(fg)](v) &= [(fg) \circ F](v) = (fg)(F(v)) = f(F(v))g(F(v)) = \\ &= (f \circ F)(v)(g \circ F)(v) = [\Phi_F(f)](v)[\Phi_F(g)](v) = [\Phi_F(f)\Phi_F(g)](v). \end{aligned}$$

Dakle, $\Phi_F(fg) = \Phi_F(f)\Phi_F(g)$, odnosno, preslikavanje $\Phi_F : \mathcal{P}(W) \rightarrow \mathcal{P}(V)$ ima i svojstvo multiplikativnosti.

Kažemo da je $F \in \mathcal{P}(V, W)$ **dominantno polinomijalno preslikavanje** ako je pridruženi homomorfizam $\Phi_F : \mathcal{P}(W) \rightarrow \mathcal{P}(V)$ injektivan. Općenito, jezgra homomorfizma Φ_F je skup svih $f \in \mathcal{P}(W)$ takvih da je $f|_{F(V)} \equiv 0$, a to zbog propozicije 3.3.5. znači da je f jednaka nuli svuda na Zariski zatvaraču skupa $F(V)$. Prema tome, vrijedi:

Propozicija 3.3.8. *Polinomijalno preslikavanje $F \in \mathcal{P}(V, W)$ je dominantno ako i samo ako je njegova slika $\text{Im } F = F(V)$ Zariski gusta u W .*

U slučaju algebarski zatvorenog polja K dominantna polinomijalna preslikavanja imaju sljedeće važno svojstvo:

Propozicija 3.3.9. *Neka su V i W prostori nad algebarski zatvorenim poljem K i neka je $F \in \mathcal{P}(V, W)$ dominantno polinomijalno preslikavanje. Za svaki neprazan otvoren podskup U od V njegova slika $F(U)$ sadrži neprazan otvoren podskup od W .*

Dokaz: Dovoljno je dokazati da za svaku polinomijalnu funkciju $f \in \mathcal{P}(V) \setminus \{0\}$ skup $F(V_f)$ sadrži neprazan otvoren podskup od W , odnosno, da postoji polinomijalna funkcija $g \in \mathcal{P}(W) \setminus \{0\}$ takva da je $W_g \subseteq F(V_f)$. To slijedi iz sljedećeg vrlo netrivialnog teorema iz komutativne algebre koji je posljedica tzv. *leme o normalizaciji* i koji navodimo bez dokaza:

Teorem 3.3.10. *Neka je $\mathcal{B}$ komutativna unitalna algebra nad K , koja je integralna domena (tj. bez djelitelja nule), i neka je $\mathcal{A}$ unitalna podalgebra, takva da je algebra $\mathcal{B}$ konačno generirana nad $\mathcal{A}$. Za svaki $b \in \mathcal{B} \setminus \{0\}$ postoji $a \in \mathcal{A} \setminus \{0\}$ takav da se svaki $\varphi \in \text{Hom}(\mathcal{A}, K)$ sa svojstvom $\varphi(a) \neq 0$ produljuje do $\psi \in \text{Hom}(\mathcal{B}, K)$ sa svojstvom $\psi(b) \neq 0$.*

Primijetimo sada da je algebra $\mathcal{B} = \mathcal{P}(V)$ integralna domena koja je konačno generirana nad K : doista, ona je kao unitalna algebra generirana s bilo kojom bazom dualnog prostora V . Prema tome, ona je konačno generirana nad svakom svojom unitalnom podalgebrom. Slika $\mathcal{A} = \text{Im } \Phi_F$ homomorfizma Φ_F je unitalna podalgebra od $\mathcal{B}$ i po pretpostavci je $\Phi_F : \mathcal{P}(W) \rightarrow \mathcal{A}$ izomorfizam unitalnih algebri. Za završetak dokaza treba još uočiti da je $\text{Hom}(\mathcal{P}(V), K) = \{\varphi_v; v \in V\}$, gdje je za $v \in V$ sa $\varphi_v : \mathcal{P}(V) \rightarrow K$ označen homomorfizam evaluacije: $\varphi_v(f) = f(v)$, $f \in \mathcal{P}(V)$. Doista, ako je $\varphi \in \text{Hom}(\mathcal{P}(V), K)$, onda je φ linearan funkcional $\neq 0$, pa je njegova jezgra $\text{Ker } \varphi$ potprostor od $\mathcal{P}(V)$ kodimenzijske 1. Pretpostavimo sada da je $\varphi \neq \varphi_0$, tj. da φ nije homomorfizam evaluacije $f \mapsto f(0)$. Tada $V^* \not\subseteq \text{Ker } \varphi$, pa slijedi da je $(\text{Ker } \varphi) \cap V^*$ potprostor od V^* kodimenzijske 1. To znači da postoji baza $\{f_1, \dots, f_n\}$ od V^* takva da je

$$\varphi(f_1) = 1 \quad \text{i} \quad \varphi(f_j) = 0 \quad \text{za} \quad j = 2, \dots, n.$$

Neka je $\{e_1, \dots, e_n\}$ baza prostora V dualna bazi $\{f_1, \dots, f_n\}$, tj. $f_i(e_j) = \delta_{ij}$. Tada imamo

$$\varphi_{e_1}(f_1) = f_1(e_1) = 1 \quad \text{i} \quad \varphi_{e_1}(f_j) = f_j(e_1) = 0 \quad \text{za} \quad j = 2, \dots, n.$$

To znači da se unitalni homomorfizmi φ i φ_{e_1} podudaraju na skupu $\{f_1, \dots, f_n\}$. Međutim, taj skup generira unitalnu algebru $\mathcal{P}(V)$, što znači da je $\varphi = \varphi_{e_1}$.

Uz uvedene oznake nastavljamo s dokazom propozicije 3.3.9. Neka je $f \in \mathcal{P}(V) \setminus \{0\} = \mathcal{B} \setminus \{0\}$. Prema teoremu 3.3.10. tada postoji $a \in \mathcal{A} \setminus \{0\} = \Phi_F(\mathcal{P}(W) \setminus \{0\})$ takav da vrijedi:

$$\forall \varphi \in \text{Hom}(\mathcal{A}, K) \quad \text{t.d.} \quad \varphi(a) \neq 0 \quad \exists \psi \in \text{Hom}(\mathcal{B}, K) \quad \text{t.d.} \quad \psi|_{\mathcal{A}} = \varphi \quad \text{i} \quad \psi(f) \neq 0. \quad (3.14)$$

Neka je $g \in \mathcal{P}(W)$ jedinstven element takav da je $a = \Phi_F(g) = g \circ F$. Sada (3.14) postaje:

$$\forall \varphi \in \text{Hom}(\mathcal{A}, K) \quad \text{t.d.} \quad (\varphi \circ \Phi_F)(g) \neq 0 \quad \exists \psi \in \text{Hom}(\mathcal{B}, K) \quad \text{t.d.} \quad \psi|_{\mathcal{A}} = \varphi \quad \text{i} \quad \psi(f) \neq 0. \quad (3.15)$$

Φ_F je izomorfizam unitalnih algebri sa $\mathcal{P}(W)$ na $\mathcal{A}$, pa zbog prethodnog odlomka vrijedi

$$\{\varphi \circ \Phi_F; \varphi \in \text{Hom}(\mathcal{A}, K)\} = \text{Hom}(\mathcal{P}(W), K) = \{\varphi_w; w \in W\}.$$

Također je

$$\text{Hom}(\mathcal{B}, K) = \text{Hom}(\mathcal{P}(V), K) = \{\varphi_v; v \in V\}.$$

Prema tome, (3.15) se može ovako zapisati:

$$\forall w \in W \quad \text{t.d.} \quad \varphi_w(g) \neq 0 \quad \exists v \in V \quad \text{t.d.} \quad \varphi_v \circ \Phi_F = \varphi_w \quad \text{i} \quad \varphi_v(f) \neq 0. \quad (3.16)$$

Imamo $\varphi_v(f) = f(v)$ i $\varphi_w(g) = g(w)$, pa (3.16) poprima oblik

$$\forall w \in W \quad \text{t.d.} \quad g(w) \neq 0 \quad \exists v \in V \quad \text{t.d.} \quad \varphi_v \circ \Phi_F = \varphi_w \quad \text{i} \quad f(v) \neq 0. \quad (3.17)$$

Pogledajmo sada što znači jednakost $\varphi_v \circ \Phi_F = \varphi_w$. Budući da W^* generira cijelu unitalnu algebru $\mathcal{P}(W)$ imamo sljedeći niz ekvivalencija

$$\begin{aligned} \varphi_v \circ \Phi_F = \varphi_w &\iff (\varphi_v \circ \Phi_F)(h) = \varphi_w(h) \quad \forall h \in W^* \iff \varphi_v(\Phi_F(h)) = \varphi_w(h) \quad \forall h \in W^* \iff \\ &\iff \varphi_v(h \circ F) = \varphi_w(h) \quad \forall h \in W^* \iff h(F(v)) = h(w) \quad \forall h \in W^* \iff F(v) = w. \end{aligned}$$

Dakle, (3.17) postaje

$$\forall w \in W \quad \text{t.d.} \quad g(w) \neq 0 \quad \exists v \in V \quad \text{t.d.} \quad F(v) = w \quad \text{i} \quad f(v) \neq 0,$$

odnosno, uz prije uvedene oznake

$$W_g = \{w \in W; g(w) \neq 0\} \quad \text{i} \quad V_f = \{v \in V; f(v) \neq 0\}$$

dobivamo

$$\forall w \in W_g \quad \exists v \in V_f \quad \text{t.d.} \quad F(v) = w.$$

No to upravo znači da je $W_g \subseteq F(V_f)$, a to je i trebalo dokazati.

Propozicija 3.3.11. *Ako za $F \in \mathcal{P}(V, W)$ postoji $v \in V$ takav da je diferencijal $D_v F$ surjekcija sa V na W , onda je polinomijalno preslikavanje F dominantno.*

Dokaz: Pomoću translacija u prostoru V za vektor $-v$ i u prostoru W za vektor $-F(v)$ možemo pretpostaviti da je $v = 0$ i $F(v) = 0$. Dakle, $F : V \rightarrow W$ je polinomijalno preslikavanje takvo da je $F(0) = 0$ i da mu je diferencijal u nuli $D_0 F$ surjekcija sa V na W . Dakle, možemo pisati

$$F = D_0 F + \sum_{j \geq 2} F_j \quad \text{za neke} \quad F_j \in \mathcal{P}^j(V, W).$$

Pretpostavimo da preslikavanje F nije dominantno. To znači da postoji $g \in \mathcal{P}(W) \setminus \{0\}$ takva da je $g \circ F = 0$. Tada je $g(0) = g(F(0)) = (g \circ F)(0) = 0$, pa za neki $m \in \mathbb{N}$ imamo

$$g = \sum_{k \geq m} g_k \quad \text{za neke} \quad g_k \in \mathcal{P}^k(W) \quad \text{i} \quad g_m \neq 0.$$

Sada je

$$0 = g \circ F = \left(\sum_{k \geq m} g_k \right) \circ \left(D_0 F + \sum_{j \geq 2} F_j \right) = g_m \circ D_0 F + \sum_{k > m} g_k \circ D_0 F + \sum_{k \geq m} \sum_{j \geq 2} g_k \circ F_j.$$

Prema tvrdnji (a) propozicije 3.3.6. imamo $g_m \circ D_0 F \in \mathcal{P}^m(V)$, $g_k \circ D_0 F \in \mathcal{P}^k(V)$ za $k > m$ i $g_k \circ F_j \in \mathcal{P}^{kj}(V)$ za $k \geq m$ i $j \geq 2$. Prema tome,

$$0 = g_m \circ D_0 F + h \quad \text{gdje je} \quad h \in \sum_{\ell > m} \mathcal{P}^\ell(V).$$

Odatle slijedi $g_m \circ D_0 F = 0$, a kako je po pretpostavci $D_0 F : V \rightarrow W$ surjekcija, zaključujemo da je $g_m = 0$. No to je suprotno pretpostavci. Ova kontradikcija dokazuje propoziciju.

3.4 Konjugiranost Cartanovih podalgebri

U ovom odjeljku promatramo isključivo Liejeve algebre i vektorske prostore nad algebarski zatvorenim poljem K karakteristike 0.

Za Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ sa $\text{Aut}(\mathfrak{g})$ označavamo grupu automorfizama od $\mathfrak{g}$, tj. podgrupu od $GL(\mathfrak{g})$ svih izomorfizama vektorskog prostora $\varphi : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}$ takvih da vrijedi $\varphi([x, y]) = [\varphi(x), \varphi(y)]$ $\forall x, y \in \mathfrak{g}$.

Neka je sada V konačnodimenzijski vektorski prostor i $A : V \rightarrow V$ nilpotentan linearan operator. Tada definiramo operator $e^A : V \rightarrow V$ ovako

$$e^A = \sum_{k \in \mathbb{Z}_+} \frac{1}{k!} A^k.$$

Kako je A nilpotentan, gornja je suma konačna i definicija operatora e^A je smisljena.

Zadatak 3.4.1. *Neka su $A, B : V \rightarrow V$ nilpotentni linearni operatori koji komutiraju, tj. $AB = BA$. Dokažite da je tada operator $A + B$ nilpotentan i da vrijedi*

$$e^A e^B = e^{A+B}.$$

Uputa: Uočite da za komutirajuće operatore A i B vrijedi binomni poučak

$$(A + B)^k = \sum_{j=0}^k \binom{k}{j} A^j B^{k-j},$$

i odatle zaključite da je $A + B$ nilpotentan. Zatim u izračunavanju e^{A+B} iskoristite svojstva binomnih koeficijenata.

Zadatak 3.4.2. *Dokažite da je za svaki nilpotentan operator $A : V \rightarrow V$ operator e^A izomorfizam V na V , tj. da je $e^A \in GL(V)$.*

Uputa: Iskoristite prethodni zadatak za $B = -A$.

Zadatak 3.4.3. *Ako je x ad-nilpotentan element Liejeve algebre $\mathfrak{g}$, dokažite da je $e^{adx} \in \text{Aut}(\mathfrak{g})$.*

Uputa: Dokažite indukcijom po k da za svaku derivaciju D Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ vrijedi Leibnitzova formula

$$D^k[y, z] = \sum_{j=0}^k \binom{k}{j} [D^j y, D^{k-j} z], \quad k \in \mathbb{Z}_+, \quad y, z \in \mathfrak{g}.$$

To možete dobiti i kao specijalan slučaj formule u zadatku 1.3.2. Sada to primijenite na derivaciju $D = \text{ad } x$ da pokažete da vrijedi

$$e^{adx}[y, z] = [e^{adx}y, e^{adx}z], \quad y, z \in \mathfrak{g}.$$

Podgrupa od $\text{Aut}(\mathfrak{g})$ generirana skupom $\{e^{adx}; x \in \mathfrak{g} \text{ ad-nilpotentan}\}$ označava se sa $\text{Int}(\mathfrak{g})$ i njeni se elementi zovu **unutarnji automorfizmi** od $\mathfrak{g}$.

Uočit ćemo sada još jednu normalnu podgrupu od $\text{Aut}(\mathfrak{g})$ sadržanu u $\text{Int}(\mathfrak{g})$. Neka je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ i $R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ skup svih korijena od $\mathfrak{g}$ u odnosu na $\mathfrak{h}$. Imamo tada korijenski rastav

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \dot{+} \sum_{\lambda \in R} \dot{+} \mathfrak{g}_{(\lambda)}(\mathfrak{h}).$$

Za $\lambda \in R$ i $x \in \mathfrak{g}_{(\lambda)}(\mathfrak{h})$ operator $ad x$ je nilpotentan. Označit ćemo sa $\mathcal{E}(\mathfrak{h})$ podgrupu od $Int(\mathfrak{g})$ generiranu sa

$$\{e^{adx}; x \in \mathfrak{g}_{(\lambda)}(\mathfrak{h}), \lambda \in R\}.$$

Ako je $\varphi \in Aut(\mathfrak{g})$, očito vrijedi $\varphi\mathcal{E}(\mathfrak{h})\varphi^{-1} = \mathcal{E}(\varphi(\mathfrak{h}))$.

Lema 3.4.1. (a) Skup $\mathfrak{h}' = \mathfrak{h} \cap \mathfrak{g}'$ je Zariski otvoren podskup od $\mathfrak{h}$ gust u $\mathfrak{h}$ u topologiji Zariskog. Nadalje,

$$\mathfrak{h}' = \{x \in \mathfrak{h}; \mathfrak{g}_{(0)}(ad x) = \mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h})\} = \{x \in \mathfrak{h}; \lambda(x) \neq 0 \ \forall \lambda \in R\}.$$

(b) Neka je $R = \{\lambda_1, \dots, \lambda_r\}$ gdje su $\lambda_i \neq \lambda_j$ za $i \neq j$ i neka je preslikavanje

$$F : \mathfrak{h} \times \mathfrak{g}_{(\lambda_1)}(\mathfrak{h}) \times \dots \times \mathfrak{g}_{(\lambda_r)}(\mathfrak{h}) \rightarrow \mathfrak{g}$$

zadano sa

$$F(h, x_1, \dots, x_r) = e^{adx_1} \dots e^{adx_r} h.$$

Preslikavanje F je dominantno polinomijalno preslikavanje.

Dokaz: Tvrdnja (a) je očigledna.

Ako je $n = \dim \mathfrak{g}$, za svaki nilpotentan linearan operator $A : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}$ je $A^n = 0$. Prema tome, za svaki $x_j \in \mathfrak{g}_{(\lambda_j)}(\mathfrak{h})$ je

$$e^{adx_j} = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k!} (ad x_j)^k.$$

dakle to je polinom u operatoru $ad x_j$. Odatle naravno slijedi da je F polinomijalno preslikavanje.

Neka je sada $h_0 \in \mathfrak{h}'$ i neka je DF diferencijal preslikavanja F u točki $(h_0, 0, \dots, 0)$. Za $h \in \mathfrak{h}$ imamo

$$F(h_0 + h, 0, \dots, 0) = h_0 + h \implies (DF)(h, 0, \dots, 0) = h.$$

Time je dokazano da je $\mathfrak{h} \subseteq \text{Im } DF$. Nadalje, za $x \in \mathfrak{g}_{(\lambda_1)}(\mathfrak{h})$ imamo

$$F(h_0, x, 0, \dots, 0) = e^{adx} h_0 = h_0 + (ad x)h_0 + \frac{1}{2!} (ad x)^2 h_0 + \dots + \frac{1}{(n-1)!} (ad x)^{n-1} h_0.$$

Odatle je

$$(DF)(0, x, 0, \dots, 0) = (ad x)h_0 = -(ad h_0)x.$$

Kako je $\lambda_1(h_0) \neq 0$, vrijedi $(ad h_0)\mathfrak{g}_{(\lambda_1)}(\mathfrak{h}) = \mathfrak{g}_{(\lambda_1)}(\mathfrak{h})$, pa slijedi da je $\mathfrak{g}_{(\lambda_1)}(\mathfrak{h}) \subseteq \text{Im } DF$. Analogno vrijedi $\mathfrak{g}_{(\lambda_i)}(\mathfrak{h}) \subseteq \text{Im } DF$ za svaki i , pa zbog korijenjskog rastava zaključujemo da je operator DF surjektiv. Prema propoziciji 3.3.11. F je dominantno polinomijalno preslikavanje.

Propozicija 3.4.2. Neka su $\mathfrak{h}_1$ i $\mathfrak{h}_2$ Cartanove podalgebre od $\mathfrak{g}$. Tada postoje $\varphi_1 \in \mathcal{E}(\mathfrak{h}_1)$ i $\varphi_2 \in \mathcal{E}(\mathfrak{h}_2)$ takvi da je $\varphi_1(\mathfrak{h}_1) = \varphi_2(\mathfrak{h}_2)$.

Dokaz: Prema lemi 3.4.1. i propoziciji 3.3.9. skupovi $\mathcal{E}(\mathfrak{h}_1)\mathfrak{h}'_1$ i $\mathcal{E}(\mathfrak{h}_2)\mathfrak{h}'_2$ sadrže Zariski otvorene Zariski guste podskupove od $\mathfrak{g}$. Stoga je $\mathcal{E}(\mathfrak{h}_1)\mathfrak{h}'_1 \cap \mathcal{E}(\mathfrak{h}_2)\mathfrak{h}'_2 \neq \emptyset$. To znači da postoje $\varphi_1 \in \mathcal{E}(\mathfrak{h}_1)$, $\varphi_2 \in \mathcal{E}(\mathfrak{h}_2)$, $h_1 \in \mathfrak{h}'_1$ i $h_2 \in \mathfrak{h}'_2$ takvi da je $\varphi_1(h_1) = \varphi_2(h_2)$. Tada je za $i = 1, 2$:

$$\varphi_i(\mathfrak{h}_i) = \varphi_i(\mathfrak{g}_{(0)}(\mathfrak{h}_i)) = \varphi_i(\mathfrak{g}_{(0)}(ad h_i)) = \mathfrak{g}_{(0)}(\varphi_i(ad x_i)\varphi_i^{-1}) = \mathfrak{g}_{(0)}(ad \varphi_i(h_i))$$

pa slijedi $\varphi_1(\mathfrak{h}_1) = \varphi_2(\mathfrak{h}_2)$.

Korolar 3.4.3. Za bilo koje Cartanove podalgebre $\mathfrak{h}_1$ i $\mathfrak{h}_2$ od $\mathfrak{g}$ je $\mathcal{E}(\mathfrak{h}_1) = \mathcal{E}(\mathfrak{h}_2)$.

Dokaz: Izaberimo φ_1 i φ_2 kao u propoziciji 3.4.2. Tada je

$$\mathcal{E}(\mathfrak{h}_1) = \varphi_1 \mathcal{E}(\mathfrak{h}_1) \varphi_1^{-1} = \mathcal{E}(\varphi_1(\mathfrak{h}_1)) = \mathcal{E}(\varphi_2(\mathfrak{h}_2)) = \varphi_2 \mathcal{E}(\mathfrak{h}_2) \varphi_2^{-1} = \mathcal{E}(\mathfrak{h}_2).$$

Zbog ovog korolara umjesto $\mathcal{E}(\mathfrak{h})$ pisat ćemo samo $\mathcal{E}$.

Teorem 3.4.4. $\mathcal{E}$ je normalna podgrupa od $\text{Aut}(\mathfrak{g})$ koja djeluje tranzitivno na skupu svih Cartanovih podalgebri od $\mathfrak{g}$. Drugim riječima, za Cartanove podalgebre $\mathfrak{h}_1$ i $\mathfrak{h}_2$ postoji $\varphi \in \mathcal{E}$ takav da je $\mathfrak{h}_2 = \varphi(\mathfrak{h}_1)$.

Dokaz: Neka je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$ i $\varphi \in \text{Aut}(\mathfrak{g})$. Tada je i $\varphi(\mathfrak{h})$ Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$, pa imamo

$$\varphi \mathcal{E} \varphi^{-1} = \varphi \mathcal{E}(\mathfrak{h}) \varphi^{-1} = \mathcal{E}(\varphi(\mathfrak{h})) = \mathcal{E}.$$

To pokazuje da je $\mathcal{E}$ normalna podgrupa od $\text{Aut}(\mathfrak{g})$.

Neka su $\mathfrak{h}_1$ i $\mathfrak{h}_2$ Cartanove podalgebre od $\mathfrak{g}$. Prema propoziciji 3.4.2. postoje $\varphi_1 \in \mathcal{E}(\mathfrak{h}_1) = \mathcal{E}$ i $\varphi_2 \in \mathcal{E}(\mathfrak{h}_2) = \mathcal{E}$ takvi da je $\varphi_1(\mathfrak{h}_1) = \varphi_2(\mathfrak{h}_2)$. Tada je $\varphi = \varphi_2^{-1} \varphi_1 \in \mathcal{E}$ i vrijedi $\mathfrak{h}_2 = \varphi(\mathfrak{h}_1)$.

Može se dokazati da za proizvoljno polje (karakteristike 0) u $\mathfrak{g}$ postoji samo konačno mnogo klasa $\text{Int}(\mathfrak{g})$ -konjugiranosti Cartanovih podalgebri.

Poglavlje 4

KOMPLEKSNE POLUPROSTE LIEJEVE ALGEBRE

U ovom poglavlju $\mathfrak{g}$ je poluprosta Liejeva algebra nad poljem $\mathbb{C}$ kompleksnih brojeva. U stvari, sve se tvrdnje mogu dokazati i za proizvoljno algebarski zatvoreno polje K karakteristike 0.

4.1 Cartanove podalgebre

Teorem 4.1.1. *Liejeva podalgebra $\mathfrak{h}$ od $\mathfrak{g}$ je Cartanova podalgebra ako i samo ako su ispunjena sljedeća dva uvjeta*

- (a) $\mathfrak{h}$ je maksimalna komutativna podalgebra od $\mathfrak{g}$.
- (b) Svaki element $h \in \mathfrak{h}$ je poluprost.

U tom je slučaju restrikcija $B_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{h} \times \mathfrak{h}}$ Killingove forme nedegenerirana.

Dokaz: Neka je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$ i neka je $x \in \mathfrak{g}' \cap \mathfrak{h}$. Takav x postoji po tvrdnji (c) teorema 3.2.5. a po tvrdnji (b) istog teorema tada je

$$\mathfrak{h} = \mathfrak{g}_{(0)}(ad x) = \{h \in \mathfrak{g}; \exists k \in \mathbb{N} (ad x)^k h = 0\}.$$

Neka je x_s poluprosti dio elementa x . Tada je $(ad x)x_s = [x, x_s] = 0$, dakle, $x_s \in \mathfrak{h}$. Nadalje, operatori $ad x$ i $ad x_s$ imaju isti svojstveni polinom, pa slijedi da je element x_s regularan. No tada je $\mathfrak{h} = \mathfrak{g}_{(0)}(ad x_s)$, a kako je $ad x_s$ poluprost, njegov korijenski potprostor $\mathfrak{g}_{(0)}(ad x_s)$ jednak je njegovom svojstvenom potprostoru $\mathfrak{g}_0(ad x_s)$, tj.

$$\mathfrak{h} = \{y \in \mathfrak{g}; (ad x_s)y = 0\} = \{y \in \mathfrak{g}; [x_s, y] = 0\} = Z_{\mathfrak{g}}(x_s).$$

Sada je prema Fittingovoj dekompoziciji u odnosu na operator $ad x_s$

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \dot{+} \mathfrak{g}_*(ad x_s).$$

a kako je operator $ad x_s$ poluprost, vrijedi

$$\mathfrak{g}_*(ad x_s) = \text{Im}(ad x_s) = [x_s, \mathfrak{g}].$$

Dakle, vrijedi

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \dot{+} [x_s, \mathfrak{g}].$$

Sada za $h \in \mathfrak{h}$ i $y \in \mathfrak{g}$ imamo po tvrdnji (c) propozicije 2.3.2.

$$B_{\mathfrak{g}}(h, [x_s, y]) = B_{\mathfrak{g}}([h, x_s], y) = 0.$$

To pokazuje da je $B_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h}, [x_s, \mathfrak{g}]) = \{0\}$. Kako je forma $B_{\mathfrak{g}}$ nedegenerirana, iz propozicije 2.6.5. slijedi da je restrikcija $B_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{h} \times \mathfrak{h}}$ nedegenerirana.

Liejeva algebra $\mathfrak{h}$ je nilpotentna, dakle, rješiva. Prema korolaru 2.2.5. postoji baza u $\mathfrak{g}$ u odnosu na koju svi operatori $ad h$, $h \in \mathfrak{h}$, imaju gornje trokutaste matrice. Pretpostavimo sada da je neki $x \in \mathfrak{h}$ nilpotentan. Onda $ad x$ u toj bazi ima striktno gornje trokutastu matricu pa za svaki $h \in \mathfrak{h}$ produkt $(ad x)(ad h)$ ima striktno gornje trokutastu matricu. No tada mu je trag jednak nuli, tj.

$$B_{\mathfrak{g}}(x, h) = \text{Tr}(ad x)(ad h) = 0 \quad \forall h \in \mathfrak{h}.$$

Kako je forma $B_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{h} \times \mathfrak{h}}$ nedegenerirana, slijedi $x = 0$. To pokazuje da u $\mathfrak{h}$ nema nilpotentnih elemenata različitih od 0. No kako za $x \in \mathfrak{h}$ vrijedi $x_s \in \mathfrak{h}$, to je i $x_n = x - x_s \in \mathfrak{h}$, dakle, $x_n = 0$. To pokazuje da su svi elementi Cartanove podalgebre $\mathfrak{h}$ poluprosti. Time je dokazano da svaka Cartanova podalgebra $\mathfrak{h}$ ima svojstvo (b).

Dokažimo sada da je Liejeva algebra $\mathfrak{h}$ komutativna. Neka je $x \in \mathfrak{h}$ proizvoljan. Kako je operator $ad x$ poluprost, njegova restrikcija $(ad x)|_{\mathfrak{h}} = ad_{\mathfrak{h}} x$ je također poluprost operator, dakle, dijagonalizabilan. Treba dokazati da je $ad_{\mathfrak{h}} x = 0$, a to će slijediti ako dokažemo da operator $ad_{\mathfrak{h}} x$ nema svojstvenih vrijednosti različitih od 0. Pretpostavimo suprotno da postoji $0 \neq \lambda \in Sp(ad_{\mathfrak{h}} x)$ i neka je $y \in \mathfrak{h} \setminus \{0\}$ pripadni svojstveni vektor:

$$(ad_{\mathfrak{h}} x)y = [x, y] = \lambda y.$$

No tada je

$$(ad_{\mathfrak{h}} y)x = [y, x] = -\lambda y \neq 0.$$

S druge strane, operator $ad_{\mathfrak{h}} y$ je dijagonalizabilan, pa se x može napisati kao suma njegovih svojstvenih vektora. Kako je $(ad_{\mathfrak{h}} y)x \neq 0$, među tim svojstvenim vektorima postoje neki sa svojstvenom vrijednošću $\neq 0$. Drugim riječima, postoji $k \in \mathbb{N}$, $\alpha_1, \dots, \alpha_k \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$, $x_0 \in \mathfrak{h}$ i $x_1, \dots, x_k \in \mathfrak{h} \setminus \{0\}$ takvi da je

$$x = x_0 + x_1 + \dots + x_k, \quad [y, x_0] = 0, \quad [y, x_j] = \alpha_j x_j \quad \text{za } j = 1, \dots, k.$$

Slijedi

$$-\lambda y = (ad_{\mathfrak{h}} y)x = \alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_k x_k \implies \alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_k x_k + \lambda y = 0.$$

No to je nemoguće jer su $x_1, \dots, x_k, y$ svojstveni vektori operatora $ad_{\mathfrak{h}} y$ za međusobno različite svojstvene vrijednosti i kao takvi su linearno nezavisni. Ova kontradikcija dokazuje tvrdnju $ad_{\mathfrak{h}} x = 0$, a kako je $x \in \mathfrak{h}$ bio proizvoljan, slijedi da je Liejeva algebra $\mathfrak{h}$ komutativna.

Napokon, prema propoziciji 3.2.1. $\mathfrak{h}$ je maksimalna nilpotentna podalgebra od $\mathfrak{g}$. Kako je svaka komutativna Liejeva algebra nilpotentna, slijedi da je $\mathfrak{h}$ maksimalna komutativna podalgebra, tj. vrijedi svojstvo (a).

Pretpostavimo sada da je $\mathfrak{h}$ podalgebra Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ sa svojstvima (a) i (b). Tada je $h \mapsto ad h$ potpuno reducibilna reprezentacija od $\mathfrak{h}$, dakle, postoji $(ad \mathfrak{h})$ -invarijantan potprostor $\mathfrak{k}$ od $\mathfrak{g}$ takav da je $\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \dot{+} \mathfrak{k}$. Pretpostavimo sada da $\mathfrak{h}$ nije Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$. Tada je $N_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h}) \neq \mathfrak{h}$, dakle, postoji $y \in \mathfrak{g} \setminus \mathfrak{h}$ takav da je $[y, \mathfrak{h}] \subseteq \mathfrak{h}$. Pišemo sada $y = z + u$, $z \in \mathfrak{h}$, $u \in \mathfrak{k}$, $u \neq 0$. Tada je $[z, \mathfrak{h}] = \{0\}$, jer je $\mathfrak{h}$ komutativna, pa iz $[y, \mathfrak{h}] \subseteq \mathfrak{h}$ slijedi $[u, \mathfrak{h}] \subseteq \mathfrak{h}$. S druge strane je $[u, \mathfrak{h}] \subseteq [\mathfrak{k}, \mathfrak{h}] \subseteq \mathfrak{k}$, jer je $\mathfrak{k}$ $(ad \mathfrak{h})$ -invarijantan potprostor, pa slijedi $[u, \mathfrak{h}] \subseteq \mathfrak{h} \cap \mathfrak{k} = \{0\}$. No to je nemoguće jer je $u \neq 0$ i pretpostavili smo da je $\mathfrak{h}$ maksimalna komutativna podalgebra od $\mathfrak{g}$. Ova kontradikcija pokazuje da je pretpostavka da $\mathfrak{h}$ nije Cartanova podalgebra bila pogrešna. Time je teorem u potpunosti dokazan.

4.2 Trodimenzionalna prosta Liejeva algebra

U ovom ćemo odjeljku proučiti Liejevu algebru $\mathfrak{sl}(2, \mathbb{C})$ svih kompleksnih kvadratnih matrica drugog reda s tragom nula i njene konačnodimenzionalne reprezentacije. Dakle,

$$\mathfrak{sl}(2, \mathbb{C}) = \left\{ \begin{bmatrix} a & b \\ c & -a \end{bmatrix}; a, b, c \in \mathbb{C} \right\}.$$

To je trodimenzionalna prosta Liejeva algebra i jednu njenu bazu čine matrice

$$x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad h = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

Te matrice zadovoljavaju komutacione relacije

$$[h, x] = 2x, \quad [h, y] = -2y, \quad [x, y] = h.$$

Lako se vidi da svaka kompleksna trodimenzionalna prosta Liejeva algebra ima bazu čiji elementi zadovoljavaju gornje komutacione relacije. Proste trodimenzionalne Liejeve algebre zvat ćemo **TDS–algebre** (prema engleskom *three–dimensional simple*), a baza $\{x, y, h\}$ takve algebre koja zadovoljava gornje komutacione relacije zove se **standardna baza**.

Neka je u daljnjem $\mathfrak{g}$ kompleksna TDS–algebra i $\{x, y, h\}$ njena standardna baza. Uočimo da je operator $ad h$ dijagonalizabilan: baza $\{x, y, h\}$ sastavljena je od svojstvenih vektora operatora $ad h$. Prema tome, operator $ad h$ je poluprost, odnosno, element h je poluprost. Nadalje, vidi se da vrijedi $(ad x)^3 = (ad y)^3 = 0$, dakle, elementi x i y su nilpotentni. Neka je u daljnjem π reprezentacija Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na konačnodimenzionalnom kompleksnom vektorskom prostoru V i stavimo

$$X = \pi(x), \quad Y = \pi(y), \quad H = \pi(h).$$

Prema tvrdnjama (a) i (b) teorema 2.4.6. operator H je poluprost, tj. dijagonalizabilan, a operatori X i Y su nilpotentni. Elementi spektra $Sp(H)$ operatora H zovu se **težine reprezentacije** π a za težinu λ pripadni svojstveni potprostor

$$V_\lambda = V_\lambda(H) = \{v \in V; Hv = \lambda v\}$$

je **težinski potprostor** a njegovi su elementi **težinski vektori** težine λ . Kako je operator H dijagonalizabilan, imamo rastav u direktnu sumu

$$V = \sum_{\lambda \in Sp(H)} \dot{+} V_\lambda.$$

Iz teorema 3.1.8. slijedi da je

$$XV_\lambda \subseteq V_{\lambda+2} \quad \text{i} \quad YV_\lambda \subseteq V_{\lambda-2}.$$

To se i direktno jednostavno provjerava iz komutacionih relacija $HX = XH + 2X$ i $HY = YH - 2Y$.

Težinski vektor $v \neq 0$ zove se **primitivni vektor** reprezentacije π ako je $Xv = 0$. Primitivni vektori očito postoje jer je operator X nilpotentan.

Lema 4.2.1. *Neka je v primitivni vektor težine λ , tj. $0 \neq v \in V_\lambda$ i $Xv = 0$. stavimo*

$$v_{-1} = 0, \quad v_0 = v, \quad v_j = \frac{1}{j!} Y^j v, \quad j \in \mathbb{N}.$$

Tada vrijedi:

$$Hv_j = (\lambda - 2j)v_j, \quad Xv_j = (\lambda - j + 1)v_{j-1}, \quad Yv_j = (j + 1)v_{j+1}, \quad j \in \mathbb{Z}_+. \quad (4.1)$$

Dokaz: Prva i treća jednakost slijede neposredno iz definicije vektora v_j i iz $Y^j V_\lambda \subseteq V_{\lambda-2j}$. Drugu jednakost dokazujemo indukcijom po $j \in \mathbb{Z}_+$. Za $j = 0$ jednakost vrijedi zbog izbora vektora v :

$$Xv_0 = Xv = 0 = (\lambda - 0 + 1)v_{-1}.$$

Za korak indukcije pretpostavimo da je $j \in \mathbb{Z}_+$ i da je jednakost $Xv_j = (\lambda - j + 1)v_{j-1}$ dokazana. Prema trećoj jednakosti je $Yv_j = (j+1)v_{j+1}$ i $Yv_{j-1} = jv_j$. Stoga zbog jednakosti $XY = YX + H$ imamo redom

$$\begin{aligned} (j+1)Xv_{j+1} &= XYv_j = YXv_j + Hv_j = (\lambda - j + 1)Yv_{j-1} + (\lambda - 2j)v_j = \\ &= [j(\lambda - j + 1) + \lambda - 2j]v_j = (j+1)(\lambda - 2j)v_j. \end{aligned}$$

No to znači da je

$$Xv_{j+1} = [\lambda - (j+1) + 1]v_{(j+1)-1},$$

odnosno, proveden je korak indukcije za dokaz druge jednakosti u (4.1).

Zadržimo pretpostavke i oznake iz leme 4.2.1. Prema prvoj jednakosti u (4.1) vektori v_j su svojstveni vektori operatora H za međusobno različite svojstvene vrijednosti. Prema tome, svi oni koji su $\neq 0$ su linearno nezavisni. Budući da je prostor V konačnodimenzijski, postoji $m \in \mathbb{Z}_+$ takav da je $v_m \neq 0$ i $v_{m+1} = 0$. Sada formule (4.1) pokazuju da je potprostor $\text{span}\{v_0, \dots, v_m\}$ π -invarijantan i $(m+1)$ -dimenzijski. Pretpostavimo li da je reprezentacija π ireducibilna, zaključujemo da je $\{v_0, \dots, v_m\}$ baza prostora V . Napokon, kako je $v_{m+1} = 0$, druga jednakost u (4.1) za $j = m+1$ daje

$$0 = Xv_{m+1} = (\lambda - m)v_m,$$

a kako je $v_m \neq 0$, zaključujemo da je $\lambda - m = 0$, odnosno, $\lambda = m$.

Obratno, neka je $m \in \mathbb{Z}_+$ i pretpostavimo da je V $(m+1)$ -dimenzijski kompleksni vektorski prostor s bazom $\{v_0, \dots, v_m\}$. Neka su X, Y i H linearni operatori na prostoru V zadani svojim djelovanjem na izabranu bazu:

$$\begin{aligned} Hv_j &= (m - 2j)v_j, & 0 \leq j \leq m, \\ Xv_0 &= 0, & Xv_j = (m - j + 1)v_{j-1}, & 0 < j \leq m, \\ Yv_j &= (j + 1)v_{j+1}, & 0 \leq j < m, & Yv_m = 0. \end{aligned} \tag{4.2}$$

Direktni račun daje:

$$[H, X]v_0 = HXv_0 - XHv_0 = -mXv_0 = 0 = 2Xv_0;$$

$$\begin{aligned} \text{za } 1 \leq j \leq m : \quad [H, X]v_j &= HXv_j - XHv_j = (m - j + 1)Hv_{j-1} - (m - 2j)Xv_j = \\ &= (m - j + 1)(m - 2j + 2)v_{j-1} - (m - 2j)(m - j + 1)v_{j-1} = 2(m - j + 1)v_{j-1} = 2Xv_j; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{za } 0 \leq j < m : \quad [H, Y]v_j &= HYv_j - YHv_j = (j + 1)Hv_{j+1} - (m - 2j)Yv_j = \\ &= (j + 1)(m - 2j - 2)v_{j+1} - (m - 2j)(j + 1)v_{j+1} = -2(j + 1)v_{j+1} = -2Yv_j; \end{aligned}$$

$$[H, Y]v_m = HYv_m - YHv_m = mYv_m = 0 = -2Yv_m;$$

$$[X, Y]v_0 = XYv_0 - YXv_0 = Xv_1 = mv_0 = Hv_0;$$

$$\begin{aligned} \text{za } 0 < j < m : \quad [X, Y]v_j &= XYv_j - YXv_j = (j + 1)Xv_{j+1} - (m - j + 1)Yv_{j-1} = \\ &= (j + 1)(m - j)v_j - (m - j + 1)jv_j = (m - 2j)v_j = Hv_j; \end{aligned}$$

$$[X, Y]v_m = XYv_m - YXv_m = -Yv_{m-1} = -mv_m = Hv_m.$$

Time je dokazano da operatori X , Y i H zadovoljavaju komutacione relacije

$$[H, X] = 2X, \quad [H, Y] = -2Y, \quad [X, Y] = H.$$

No tada je sa

$$\pi(\alpha x + \beta y + \gamma h) = \alpha X + \beta Y + \gamma H, \quad \alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{C},$$

zadana reprezentacija π Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ na prostoru V . Ta je reprezentacija ireducibilna. Doista, pretpostavimo da je $W \neq \{0\}$ potprostor od V koji je π -invarijantan, tj. koji je invarijantan s obzirom na operatore X , Y i H . Tada W sadrži neki svojstven vektor operatora H . Kako su vektori baze $v_0, \dots, v_m$ svojstveni vektori od H s međusobno različitim svojstvenim vrijednostima $m, m-2, \dots, -m+2, -m$, zaključujemo da je $v_j \in W$ za neki $j \in \{0, \dots, m\}$. Iz druge formule u (4.2) slijedi da su tada $v_0, \dots, v_{j-1} \in W$, a iz treće da su i $v_{j+1}, \dots, v_m \in W$. Dakle, nužno je $W = V$ i time je dokazana ireducibilnost reprezentacije π .

Na taj način dokazali smo:

Teorem 4.2.2. *Neka je $\mathfrak{g}$ kompleksna TDS-algebra sa standardnom bazom $\{x, y, h\}$.*

- (a) *Za svaki $m \in \mathbb{Z}_+$ postoji do na ekvivalenciju jedinstvena ireducibilna $(m+1)$ -dimenzionalna reprezentacija π_m Liejeve algebre $\mathfrak{g}$.*
- (b) *Težine reprezentacije π_m su $m, m-2, \dots, -m+2, -m$ i svaki je težinski potprostor jednodimenzijski.*
- (c) *Postoji do na skalarni multiplikator $\neq 0$ jedinstven primitivni vektor reprezentacije π_m i njegova težina je m .*
- (d) *Postoji baza $\{v_0, \dots, v_m\}$ prostora reprezentacije π_m na koju operatori $H = \pi_m(h)$, $X = \pi_m(x)$ i $Y = \pi_m(y)$ djeluju po formulama (4.2).*

Teorem 4.2.3. *Neka je π reprezentacija kompleksne TDS-algebre $\mathfrak{g}$ sa standardnom bazom $\{x, y, h\}$ na konačnodimenzijskom prostoru V .*

- (a) *Sve su težine reprezentacije π cijeli brojevi.*
- (b) *Za svaki $j \in \mathbb{Z}_+$ vrijedi $\dim V_j = \dim V_{-j}$.*
- (c) *Ako je $V = X_1 \dot{+} \dots \dot{+} X_s$ rastav prostora V u direktnu sumu π -invarijantnih potprostora takvih da je svaka subreprezentacija π_{X_i} ireducibilna, onda je $s = \dim V_0 + \dim V_1$. Preciznije, $\dim V_0$ je broj indeksa $i \in \{1, \dots, s\}$ takvih da je potprostor X_i neparne dimenzije, a $\dim V_1$ je broj indeksa $i \in \{1, \dots, s\}$ takvih da je potprostor X_i parne dimenzije.*

Dokaz: Prema Weylovom teoremu 2.4.4. o potpunoj reducibilnosti postoji rastav

$$V = X_1 \dot{+} \dots \dot{+} X_s,$$

gdje su svi potprostori X_i π -invarijantni i sve subreprezentacije π_{X_i} su ireducibilne. Svaka od tih subreprezentacija je prema teoremu 4.2.2. ekvivalentna nekoj od reprezentacija π_m čije su sve težine cijeli brojevi. Odatle neposredno slijedi tvrdnja (a), a i tvrdnja (b). Napokon, u svakoj neparnodimenzijskoj ireducibilnoj reprezentaciji težinski potprostor za težinu 0 je jednodimenzijski, a 1 nije težina, dok je s druge strane u svakoj parnodimenzijskoj ireducibilnoj reprezentaciji težinski potprostor za težinu 1 jednodimenzijski, a 0 nije težina. Odatle slijedi tvrdnja (c).

Činjenica da vrijedi $\dim V_j = \dim V_{-j}$ za prostor V bilo koje konačnodimenzionalne reprezentacije π slijedi i kao posljedica lako provjerljive činjenice da je sa

$$\tau : \alpha x + \beta y + \gamma h \mapsto -\alpha y - \beta x - \gamma h$$

zadan automorfizam Liejeve algebre $\mathfrak{g}$, tj. njen izomorfizam na samu sebe, i pri tom automorfizmu element h prelazi u $-h$. Napomenimo da se taj automorfizam τ može eksplicitno konstruirati pomoću adjungirane reprezentacije. U slučaju proizvoljne konačnodimenzionalne reprezentacije ista konstrukcija vodi na izomorfizam svakog težinskog potprostora V_j na težinski potprostor V_{-j} . U tu svrhu uočimo da su za svaku konačnodimenzionalnu reprezentaciju π na prostoru V operatori $\pi(x)$ i $\pi(y)$ nilpotentni, pa su dobro definirani operatori

$$e^{\pi(x)} = \sum_{k \in \mathbb{Z}_+} \frac{1}{k!} \pi(x)^k \quad \text{i} \quad e^{\pi(y)} = \sum_{k \in \mathbb{Z}_+} \frac{1}{k!} \pi(y)^k.$$

Nadalje, to su prema zadatku 3.4.2. elementi grupe $GL(V)$.

Može se dokazati da vrijedi:

Propozicija 4.2.4. *Neka je π konačnodimenzionalna reprezentacija kompleksne TDS-algebre $\mathfrak{g}$ sa standardnom bazom $\{x, y, h\}$ na vektorskom prostoru V . Za operator $A_\pi \in GL(V)$ definiran sa*

$$A_\pi = e^{\pi(x)} e^{-\pi(y)} e^{\pi(x)}$$

i za svaku težinu j reprezentacije π vrijedi

$$A_\pi V_j = V_{-j}.$$

Nadalje, ako je

$$\tau = A_{ad} = e^{ad x} e^{-ad y} e^{ad x}$$

onda je τ automorfizam Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ i vrijedi $\tau(\alpha x + \beta y + \gamma h) = -\alpha y - \beta x - \gamma h$. Napokon, za svaku konačnodimenzionalnu reprezentaciju π od $\mathfrak{g}$ vrijedi

$$A_\pi \pi(z) A_\pi^{-1} = \pi(\tau(z)) \quad \forall z \in \mathfrak{g}.$$

4.3 Korijenski rastav

U ovom odjeljku $\mathfrak{g}$ je poluprosta kompleksna Liejeva algebra i $\mathfrak{h}$ njena Cartanova podalgebra. Označavat ćemo sa R pripadni sistem korijena $R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$. Proučit ćemo sada поближе korijenski rastav od $\mathfrak{g}$ u odnosu na $\mathfrak{h}$:

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \dot{+} \sum_{\alpha \in R} \dot{+} \mathfrak{g}_{\alpha}, \quad \mathfrak{g}_{\alpha} = \{x \in \mathfrak{g}; [h, x] = \alpha(h)x \ \forall h \in \mathfrak{h}\}. \quad (4.3)$$

Neka je $B = B_{\mathfrak{g}}$ Killingova forma Liejeve algebre $\mathfrak{g}$. Prema teoremu 4.1.1. restrikcija $B|_{\mathfrak{h} \times \mathfrak{h}}$ je nedegenerirana. Zbog toga po propoziciji 2.6.2. dobro je definiran izomorfizam $\lambda \mapsto t_{\lambda}$ dualnog prostora $\mathfrak{h}^*$ na prostor $\mathfrak{h}$ sa svojstvom

$$\lambda(h) = B(h, t_{\lambda}) \quad \forall h \in \mathfrak{h}.$$

Teorem 4.3.1. (a) $\mathfrak{h}^* = \text{span } R$.

(b) $R = -R$, tj. $\alpha \in R \iff -\alpha \in R$.

(c) Za $\alpha \in R$, $x \in \mathfrak{g}_{\alpha}$ i $y \in \mathfrak{g}_{-\alpha}$ vrijedi

$$[x, y] = B(x, y)t_{\alpha}.$$

(d) Za svaki $\alpha \in R$ je $\alpha(t_{\alpha}) = B(t_{\alpha}, t_{\alpha}) \neq 0$.

(e) Za svaki $\alpha \in R$ je $[\mathfrak{g}_{\alpha}, \mathfrak{g}_{-\alpha}] = \mathbb{C}t_{\alpha}$, tj. $\dim [\mathfrak{g}_{\alpha}, \mathfrak{g}_{-\alpha}] = 1$.

(f) Za svaki $\alpha \in R$ postoji jedinstven $h_{\alpha} \in [\mathfrak{g}_{\alpha}, \mathfrak{g}_{-\alpha}]$ takav da je $\alpha(h_{\alpha}) = 2$. Vrijedi

$$h_{\alpha} = \frac{2}{B(t_{\alpha}, t_{\alpha})}t_{\alpha} = -h_{-\alpha}.$$

(g) Za $\alpha \in R$ i $x_{\alpha} \in \mathfrak{g}_{\alpha} \setminus \{0\}$ postoji $y_{\alpha} \in \mathfrak{g}_{-\alpha}$ takav da je $[x_{\alpha}, y_{\alpha}] = h_{\alpha}$. Tada je $\{x_{\alpha}, y_{\alpha}, h_{\alpha}\}$ standardna baza TDS-podalgebre $\mathfrak{s}_{\alpha}$ od $\mathfrak{g}$.

Dokaz: (a) Pretpostavimo da je $\mathfrak{h}^* \neq \text{span } R$. Tada postoji $h \in \mathfrak{h} \setminus \{0\}$ takav da je $\alpha(h) = 0 \ \forall \alpha \in R$. To znači da je $[h, \mathfrak{g}_{\alpha}] = \{0\} \ \forall \alpha \in R$. Kako je i $[h, \mathfrak{h}] = \{0\}$, iz korijenskog rastava (4.3) slijedi da je $[h, \mathfrak{g}] = \{0\}$, odnosno, $h \in Z(\mathfrak{g})$. No to je nemoguće jer je za poluprostu Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ centar $Z(\mathfrak{g})$ jednak $\{0\}$. Ova kontradikcija dokazuje da je $\mathfrak{h}^* = \text{span } R$.

(b) Neka je $\alpha \in R$ i pretpostavimo da $-\alpha \notin R$. Prema tvrdnji (c) teorema 3.2.4. slijedi da je $B(\mathfrak{g}_{\alpha}, \mathfrak{g}_{\beta}) = \{0\} \ \forall \beta \in R$, a također i $B(\mathfrak{g}_{\alpha}, \mathfrak{h}) = \{0\}$. Sada iz korijenskog rastava (4.3) zaključujemo da je $B(\mathfrak{g}_{\alpha}, \mathfrak{g}) = \{0\}$, a to je nemoguće zbog nedegeneriranosti Killingove forme B . Ova kontradikcija dokazuje da je nužno $-\alpha \in R$.

(c) Neka su $\alpha \in R$, $x \in \mathfrak{g}_{\alpha}$, $y \in \mathfrak{g}_{-\alpha}$ i $h \in \mathfrak{h}$. Zbog svojstava Killingove forme B imamo redom

$$B(h, [x, y]) = B([h, x], y) = \alpha(h)B(x, y) = B(h, t_{\alpha})B(x, y) = B(h, B(x, y)t_{\alpha}).$$

Kako je $B(x, y)t_{\alpha} \in \mathfrak{h}$ i kako je restrikcija $B|_{\mathfrak{h} \times \mathfrak{h}}$ nedegenerirana, zbog proizvoljnosti elementa $h \in \mathfrak{h}$ zaključujemo da vrijedi $[x, y] = B(x, y)t_{\alpha}$.

(e) Tvrdnja (c) pokazuje da je ili $[\mathfrak{g}_{\alpha}, \mathfrak{g}_{-\alpha}] = \{0\}$ ili je $[\mathfrak{g}_{\alpha}, \mathfrak{g}_{-\alpha}] = \mathbb{C}t_{\alpha}$. Neka je $x \in \mathfrak{g}_{\alpha} \setminus \{0\}$. Kad bi bilo $B(x, \mathfrak{g}_{-\alpha}) = \{0\}$, kao u dokazu tvrdnje (b) mogli bismo zaključiti da je $B(x, \mathfrak{g}) = \{0\}$. No to je nemoguće zbog nedegeneriranosti Killingove forme B . Prema tome, postoji $y \in \mathfrak{g}_{-\alpha}$ takav da je $B(x, y) \neq 0$. Prema tvrdnji (c) slijedi da je $[x, y] \neq 0$. To dokazuje da je $[\mathfrak{g}_{\alpha}, \mathfrak{g}_{-\alpha}] \neq \{0\}$, dakle, $[\mathfrak{g}_{\alpha}, \mathfrak{g}_{-\alpha}] = \mathbb{C}t_{\alpha}$.

(d) Pretpostavimo da je $\alpha(t_\alpha) = 0$. To znači da je

$$[t_\alpha, x] = [t_\alpha, y] = 0 \quad \forall x \in \mathfrak{g}_\alpha \quad \text{i} \quad \forall y \in \mathfrak{g}_{-\alpha}.$$

Kao u dokazu tvrdnje (e) možemo izabrati $x \in \mathfrak{g}_\alpha$ i $y \in \mathfrak{g}_{-\alpha}$ tako da bude $B(x, y) \neq 0$. Pomnožimo li jednog od njih pogodnim skalarom, vidimo da možemo pretpostaviti da je $B(x, y) = 1$. Tada prema tvrdnji (c) imamo $[x, y] = t_\alpha$. Slijedi da je $\mathfrak{s} = \text{span}\{x, y, t_\alpha\}$ trodimenzionalna rješiva Liejeva podalgebra od $\mathfrak{g}$. Budući da je $\text{ad}_\mathfrak{g}$ vjerna reprezentacija od $\mathfrak{g}$, Liejeva algebra $\mathfrak{s}$ izomorfna je Liejevoj podalgebri $\text{ad}_\mathfrak{g} \mathfrak{s}$ od $\mathfrak{gl}(\mathfrak{g})$. Prema teoremu 2.2.4. postoji baza od $\mathfrak{g}$ u kojoj svi operatori $\text{ad}_\mathfrak{g} s$, $s \in \mathfrak{s}$, imaju gornje trokutaste matrice. No tada su svi operatori $\text{ad}_\mathfrak{g} s$, $s \in [\mathfrak{s}, \mathfrak{s}]$, nilpotentni. Kako je $t_\alpha = [x, y] \in [\mathfrak{s}, \mathfrak{s}]$ slijedi da je t_α nilpotentan element od $\mathfrak{g}$. No to je nemoguće jer je element $t_\alpha \neq 0$ poluprost. Ova kontradikcija pokazuje da je $\alpha(t_\alpha) \neq 0$.

Tvrdnja (f) slijedi neposredno iz tvrdnji (d) i (e).

Za $x_\alpha \in \mathfrak{g}_\alpha \setminus \{0\}$ je $B(x_\alpha, \mathfrak{g}_{-\alpha}) \neq \{0\}$, pa zbog tvrdnje (e) možemo izabrati $y_\alpha \in \mathfrak{g}_{-\alpha}$ tako da bude

$$B(x_\alpha, y_\alpha) = \frac{2}{B(t_\alpha, t_\alpha)}.$$

Prema tvrdnji (c) i uz oznaku h_α iz tvrdnje (f) tada je $[x_\alpha, y_\alpha] = h_\alpha$. Nadalje, kako je $\alpha(h_\alpha) = 2$, imamo $[h_\alpha, x_\alpha] = 2x_\alpha$ i $[h_\alpha, y_\alpha] = -2y_\alpha$. Dakle, $\mathfrak{s}_\alpha = \text{span}\{x_\alpha, y_\alpha, h_\alpha\}$ je TDS-podalgebra od $\mathfrak{g}$ i $\{x_\alpha, y_\alpha, h_\alpha\}$ je njena standardna baza.

Primijenit ćemo sada rezultate prethodnog odjeljka na TDS-podalgebre $\mathfrak{s}_\alpha$ od $\mathfrak{g}$ i na njenu reprezentaciju $\text{ad}_\mathfrak{g}|_{\mathfrak{s}_\alpha}$ na prostoru $\mathfrak{g}$.

Teorem 4.3.2. (a) Za svaki $\alpha \in R$ je $\dim \mathfrak{g}_\alpha = 1$.

(b) Za svaki $\alpha \in R$ je $\mathbb{C}\alpha \cap R = \{\alpha, -\alpha\}$.

(c) Ako su $\alpha, \beta \in R$, onda je $\beta(h_\alpha) \in \mathbb{Z}$ i $\beta - \beta(h_\alpha)\alpha \in R$.

(d) Ako su $\alpha, \beta \in R$ takvi da je i $\alpha + \beta \in R$, onda je $[\mathfrak{g}_\alpha, \mathfrak{g}_\beta] = \mathfrak{g}_{\alpha+\beta}$.

(e) Neka su $\alpha, \beta \in R$ takvi da je $\beta \neq \pm\alpha$ i neka su

$$q = \max\{j \in \mathbb{Z}_+; \beta + j\alpha \in R\} \quad \text{i} \quad r = \max\{j \in \mathbb{Z}_+; \beta - j\alpha \in R\}.$$

Tada za $j \in \mathbb{Z}$ vrijedi $\beta + j\alpha \in R$ ako i samo ako je $-r \leq j \leq q$. Nadalje, vrijedi $\beta(h_\alpha) = r - q$.

(f) Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ generirana je sa $\cup_{\alpha \in R} \mathfrak{g}_\alpha$.

Dokaz: Neka je $\alpha \in R$. Prema tvrdnji (g) teorema 4.3.1. možemo izabrati $x_\alpha \in \mathfrak{g}_\alpha$ i $y_\alpha \in \mathfrak{g}_{-\alpha}$ tako da je $\mathfrak{s}_\alpha = \text{span}\{x_\alpha, y_\alpha, h_\alpha\}$ TDS-podalgebra od $\mathfrak{g}$ i da je $\{x_\alpha, y_\alpha, h_\alpha\}$ njena standardna baza. Promatrat ćemo reprezentaciju $\rho = \text{ad}_\mathfrak{g}|_{\mathfrak{s}_\alpha}$ TDS-algebre $\mathfrak{s}_\alpha$ na prostoru $\mathfrak{g}$. Stavimo sada

$$J = \{c \in \mathbb{C}; c\alpha \in R\}, \quad \text{dakle,} \quad \mathbb{C}\alpha \cap R = \{c\alpha; c \in J\},$$

i neka je

$$V = \mathfrak{h} + \sum_{c \in J} \mathfrak{g}_{c\alpha}.$$

Tada je V ρ -invarijantan potprostor od $\mathfrak{g}$. Neka je $\pi = \rho_V$ pripadna subreprezentacija reprezentacije ρ Liejeve algebre $\mathfrak{s}_\alpha$. Prema tvrdnji (a) teorema 4.2.3. sve težine te reprezentacije su cijeli brojevi. Te težine su 0 i $c\alpha(h_\alpha) = 2c$ za $c \in J$. Odatle slijedi da je $2c \in \mathbb{Z}$ za svaki $c \in J$, odnosno, da je $J \subseteq \frac{1}{2}\mathbb{Z}$.

Kao i prije sa V_n označimo težinski potprostor reprezentacije π za težinu $n \in \mathbb{Z}$. Prema tvrdnji (c) teorema 4.2.3. znamo da je broj ireducibilnih konstituenata reprezentacije π jednak $\dim V_0 + \dim V_1$. Štoviše, iz tvrdnje (b) teorema 4.2.2. znamo da su težine neke ireducibilne reprezentacije ili sve parne ili sve neparne. Dakle, $\dim V_0$ je broj ireducibilnih konstituenata reprezentacije π s parnim težinama, a $\dim V_1$ je broj ireducibilnih konstituenata od π s neparnim težinama.

Primijetimo sada da je $V_0 = \mathfrak{h}$. Prema tome, broj ireducibilnih konstituenata reprezentacije π s parnim težinama jednak je $\ell = \dim \mathfrak{h}$. Te je ireducibilne konstituente vrlo lako eksplicitno naći. Prije svega, $(\ell - 1)$ -dimenzionalni potprostor $\text{Ker } \alpha = \{h \in \mathfrak{h}; \alpha(h) = 0\}$ je očito π -invarijantan i na njemu je subreprezentacija od π trivijalna; dakle, u njoj je sadržano $\ell - 1$ ireducibilnih konstituenata od π s parnim težinama (tj. s jedinom težinom 0). Još jedan π -invarijantan potprostor od V s ireducibilnom subreprezentacijom i s parnim težinama je $\mathfrak{s}_\alpha$: težine su 2, 0, -2. Time smo došli do ukupno ℓ ireducibilnih konstituenata od π s parnim težinama, što znači ta takvih više nema. Odatle slijedi da $n\alpha \notin R$ za $n \in \mathbb{N}$, $n > 1$. Drugim riječima, vrijedi $J \cap \mathbb{Z} = \{1, -1\}$. Posebno, $2\alpha \notin R$. Odatle možemo zaključiti i da $\frac{1}{2}\alpha \notin R$; doista, kad bi $\beta = \frac{1}{2}\alpha$ bio korijen, onda bi to prema dokazanom značilo da $\alpha = 2\beta$ nije korijen. Dakle, $\frac{1}{2} \notin J$, a to znači da je $V_1 = \{0\}$. Prema tome, u reprezentaciji π uopće nema ireducibilnih konstituenata s neparnim težinama. Zaključujemo da je $V = \mathfrak{h} + \mathfrak{s}_\alpha$. To ima za posljedicu da je $\mathfrak{g}_\alpha = \mathbb{C}x_\alpha$, odnosno, $\dim \mathfrak{g}_\alpha = 1$. Nadalje, slijedi da je $J \subseteq \mathbb{Z}$, odnosno, vrijedi $J = \{1, -1\}$ ili $\mathbb{C}\alpha \cap R = \{\alpha, -\alpha\}$. Time su dokazane tvrdnje (a) i (b).

Neka su sada $\alpha, \beta \in R$. Tada je $\beta(h_\alpha)$ jedna od težina reprezentacije $\rho = \text{ad}_\mathfrak{g}|_{\mathfrak{s}_\alpha}$, pa iz tvrdnje (a) teorema 4.2.3. slijedi da je $\beta(h_\alpha) \in \mathbb{Z}$. Time je dokazana prva tvrdnja u (c).

Pretpostavimo sada da je $\beta \neq \pm\alpha$ i stavimo

$$X = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \dot{+} \mathfrak{g}_{\beta+j\alpha}.$$

Tada je očito X ρ -invarijantan potprostor od $\mathfrak{g}$. Kako je $\alpha(h_\alpha)$ sve težine te pripadne subreprezentacije $\pi = \rho_X$ su oblika $\beta(h_\alpha) + 2j$ za $j \in \mathbb{Z}$, dakle, ili su sve parne ili su sve neparne. Nadalje, svaki je težinski potprostor je jednodimenzionalan, pa je ili $\dim X_0 = 1$ i $\dim X_1 = 0$ ili je $\dim X_0 = 0$ i $\dim X_1 = 1$. U oba slučaja je $\dim X_0 + \dim X_1 = 1$, a to prema tvrdnji (c) teorema 4.2.3. znači da je reprezentacija $\pi = \rho_X$ Liejeve algebre $\mathfrak{s}_\alpha$ ireducibilna. Najveća je težina $\beta(h_\alpha) + 2q$, a najmanja $\beta(h_\alpha) - 2r$. Prema tvrdnji (b) teorema 4.2.2. vrijedi

$$\beta(h_\alpha) - 2r = -(\beta(h_\alpha) + 2q),$$

a odatle je $2\beta(h_\alpha) = 2r - 2q$, odnosno, $\beta(h_\alpha) = r - q$. Nadalje, iz iste tvrdnje vidimo da su težine reprezentacije $\pi = \rho_X$ upravo svi brojevi oblika $\beta(h_\alpha) + 2j$ za $j = -r, -r + 1, \dots, q - 1, q$. To znači da je $\mathfrak{g}_{\beta+j\alpha} \neq \{0\}$, tj. $\beta + j\alpha \in R$, ako i samo ako je $j \in \mathbb{Z}$ i $-r \leq j \leq q$. Time je dokazana tvrdnja (e).

Odatle slijedi i druga tvrdnja tvrdnja u (c) za $\beta \neq \pm\alpha$. Doista, vrijedi $-r \leq -(r - q) \leq q$, dakle,

$$\beta - \beta(h_\alpha)\alpha = \beta - (r - q)\alpha \in R.$$

Ako je $\beta = \alpha$, onda je $\beta(h_\alpha) = 2$, pa je

$$\beta - \beta(h_\alpha)\alpha = \alpha - 2\alpha = -\alpha \in R.$$

Napokon, ako je $\beta = -\alpha$, onda je $\beta(h_\alpha) = -2$, pa je opet

$$\beta - \beta(h_\alpha)\alpha = -\alpha + 2\alpha = \alpha \in R.$$

Time je tvrdnja (c) u potpunosti dokazana.

Neka su sada $\alpha, \beta \in R$ takvi da je i $\alpha + \beta \in R$. Uz prethodne oznake iz tvrdnje (e) tada je $q \geq 1$. Iz teorije reprezentacija TDS–algebre $\mathfrak{s}_\alpha$ znamo da za svaku težinu n ireducibilne reprezentacije $\pi = \rho_X$ manju od najveće vrijedi $\pi(x_\alpha)X_n = X_{n+2}$. Posebno je $\pi(x_\alpha)X_0 = X_2$, odnosno, $(ad_{\mathfrak{g}} x_\alpha)\mathfrak{g}_\beta = \mathfrak{g}_{\alpha+\beta}$, ili $[\mathfrak{g}_\alpha, \mathfrak{g}_\beta] = \mathfrak{g}_{\alpha+\beta}$. Time je dokazana tvrdnja (d).

Napokon, budući da je $\lambda \mapsto t_\lambda$ izomorfizam prostora $\mathfrak{h}^*$ na prostor $\mathfrak{h}$, iz tvrdnje (a) teorema 4.3.1. slijedi da $\{t_\alpha; \alpha \in R\}$ razapinje $\mathfrak{h}$. To prema tvrdnji (e) teorema 4.3.1. znači da je

$$\mathfrak{h} = \sum_{\alpha \in R} [\mathfrak{g}_\alpha, \mathfrak{g}_{-\alpha}]$$

(naravno, ovo nije direktna suma). Odatle slijedi tvrdnja (f).

Kako je restrikcija Killingove forme $B|_{\mathfrak{h} \times \mathfrak{h}}$ nedegenerirana, mogli smo definirati izomorfizam $\lambda \mapsto t_\lambda$ prostora $\mathfrak{h}^*$ na prostor $\mathfrak{h}$ i to ovako:

$$\lambda(h) = B(h, t_\lambda) \quad \forall h \in \mathfrak{h}.$$

Prenesimo sada pomoću tog izomorfizma bilinearnu formu $B|_{\mathfrak{h} \times \mathfrak{h}}$ na $\mathfrak{h}^* \times \mathfrak{h}^*$. Tu ćemo bilinearnu formu na $\mathfrak{h}^* \times \mathfrak{h}^*$ označavati sa $(\cdot | \cdot)$. Dakle,

$$(\lambda | \mu) = B(t_\lambda, t_\mu) = \text{Tr}(ad_{\mathfrak{g}} t_\lambda)(ad_{\mathfrak{g}} t_\mu) = \lambda(t_\mu) = \mu(t_\lambda), \quad \lambda, \mu \in \mathfrak{h}^*.$$

Prema tvrdnji (a) teorema 4.3.1. skup R razapinje čitav prostor $\mathfrak{h}^*$. Prema tome, postoji baza prostora $\mathfrak{h}^*$ sastavljena od korijena.

Propozicija 4.3.3. *Neka je $B = \{\alpha_1, \dots, \alpha_\ell\} \subseteq R$ baza prostora $\mathfrak{h}^*$. Tada je $R \subseteq \text{span}_{\mathbb{Q}} B$, odnosno, svaki korijen $\gamma \in R$ je $\mathbb{Q}$ –linearna kombinacija korijena $\alpha_1, \dots, \alpha_\ell$.*

Dokaz: Neka je $\gamma \in R$. Tada, naravno, vrijedi

$$\gamma = \sum_{i=1}^{\ell} c_i \alpha_i \quad \text{za neke } c_1, \dots, c_\ell \in \mathbb{C}.$$

Odatle slijedi

$$(\gamma | \alpha_j) = \sum_{i=1}^{\ell} (\alpha_i | \alpha_j) c_i, \quad j = 1, \dots, \ell.$$

Za svako $j \in \{1, \dots, \ell\}$ pomnožimo gornju jednakost sa $\frac{2}{(\alpha_j | \alpha_j)}$. Tako dobivamo sljedeći sistem od ℓ linearnih algebarskih jednačbi sa ℓ nepoznanica $c_1, \dots, c_\ell$:

$$2 \frac{(\gamma | \alpha_j)}{(\alpha_j | \alpha_j)} = \sum_{i=1}^{\ell} 2 \frac{(\alpha_i | \alpha_j)}{(\alpha_j | \alpha_j)} c_i, \quad j = 1, \dots, \ell. \quad (4.4)$$

Primijetimo sada da su svi koeficijenti u tom sustavu jednačbi cijeli brojevi. Doista, za proizvoljne $\alpha, \gamma \in R$ prema tvrdnji (c) teorema 4.3.2. vrijedi $\gamma(h_\alpha) \in \mathbb{Z}$, a po tvrdnji (f) teorema 4.3.1. je

$$h_\alpha = \frac{2}{B(t_\alpha, t_\alpha)} t_\alpha = \frac{2}{(\alpha | \alpha)} t_\alpha.$$

Odatle je

$$2 \frac{(\gamma | \alpha)}{(\alpha | \alpha)} = 2 \frac{\gamma(t_\alpha)}{(\alpha | \alpha)} = \gamma \left(\frac{2}{(\alpha | \alpha)} t_\alpha \right) = \gamma(h_\alpha) \in \mathbb{Z} \quad \forall \alpha, \beta \in R.$$

Time je dokazano da su svi koeficijenti sustava (4.4), tj.

$$2 \frac{(\gamma | \alpha_j)}{(\alpha_j | \alpha_j)} \quad \text{za } j = 1, \dots, \ell \quad \text{i} \quad 2 \frac{(\alpha_i | \alpha_j)}{(\alpha_j | \alpha_j)} \quad \text{za } i, j = 1, \dots, \ell,$$

cijeli brojevi.

Forma $(\cdot | \cdot)$ na $\mathfrak{h}^* \times \mathfrak{h}^*$ je nedegenerirana, pa je njena matrica u bilo kojoj bazi regularna. Posebno, matrica $[(\alpha_i | \alpha_j)]_{i,j=1}^\ell$ je regularna. No tada je regularna i matrica koja se iz nje dobije množenjem svakog retka nekim skalarom različitim od nule. Prema tome, matrica sistema (4.4)

$$\left[2 \frac{(\alpha_i | \alpha_j)}{(\alpha_j | \alpha_j)} \right]_{i,j=1}^\ell \in M_\ell(\mathbb{Z}) \subseteq M_\ell(\mathbb{Q})$$

je regularna. Stoga je njoj inverzna matrica element od $M_\ell(\mathbb{Q})$, a odatle slijedi da su svi skalari $c_1, \dots, c_\ell$ racionalni brojevi.

Teorem 4.3.4. (a) *Realan prostor $\mathfrak{h}^*(R) = \text{span}_{\mathbb{R}} R$ je realna forma prostora $\mathfrak{h}^*$ i realan prostor $\mathfrak{h}(R) = \text{span}_{\mathbb{R}} \{h_\alpha; \alpha \in R\}$ je realna forma prostora $\mathfrak{h}$. Nadalje, $\mathfrak{h}^*(R)$ se identificira s dualnim prostorom $\mathfrak{h}(R)^*$ prostora $\mathfrak{h}(R)$.*

(b) *Vrijedi*

$$(\lambda | \lambda) > 0 \quad \forall \lambda \in \mathfrak{h}^*(R) \setminus \{0\},$$

odnosno, restrikcija forme $(\cdot | \cdot)$ na $\mathfrak{h}^(R) \times \mathfrak{h}^*(R)$ je skalarni produkt na realnom vektorskom prostoru $\mathfrak{h}^*(R)$.*

(c) *Restrikcija Killingove forme B na $\mathfrak{h}(R) \times \mathfrak{h}(R)$ je skalarni produkt na realnom prostoru $\mathfrak{h}(R)$.*

Dokaz: (a) Iz propozicije 4.3.3. slijedi da je $\text{span}_{\mathbb{Q}}(B) = \text{span}_{\mathbb{Q}}(R)$ za svaku bazu B prostora $\mathfrak{h}^*$ sadržanu u R . No tada je i $\text{span}_{\mathbb{R}} B = \text{span}_{\mathbb{R}} R = \mathfrak{h}^*(R)$ za takvu bazu od $\mathfrak{h}^*$. No to znači da je jedna baza realnog prostora $\mathfrak{h}^*(R)$ ujedno baza kompleksnog prostora $\mathfrak{h}^*$, dakle, $\mathfrak{h}^*(R)$ je realna forma od $\mathfrak{h}^*$. Ostatak dokaza tvrdnje (a) ostavljamo za zadatak:

Zadatak 4.3.1. *Neka je B baza od $\mathfrak{h}^*$ sadržana u R . Dokažite:*

(a) $\{h_\alpha; \alpha \in B\}$ je baza od $\mathfrak{h}$.

(b) $\text{span}_{\mathbb{Q}} \{h_\alpha; \alpha \in B\} = \text{span}_{\mathbb{Q}} \{h_\alpha; \alpha \in R\}$.

(c) $\lambda \mapsto \lambda | \mathfrak{h}(R)$ je izomorfizam realnog prostora $\mathfrak{h}^*(R)$ na dualni prostor realnog prostora $\mathfrak{h}(R)$.

Dokažimo sada tvrdnju (b) teorema 4.3.4. Neka je $\{h_1, \dots, h_\ell\}$ baza od $\mathfrak{h}$. Za svaki $\alpha \in R$ izaberimo $x_\alpha \in \mathfrak{g}_\alpha \setminus \{0\}$. Tada je prema korijenskom rastavu od $\mathfrak{g}$ skup

$$\{h_1, \dots, h_\ell\} \cup \{x_\alpha; \alpha \in R\}$$

baza vektorskog prostora $\mathfrak{g}$. Za svaki $h \in \mathfrak{h}$ operator $ad h$ ima u toj bazi dijagonalnu matricu koja na dijagonali ima ℓ nula i brojeve $\alpha(h)$, $\alpha \in R$. Prema tome, za $h, k \in \mathfrak{h}$ je

$$B(h, k) = \text{Tr}(ad h)(ad k) = \sum_{\alpha \in R} \alpha(h)\alpha(k).$$

Stoga za $\lambda \in \mathfrak{h}^*(R) \setminus \{0\}$ vrijedi

$$(\lambda | \lambda) = B(t_\lambda, t_\lambda) = \sum_{\alpha \in R} \alpha(t_\lambda)^2.$$

Neka je opet B baza od $\mathfrak{h}^*$ sadržana u R . Tada je prema zadatku 4.3.1. $\{h_\beta; \beta \in B\}$ baza realnog prostora $\mathfrak{h}(R)$ pa imamo

$$t_\lambda = \sum_{\beta \in B} c_\beta h_\beta \quad \text{za neke } c_\beta \in \mathbb{R}.$$

Odatle dobivamo za svaki $\alpha \in R$:

$$\alpha(t_\lambda) = \sum_{\beta \in B} c_\beta \alpha(h_\beta) \in \mathbb{R} \quad \implies \quad \alpha(t_\lambda)^2 \geq 0.$$

Nadalje, kako R razapinja $\mathfrak{h}^*$ i $t_\lambda \neq 0$, za neki $\alpha \in R$ je $\alpha(t_\lambda) \neq 0$, dakle, $\alpha(t_\lambda)^2 > 0$. Odatle je

$$(\lambda|\lambda) = \sum_{\alpha \in R} \alpha(t_\lambda)^2 > 0.$$

Zadatak 4.3.2. *Dokažite tvrdnju (c) teorema 4.3.4.*

Za bilo koji vektor $\lambda \neq 0$ realnog unitarnog prostora $\mathfrak{h}^*(R)$ označimo sa σ_λ ortogonalnu refleksiju prostora $\mathfrak{h}^*(R)$ u odnosu na hiperravninu $\lambda^\perp$. Operator σ_λ zoveme **refleksija u odnosu na λ** . Ako $\mu \in \mathfrak{h}^*(R)$ prikažemo u obliku $\mu = c\lambda + \nu$ za jedinstvene $c \in \mathbb{C}$ i $\nu \perp \lambda$ onda je

$$\sigma_\lambda \mu = -c\lambda + \nu.$$

Tada je $(\mu|\lambda) = c(\lambda|\lambda)$, dakle,

$$c = \frac{(\mu|\lambda)}{(\lambda|\lambda)} \quad \text{i} \quad \nu = \mu - \frac{(\mu|\lambda)}{(\lambda|\lambda)}\lambda.$$

Prema tome, formula za refleksiju unitarnog prostora $\mathfrak{h}^*(R)$ u odnosu na $\lambda \in \mathfrak{h}^*(R)$ je

$$\sigma_\lambda \mu = \mu - 2 \frac{(\mu|\lambda)}{(\lambda|\lambda)}\lambda.$$

Propozicija 4.3.5. *Za svaki $\alpha \in R$ je $\sigma_\alpha R = R$.*

Dokaz: Neka su $\alpha, \beta \in R$. Prema tvrdnji (c) teorema 4.3.2. tada vrijedi $\beta - \beta(h_\alpha)\alpha \in R$. Nadalje, u dokazu propozicije 4.3.3. vidjeli smo da je

$$\beta(h_\alpha) = 2 \frac{(\beta|\alpha)}{(\alpha|\alpha)}.$$

Prema tome,

$$\sigma_\alpha \beta = \beta - 2 \frac{(\beta|\alpha)}{(\alpha|\alpha)}\alpha = \beta - \beta(h_\alpha)\alpha \in R.$$

Time je dokazano da je $\sigma_\alpha R \subseteq R$, a kako je σ_α^2 jedinični operator, zaključujemo da je $\sigma_\alpha R = R$.

Propozicija 4.3.6. (a) *Ako su $\alpha, \beta \in R$ takvi da je $(\alpha|\beta) < 0$ onda je $\alpha + \beta \in R$.*

(b) *Ako su $\alpha, \beta \in R$ takvi da je $(\alpha|\beta) > 0$ onda je $\alpha - \beta \in R$.*

Dokaz: (a) Iz $(\alpha|\beta) < 0$ slijedi $\beta(h_\alpha) = 2 \frac{(\beta|\alpha)}{(\alpha|\alpha)} < 0$, pa uz oznake iz tvrdnje (e) teorema 4.3.2. imamo $r - q < 0$, dakle, $q > 0$. No tada je prema toj tvrdnji $\alpha + \beta \in R$.

Tvrdnja (b) dobiva se sasvim analogno, a slijedi i neposredno iz tvrdnje (a) zamjenom β sa $-\beta$, jer znamo da je $-R = R$.

4.4 Sistemi korijena

U ovom odjeljku promatrat ćemo konačne podskupove konačnodimenzionalnog realnog unitarnog vektorskog prostora koji imaju neka od svojstava sistema korijena kompleksne poluproste Liejeve algebre.

U cijelom odjeljku V je konačnodimenzionalan realan unitaran prostor. Nadalje, za $x \in V$ označavamo sa σ_x ortogonalnu refleksiju prostora V u odnosu na x , tj.

$$\sigma_x v = v - 2 \frac{(v|x)}{(x|x)} x, \quad v \in V, \quad \text{tj.} \quad \sigma_x x = -x \quad \text{i} \quad \sigma_x v = v \quad \text{za} \quad v \perp x.$$

Sistem korijena u prostoru V je konačan podskup R od V sa sljedećim svojstvima:

- (1) $0 \notin R$ i R razapinje prostor V .
- (2) Za $\alpha, \beta \in R$ je $2 \frac{(\beta|\alpha)}{(\alpha|\alpha)} \in \mathbb{Z}$.
- (3) Za svaki $\alpha \in R$ je $\sigma_\alpha R = R$.
- (4) Ako su $\alpha, \beta \in R$ takvi da je $(\alpha|\beta) < 0$, onda je $\alpha + \beta \in R \cup \{0\}$.
- (5) Za $\alpha \in R$ i $c \in \mathbb{R}$ vrijedi $c\alpha \in R$ ako i samo ako je $c = 1$ ili $c = -1$.

U ovom sustavu aksioma ima suvišnih. U stvari, može se dokazati da je (4) posljedica prva tri aksioma. Nadalje, može se dokazati da bez pretpostavke (5) za svaki $\alpha \in R$ nužno vrijedi

$$\mathbb{R}\alpha \cap R \subseteq \left\{ \pm \frac{1}{2}\alpha, \pm\alpha, \pm 2\alpha \right\}.$$

Dakle, aksiom (5) ekvivalentan je aksiomu

$$(5') \quad \alpha \in R \implies 2\alpha \notin R.$$

Neka je R sistem korijena u prostoru V i R' sistem korijena u prostoru V' . **Izomorfizam sistema korijena** R na sistem korijena R' je izometrički izomorfizam unitarnih prostora $\varphi : V \rightarrow V'$ takav da je $R' = \varphi R$. Nadalje, **automorfizam sistema korijena** R je izomorfizam R na R , tj. ortogonalan operator $\tau : V \rightarrow V$ takav da je $\tau R = R$. Sa $\text{Aut}(R)$ označavamo skup svih automorfizama sistema korijena R . Tada je $\text{Aut}(R)$ podgrupa grupe $O(V)$ svih ortogonalnih operatora na prostoru V . Grupa $\text{Aut}(R)$ je konačna jer je R konačan podskup od V koji razapinje V , dakle, ako je $A : V \rightarrow V$ linearan operator takav da je $AR = R$, onda je A potpuno određen svojom restrikcijom $A|_R$, a ta je restrikcija permutacija konačnog skupa R .

Prema (3) za svaki $\alpha \in R$ je $\sigma_\alpha \in \text{Aut}(R)$. Sa $W(R)$ označavamo podgrupu od $\text{Aut}(R)$ generiranu sa $\{\sigma_\alpha; \alpha \in R\}$. Ta se podgrupa zove **Weylova grupa sistema korijena** R .

Propozicija 4.4.1. (a) Ako je φ izomorfizam sistema korijena R u prostoru V na sistem korijena R' u prostoru V' onda je $\sigma_{\varphi\alpha}\varphi = \varphi\sigma_\alpha$ za svaki $\alpha \in R$.

(b) Ako je $\tau \in \text{Aut}(R)$ i $\alpha \in R$ onda je $\sigma_{\tau\alpha} = \tau\sigma_\alpha\tau^{-1}$.

(c) $W(R)$ je normalna podgrupa grupe $\text{Aut}(R)$.

(d) Za $\alpha, \beta \in R$ vrijedi $\sigma_{\sigma_\beta\alpha} = \sigma_\beta\sigma_\alpha\sigma_\beta$.

Dokaz: (a) Kako je φ izometrički izomorfizam sa V na V' , za $\alpha \in R$ i $x \in V$ imamo

$$\sigma_{\varphi\alpha}\varphi x = \varphi x - 2\frac{(\varphi x|\varphi\alpha)}{(\varphi\alpha|\varphi\alpha)}\varphi\alpha = \varphi x - 2\frac{(x|\alpha)}{(\alpha|\alpha)}\varphi\alpha = \varphi\left(x - 2\frac{(x|\alpha)}{(\alpha|\alpha)}\alpha\right) = \varphi\sigma_\alpha x.$$

Dakle, $\sigma_{\varphi\alpha}\varphi = \varphi\sigma_\alpha$.

Tvrdnja (b) slijedi neposredno iz tvrdnje (a), a tvrdnja (c) iz tvrdnje (b). Napokon, tvrdnja (d) je posljedica tvrdnje (b) jer je $\sigma_\beta \in W(R) \subseteq \text{Aut}(R)$ i $\sigma_\beta^2 = I_V$, pa je $\sigma_\beta^{-1} = \sigma_\beta$.

Neka je R sistem korijena u prostoru V . Vektor $x \in V$ zove se **regularan** u odnosu na R , ako je $(\alpha|x) \neq 0 \ \forall \alpha \in R$. Skup V^{reg} svih regularnih vektora je komplement unije hiperravnina $\alpha^\perp$, $\alpha \in R$. Komponente povezanosti skupa V^{reg} zovu se **Weylove komore** u V u odnosu na sistem korijena R . Za $x \in V^{\text{reg}}$ stavimo

$$R_+(x) = \{\alpha \in R; (\alpha|x) > 0\} \quad \text{i} \quad R_-(x) = \{\alpha \in R; (\alpha|x) < 0\} = -R_+(x).$$

Tada je $R = R_+(x) \cup R_-(x)$ i $R_+(x) \cap R_-(x) = \emptyset$. Ako su $x, y \in V^{\text{reg}}$ u istoj Weylovoj komori onda zbog neprekidnosti funkcija $z \mapsto (\alpha|z)$, $\alpha \in R$, očito vrijedi $R_\pm(x) = R_\pm(y)$. Za Weylovu komoru C pisemo $R_\pm(C) = R_\pm(x)$ za bilo koji $x \in C$. Nije teško dokazati da vrijedi

Propozicija 4.4.2. *Podskup R_+ od R ima svojstva*

$$(a) \ R = R_+ \cup (-R_+) \text{ i } R_+ \cap (-R_+) = \emptyset,$$

$$(b) \text{ za } \alpha, \beta \in R_+ \text{ takve da je } \alpha + \beta \in R \text{ vrijedi } \alpha + \beta \in R_+,$$

ako i samo ako je $R_+ = R_+(C)$ za neku Weylovu komoru C .

Zadatak 4.4.1. * Dokažite propoziciju 4.4.2.

Neka je C Weylova komora. Za $\alpha \in R$ kažemo da je **prost korijen** u odnosu na C ako je $\alpha \in R_+(C)$ i ne postoje $\beta, \gamma \in R_+(C)$ takvi da je $\alpha = \beta + \gamma$. Skup svih prostih korijena u odnosu na Weylovu komoru C označavamo sa $B(C)$.

Teorem 4.4.3. *Neka je C Weylova komora u V u odnosu na sistem korijena R .*

$$(a) \ B(C) \text{ je baza vektorskog prostora } V.$$

$$(b) \text{ Za međusobno različite } \alpha, \beta \in B(C) \text{ vrijedi } (\alpha|\beta) \leq 0.$$

$$(c) \text{ Svaki } \beta \in R \text{ ima prikaz}$$

$$\beta = \pm \sum_{\alpha \in B(C)} c_\alpha \alpha, \quad \text{gdje su } c_\alpha \in \mathbb{Z}_+.$$

$$(d) \text{ Vrijedi}$$

$$R_+(C) = \left\{ \beta \in R; \beta = \sum_{\alpha \in B(C)} c_\alpha \alpha \text{ gdje su } c_\alpha \in \mathbb{Z}_+ \right\}.$$

Dokaz: Neka je $x \in C$. Ako je $\alpha \in R_+(C) \setminus B(C)$, postoje $\beta, \gamma \in R_+(C)$ takvi da je $\alpha = \beta + \gamma$. Stoga je $(\alpha|x) > (\beta|x)$ i $(\alpha|x) > (\gamma|x)$. Budući da je skup $R_+(C)$ konačan, odatle lako slijedi da je

$$R_+(C) = \left\{ \beta \in R; \beta = \sum_{\alpha \in B(C)} c_\alpha \alpha \text{ za neke } c_\alpha \in \mathbb{Z}_+ \right\}.$$

Time je dokazano (d), a budući da je R disjunktna unija $R_+(C)$ i $R_-(C) = -R_+(C)$, slijedi i tvrdnja (c).

Pretpostavimo da su $\alpha, \beta \in B(C)$ takvi da je $(\alpha|\beta) > 0$. Prema (4) tada vrijedi $\alpha - \beta, \beta - \alpha \in R \cup \{0\}$. Budući da su $\alpha, \beta \in B(C)$ i $\alpha = \beta + (\alpha - \beta)$ i $\beta = \alpha + (\beta - \alpha)$, zaključujemo da $\alpha - \beta \notin R_+(C)$ i $\beta - \alpha \notin R_+(C)$. To znači da je $\alpha - \beta = 0$, tj. $\alpha = \beta$. Time je dokazana tvrdnja (b).

Budući da skup R razapinje prostor V , iz (c) slijedi da $B(C)$ razapinje V . Treba još dokazati linearnu nezavisnost skupa $B(C)$. Pretpostavimo da je

$$\sum_{\alpha \in B(C)} c_\alpha \alpha = 0 \quad \text{za neke } c_\alpha \in \mathbb{R}.$$

Stavimo sada

$$\gamma = \sum_{\alpha \in B(C), c_\alpha > 0} c_\alpha \alpha \quad \text{i} \quad \delta = \sum_{\alpha \in B(C), c_\alpha < 0} c_\alpha \alpha.$$

Tada je prema tvrdnji (b)

$$(\gamma|\delta) = \sum_{\alpha, \beta \in B(C), c_\alpha > 0, c_\beta < 0} c_\alpha c_\beta (\alpha|\beta) \geq 0.$$

Stoga imamo

$$0 = (\gamma + \delta|\gamma + \delta) = (\gamma|\gamma) + (\delta|\delta) + 2(\gamma|\delta) \geq (\gamma|\gamma) + (\delta|\delta),$$

a odatle slijedi $\gamma = \delta = 0$. Sada je za $x \in C$

$$0 = (\gamma|x) = \sum_{\alpha \in B(C), c_\alpha > 0} c_\alpha (\alpha|x),$$

a budući da je $(\alpha|x) > 0$ za svaki $\alpha \in B(C)$, zaključujemo da je $\{\alpha \in B(C); c_\alpha > 0\} = \emptyset$. Analogno iz $\delta = 0$ slijedi da je i $\{\alpha \in B(C); c_\alpha < 0\} = \emptyset$. To pokazuje da je $c_\alpha = 0 \quad \forall \alpha \in B(C)$. Time je dokazano da je skup $B(C)$ linearno nezavisan, dakle, baza prostora V , odnosno, dokazana je tvrdnja (a).

Propozicija 4.4.4. *Za svaki $\alpha \in R$ postoji Weylova komora C takva da je $\alpha \in B(C)$.*

Dokaz: Neka je P ortogonalni projektor prostora V na potprostor $\alpha^\perp$. Dakle, $\text{Ker } P = \mathbb{R}\alpha$. Tada je

$$\{P\beta; \beta \in R, \beta \notin \mathbb{R}\alpha\} = \{P\beta; \beta \in R \setminus \{\alpha, -\alpha\}\}$$

konačan podskup potprostora $\alpha^\perp$ koji ne sadrži 0. Stoga postoji $y \in \alpha^\perp$ takav da je $(P\beta|y) \neq 0$ za svaki $\beta \in R \setminus \{\alpha, -\alpha\}$. Budući da je P ortogonalni projektor na $\alpha^\perp$ i $y \in \alpha^\perp$, to znači da je $(\beta|y) \neq 0$ za svaki $\beta \in R \setminus \{\alpha, -\alpha\}$. Tada su $\{(\alpha|\alpha) + |(\beta|\alpha)|; \beta \in R \setminus \{\alpha, -\alpha\}\}$ i $\{|(\beta|y)|; \beta \in R \setminus \{\alpha, -\alpha\}\}$ dva konačna skupa strogo pozitivnih brojeva, možemo izabrati $c > 0$ tako da bude

$$c(\alpha|\alpha) + c|(\beta|\alpha)| < |(\beta|y)| \quad \forall \beta \in R \setminus \{\alpha, -\alpha\}.$$

Tada za $x = y + c\alpha$ vrijedi $(\pm\alpha|x) = \pm c(\alpha|\alpha) \neq 0$ i

$$\beta \in R \setminus \{\alpha, -\alpha\} \implies (\beta|x) = (\beta|y) + c(\beta|\alpha) \neq 0.$$

Dakle, $x \in V^{\text{reg}}$. Neka je C Weylova komora koja sadrži x . Sada je

$$(\alpha|x) = (\alpha|y) + c(\alpha|\alpha) = c(\alpha|\alpha) > 0,$$

dakle, $\alpha \in R_+(x) = R_+(C)$. Nadalje, ako je $\beta \in R_+(C) \setminus \{\alpha\}$, onda imamo

$$(\beta|x) = |(\beta|x)| = |(\beta|y) + c(\beta|\alpha)| \geq |(\beta|y)| - c|(\beta|\alpha)| > c(\alpha|\alpha) = (\alpha|x).$$

To pokazuje da ne postoje $\beta, \gamma \in R_+(C)$ takvi da je $\alpha = \beta + \gamma$, a to znači da je $\alpha \in B(C)$.

Proučit ćemo sada moguće geometrijske odnose između dva neproporcionalna korijena $\alpha, \beta \in R$. Pretpostavimo da je $\|\alpha\| \geq \|\beta\|$. Eventualnom zamjenom β sa $-\beta$ možemo postići da bude $(\alpha|\beta) \leq 0$. Označimo sa $\vartheta \in \langle 0, \pi \rangle$ kut između vektora α i β . Tada imamo

$$2 \frac{(\beta|\alpha)}{(\alpha|\alpha)} \cdot 2 \frac{(\alpha|\beta)}{(\beta|\beta)} = 4 \frac{(\alpha|\beta)^2}{\|\alpha\|^2 \|\beta\|^2} = 4(\cos \vartheta)^2 < 4.$$

Budući da su $n(\beta, \alpha) = 2 \frac{(\beta|\alpha)}{(\alpha|\alpha)}$ i $n(\alpha, \beta) = 2 \frac{(\alpha|\beta)}{(\beta|\beta)}$ cijeli brojevi ≤ 0 i $|n(\beta, \alpha)| \leq |n(\alpha, \beta)|$, sve mogućnosti su prikazane u sljedećoj tablici:

	$n(\beta, \alpha)$	$n(\alpha, \beta)$	$\frac{\ \alpha\ ^2}{\ \beta\ ^2}$	$\cos \vartheta$	ϑ
1.	0	0		0	$\frac{\pi}{2}$ ili 90°
2.	-1	-1	1	$-\frac{1}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$ ili 120°
3.	-1	-2	2	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{3\pi}{4}$ ili 135°
4.	-1	-3	3	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{5\pi}{6}$ ili 150°

Propozicija 4.4.5. *Ako su $\alpha, \beta \in R$ i $(\alpha|\beta) < 0$, onda je $(\alpha|\alpha) + (\beta|\beta) + 4(\alpha|\beta) \leq 0$.*

Dokaz: Slučaj $\alpha = -\beta$ je trivijalan. Pretpostavimo da je $\alpha \neq -\beta$. Tada su α i β neproporcionalni i možemo pretpostaviti da je $\|\alpha\| \geq \|\beta\|$. Iz tablice mogućnosti vidimo da je tada

$$\frac{(\alpha|\alpha)}{(\beta|\beta)} + 2 \frac{(\alpha|\beta)}{(\beta|\beta)} = 0 \quad \text{i} \quad \frac{(\beta|\beta)}{(\beta|\beta)} + 2 \frac{(\alpha|\beta)}{(\beta|\beta)} \leq 0.$$

Zbrojimo li i pomnožimo sa $(\beta|\beta)$ dobivamo traženu nejednakost.

Ako je C Weylova komora i $\tau \in \text{Aut}(R)$, oĉito je i $\tau(C)$ Weylova komora. Posebno, Weylova grupa $W(R)$ djeluje na skupu svih Weylovih komora.

Teorem 4.4.6. (a) Weylova grupa $W(R)$ djeluje tranzitivno na skupu svih Weylovih komora.

(b) Za svaku Weylovu komoru C Weylova grupa $W(R)$ generirana je skupom $\{\sigma_\alpha; \alpha \in B(C)\}$.

Dokaz: Neka je C Weylova komora i neka je W' podgrupa od $W(R)$ generirana skupom $\{\sigma_\alpha; \alpha \in B(C)\}$. Neka je i D Weylova komora. Izaberimo $\sigma \in W'$ tako da broj elemenata $|\sigma(R_+(D)) \cap R_+(C)|$ bude najveći mogući. Pretpostavimo da je $\sigma(R_+(D)) \neq R_+(C)$. Tada oĉito $B(C)$ nije sadržano u $\sigma(R_+(D))$, pa postoji $\alpha \in B(C)$ takav da $\alpha \notin \sigma(R_+(D))$. Tvrdimo da je tada $\sigma_\alpha(R_+(C) \setminus \{\alpha\}) = R_+(C) \setminus \{\alpha\}$. Doista, neka je $\gamma \in R_+(C) \setminus \{\alpha\}$. Tada je

$$\gamma = \sum_{\beta \in B(C)} c_\beta \beta \quad \text{za neke } c_\beta \in \mathbb{Z}_+$$

i sigurno je $c_\beta > 0$ za neki $\beta \neq \alpha$. Nadalje,

$$\sigma_\alpha \gamma = \gamma - 2 \frac{(\gamma|\alpha)}{(\alpha|\alpha)} \alpha = \sum_{\beta \in B(C)} d_\beta \beta \quad \text{i} \quad d_\beta = c_\beta \quad \text{za } \beta \neq \alpha.$$

Prema tome, za neki $\beta \in B(C)$ je $d_\beta > 0$, a to prema teoremu 4.4.3. znaĉi da je $\sigma_\alpha \gamma \in R_+(C) \setminus \{\alpha\}$. Odatle slijedi da presjek $\sigma_\alpha \sigma(R_+(D)) \cap R_+(C)$ sadrži skup $(\sigma(R_+(D)) \cap R_+(C)) \cup \{\alpha\}$, a to je nemoguće zbog izbora elementa $\sigma \in W'$, tj. zbog maksimalnosti broja $|\sigma(R_+(D)) \cap R_+(C)|$. Ova kontardikcija pokazuje da je $\sigma(R_+(D)) = R_+(C)$. To znaĉi da je $\sigma(D) = C$. Time je dokazano da grupa W' djeluje tranzitivno na skupu svih Weylovih komora.

Ostaje još da se dokaŹe da je $W' = W(R)$. Neka je $\alpha \in R$. Prema propoziciji 4.4.4. postoji Weylova komora D takva da je $\alpha \in B(D)$. Izaberimo $\sigma \in W'$ tako da bude $\sigma(D) = C$, dakle, $\sigma(B(D)) = B(C)$. Tada je $\sigma\alpha = \beta \in B(C)$, a prema tvrdnji (b) propozicije 4.4.1. je $\sigma_\beta = \sigma_{\sigma\alpha} = \sigma\sigma_\alpha\sigma^{-1}$. Odatle je $\sigma_\alpha = \sigma^{-1}\sigma_\beta\sigma \in W'$. Dakle, skup $\{\sigma_\alpha; \alpha \in R\}$ sadrŹan je u grupi W' , a kako taj skup generira ĉitavu grupu $W(R)$, zakljuĉujemo da je $W' = W(R)$.

Napominjemo da se moŹe dokazati da Weylova grupa $W(R)$ djeluje *prosto tranzitivno* na skupu svih Weylovih komora, tj. da za Weylove komore C i D postoji jedinstven $\sigma \in W(R)$ takav da je $\sigma(D) = C$.

ZadrŹimo oznake

$$n(\alpha, \beta) = 2 \frac{(\alpha|\beta)}{(\beta|\beta)}, \quad \alpha, \beta \in R.$$

Tada je

$$\sigma_\alpha \beta = \beta - n(\beta, \alpha) \alpha, \quad \alpha, \beta \in R.$$

Teorem 4.4.7. Neka su R i R' sistemi korijena u realnim prostorima V i V' i neka je C Weylova komora u V u odnosu na R i C' Weylova komora u V' u odnosu na R' . Svaka bijekcija $\varphi : B(C) \rightarrow B(C')$, takva da je $n(\varphi\alpha, \varphi\beta) = n(\alpha, \beta) \quad \forall \alpha, \beta \in B(C)$ i da je $\|\varphi\alpha\| = \|\alpha\| \quad \forall \alpha \in B(C)$ jedinstveno se proširuje do izomorfizma sistema korijena R na sistem korijena R' . Obratno, ako je φ izomorfizam sistema korijena R na sistem korijena R' onda vrijedi $n(\varphi\alpha, \varphi\beta) = n(\alpha, \beta) \quad \forall \alpha, \beta \in R$.

Dokaz: Pretpostavimo prvo da je φ izomorfizam sistema korijena R na sistem korijena R' . Tada je $\varphi : V \rightarrow V'$ izometrički izomorfizam, tj. $(\varphi x, \varphi y) = (x|y) \quad \forall x, y \in V$. Posebno, za korijene $\alpha, \beta \in R$ imamo

$$n(\varphi\alpha, \varphi\beta) = 2 \frac{(\varphi\alpha|\varphi\beta)}{(\varphi\beta|\varphi\beta)} = 2 \frac{(\alpha|\beta)}{(\beta|\beta)} = n(\alpha, \beta).$$

Pretpostavimo sada da je $\varphi : B(C) \rightarrow B(C')$ bijekcija takva da vrijedi $n(\varphi\alpha, \varphi\beta) = n(\alpha, \beta) \quad \forall \alpha, \beta \in B(C)$ i $\|\varphi\alpha\| = \|\alpha\| \quad \forall \alpha \in B(C)$. Neka je istim znakom φ označen jedinstven izomorfizam sa V na V' koji proširuje tu bijekciju. Tada za $\alpha, \beta \in B(C)$ imamo

$$\sigma_{\varphi\alpha}\varphi\beta = \varphi\beta - n(\varphi\beta, \varphi\alpha)\varphi\alpha = \varphi(\beta - n(\beta, \alpha)\alpha) = \varphi\sigma_\alpha\beta.$$

Budući da je $B(C)$ baza od V , odatle slijedi da je $\sigma_{\varphi\alpha}\varphi = \varphi\sigma_\alpha$, odnosno, $\sigma_{\varphi\alpha} = \varphi\sigma_\alpha\varphi^{-1}$. Zbog tvrdnje (b) teorema 4.4.6. slijedi $W(R') = \varphi W(R)\varphi'$.

Za $\alpha \in R$ prema propoziciji 4.4.4. i prema tvrdnji (a) teorema 4.4.6. postoji $\sigma \in W(R)$ takav da je $\sigma\alpha \in B(C)$. Sada je

$$\varphi\alpha = (\varphi\sigma^{-1}\varphi^{-1})(\varphi\sigma\alpha) \in R'$$

jer je $\varphi\sigma^{-1}\varphi^{-1} \in W(R')$. Prema tome, $\varphi(R) \subseteq R'$. Analogno vrijedi i $\varphi^{-1}(R') \subseteq R$, a iz te dvije inkluzije slijedi jednakost $\varphi(R) = R'$.

Napokon, iz $n(\varphi\alpha, \varphi\beta) = n(\alpha, \beta)$ i $\|\varphi\beta\| = \|\beta\|$ slijedi $(\varphi\alpha|\varphi\beta) = (\alpha|\beta) \quad \forall \alpha, \beta \in B(C)$. Kako je $B(C)$ baza prostora V , odatle se pomoću Gramm–Schmidtovog postupka dokazuje da izomorfizam $\varphi : V \rightarrow V'$ prevodi ortonormiranu bazu prostora V (dobivenu ortonormiranjem baze $B(C)$ Gramm–Schmidtovim postupkom) prevodi u ortonormiranu bazu prostora V' (dobivenu Gramm–Schmidtovim postupkom iz baze $B(C')$). Dakle, φ je izometrija, što znači da je φ izomorfizam sistema korijena R na sistem korijena R' .

Za korijene $\alpha, \beta \in R$ kažemo da su jedan drugome **susjedi** ako je $\alpha \neq \pm\beta$ i $(\alpha|\beta) \neq 0$. Za podskup S od R **lanac** u S je konačan niz $(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m)$ elemenata iz S takvih da su α_{i-1} i α_i susjedi za $i = 1, \dots, m$. Poskup $S \subseteq R$ je **povezan** ako za svaka dva njegova međusobno različita elementa α i β postoji lanac $(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m)$ u S takav da je $\alpha_0 = \alpha$ i $\alpha_m = \beta$. Na povezanom podskupu S od R možemo definirati metriku ovako:

$$d_S(\alpha, \beta) = \min \{m \in \mathbb{N}; \text{ postoji lanac } (\alpha_0, \dots, \alpha_m) \text{ takav da je } \alpha_0 = \alpha \text{ i } \alpha_m = \beta\}, \quad \alpha \neq \beta,$$

$$d_S(\alpha, \alpha) = 0.$$

Propozicija 4.4.8. *Neka je $S \neq \emptyset$ povezan podskup od R . Postoji $\beta \in S$ takav da je $S \setminus \{\beta\}$ povezan.*

Dokaz: Možemo pretpostaviti da skup S ima barem dva elementa. Izaberimo $\alpha, \beta \in S$ tako da udaljenost $d_S(\alpha, \beta)$ bude maksimalna. Tvrdimo da je tada skup $S \setminus \{\beta\}$ povezan. Doista, neka je $\gamma \in S \setminus \{\beta\}$ i neka je $(\alpha_0, \dots, \alpha_m)$ lanac u S takav da je $\alpha_0 = \alpha$, $\alpha_m = \gamma$ i $m = d_S(\alpha, \gamma)$. Tada je $m \leq d_S(\alpha, \beta)$, dakle, $\alpha_i \neq \beta \quad \forall i \in \{0, \dots, m\}$. Dakle, $(\alpha_0, \dots, \alpha_m)$ je lanac u $S \setminus \{\beta\}$.

Za povezan skup $S \subseteq R$ korijen $\beta \in S$ je **ekstreman** ako je skup $S \setminus \{\beta\}$ povezan. **Standardan podskup** od R je podskup $S \subseteq R_+(C)$ za neku Weylovu komoru C takav da je $(\alpha|\beta) \leq 0 \quad \forall \alpha, \beta \in S, \alpha \neq \beta$. Prema tvrdnji (b) teorema 4.4.3. za Weylovu komoru C baza $B(C)$ je standardni podskup od R . Sasvim analogno dokazu linearne nezavisnosti od $B(C)$ dokazuje se:

Propozicija 4.4.9. *Svaki standardni podskup od R je linearno nezavisan.*

Propozicija 4.4.10. *Neka je S povezan standardni podskup od R . Tada je*

$$\beta_S = \sum_{\alpha \in S} \alpha \in R.$$

Ako su svi korijeni $\alpha \in S$ iste duljine, onda je $\|\beta_S\| = \|\alpha\|$ za $\alpha \in S$.

Dokaz: Pretpostavimo da prva tvrdnja nije istinita i neka je S kontraprimjer s najmanjim mogućim brojem elemenata; naravno, $|S| \geq 2$. Neka je β ekstremni korijen iz S . Tada je skup $T = S \setminus \{\beta\}$ standardan, pa je po pretpostavci $\beta_T \in R$. Nadalje, iz pretpostavke slijedi da je $(\beta_T, \beta) < 0$. Sada iz aksioma (4) sistema korijena slijedi da je $\beta_S = \beta_T + \beta \in R \cup \{0\}$. Kako zbog linearne nezavisnosti skupa S vrijedi $\beta_S \neq 0$, zaključujemo da je $\beta_S \in R$. Ova kontradikcija dokazuje prvu tvrdnju.

Pretpostavimo sada da su svi korijeni iz S iste duljine d i da druga tvrdnja nije istinita. Neka je ponovo S kontraprimjer s najmanjim mogućim brojem elemenata. Za ekstremni korijen $\beta \in S$ i za $T = S \setminus \{\beta\}$ je tada $\|\beta_T\| = \|\beta\| = d$. Kako je opet $(\beta_T|\beta) < 0$, iz tablice na str. 90 zbog $\|\beta_T\| = \|\beta\|$ slijedi

$$2 \frac{(\beta_T|\beta)}{(\beta_T|\beta_T)} = 2 \frac{(\beta_T|\beta)}{(\beta|\beta)} = -1.$$

Odatle je $2(\beta_T|\beta) = -(\beta|\beta) = -d^2$, dakle,

$$\|\beta_S\|^2 = (\beta_T + \beta|\beta_T + \beta) = (\beta_T|\beta_T) = (\beta|\beta) + (\beta_T|\beta_T) + 2(\beta_T|\beta) = d^2 + d^2 - d^2 = d^2.$$

Ova kontradikcija dokazuje drugu tvrdnju.

Neka je C Weylova komora. Za $\beta \in R$ definiramo **nivo korijena** β u odnosu na C : to je prirodan broj $\ell_C(\beta)$ zadan ovako:

$$\beta = \sum_{\alpha \in B(C)} c_\alpha \alpha \quad \implies \quad \ell_C(\beta) = \sum_{\alpha \in B(C)} |c_\alpha|.$$

Dakle, za $\beta \in R_+(C)$ je $\ell_C(\beta) = \sum_{\alpha \in B(C)} c_\alpha$, a za $\beta \in R_-(C)$ je $\ell_C(\beta) = \ell_C(-\beta)$. Nadalje, definiramo **nosač korijena** β u odnosu na C :

$$Supp_C(\beta) = \{\alpha \in B(C); c_\alpha \neq 0\}.$$

Propozicija 4.4.11. *Za $\beta \in R_+(C) \setminus B(C)$ postoji $\alpha \in Supp_C(\beta)$ takav da je $\beta - \alpha \in R_+(C)$. Za svaki takav α je $\ell_C(\beta) = \ell_C(\beta - \alpha) + 1$.*

Dokaz: Iz $(\beta|\beta) > 0$ slijedi da je $(\beta|\alpha) > 0$ za neki $\alpha \in Supp_C(\beta)$. Za takav α prema tvrdnji (b) propozicije 4.3.6. razlika $\beta - \alpha$ je korijen. Neki od koeficijenata korijena $\beta - \alpha$ u rastavu po bazi $B(C)$ je pozitivan, pa slijedi da je $\beta - \alpha \in R_+(C)$. Posljednja je tvrdnja trivijalna.

Propozicija 4.4.12. *Za svaki korijen β nosač $Supp_C(\beta)$ je povezan.*

Dokaz: Pretpostavimo da tvrdnja nije istinita i neka je $\beta \in R_+(C)$ kontraprimjer s najmanjim nivoom $\ell_C(\beta)$. Budući da $Supp_C(\beta)$ nije povezan, vrijedi $Supp_C(\beta) = S_1 \cup S_2$, gdje su S_1 i S_2 neprazni i disjunktni i vrijedi $(\alpha_1|\alpha_2) = 0$ za bilo koje $\alpha_1 \in S_1$ i $\alpha_2 \in S_2$. Budući da je $(\beta|\beta) > 0$ i svi koeficijenti c_α u prikazu β pomoću baze $B(C)$ su ≥ 0 , postoji $\gamma \in Supp_C(\beta)$ takav da je $(\beta|\gamma) > 0$. Tada je prema tvrdnji (b) propozicije 4.3.6. $\beta - \gamma \in R_+(C)$. Možemo pretpostaviti da je $\gamma \in S_1$. Budući da je $\ell_C(\beta - \gamma) < \ell_C(\beta)$, po pretpostavci indukcije nosač $Supp_C(\beta - \gamma)$ je povezan. Međutim, očito je

$$Supp_C(\beta - \gamma) = (S_1 \setminus \{\gamma\}) \cup S_2.$$

Iz povezanosti nosača $\text{Supp}_C(\beta - \gamma)$ slijedi da je $S_1 \setminus \{\gamma\} = \emptyset$, tj. $S_1 = \{\gamma\}$, i $c_\gamma = 1$. Dakle,

$$\beta = \gamma + \sum_{\alpha \in S_2} c_\alpha \alpha.$$

Prema aksiomima sistema korijena $\sigma_\gamma \beta$ je korijen. Nadalje, za svaki $\alpha \in S_2$ je $(\gamma|\alpha) = 0$, dakle, $\sigma_\gamma \alpha = \alpha$. Slijedi

$$\sigma_\gamma \beta = \sigma_\gamma \gamma + \sum_{\alpha \in S_2} c_\alpha \sigma_\gamma \alpha = -\gamma + \sum_{\alpha \in S_2} c_\alpha \alpha.$$

Dobivena jednakost u suprotnosti je s tvrdnjom (c) teorema 4.4.3. Ova kontradikcija dokazuje propoziciju.

Neka je R sistem korijena u prostoru V . Podskup R' od R zove se **podsystem** od R , ako za potprostor $V' = \text{span } R'$ vrijedi $R' = R \cap V'$. Primijetimo da je tada R' sistem korijena u prostoru V' : naime, za $\alpha \in V'$ je $\sigma_\alpha V' = V'$, pa posebno za $\alpha \in R'$ vrijedi

$$\sigma_\alpha R' = \sigma_\alpha (R \cap V') = \sigma_\alpha R \cap \sigma_\alpha V' = R \cap V' = R'.$$

Za podsystem R'' od R kažemo da je **komplementaran** podsystemu R' , ako je $R'' = R \setminus R'$ i vrijedi $V = V' \dot{+} V''$ za $V' = \text{span } R'$ i $V'' = \text{span } R''$. Podsystem R' zove se **direktni faktor** od R ako je $R \setminus R'$ podsystem od R komplementaran podsystemu R' . Za direktni faktor R' od R kažemo da je **netrivijalan** ako je $R' \neq \emptyset$ i $R' \neq R$. Kažemo da je R **ireducibilan sistem korijena** ako je $R \neq \emptyset$ i R ne sadrži nijedan netrivijski direktni faktor.

Propozicija 4.4.13. *Ako su R' i R'' komplementarni podsystemi od R , onda su potprostori $V' = \text{span } R'$ i $V'' = \text{span } R''$ međusobno ortogonalni, tj. $V = V' \oplus V''$.*

Dokaz: Za $\alpha \in R'$ refleksija σ'_α prostora V' u odnosu na α je restrikcija na V' refleksije σ_α prostora V u odnosu na α . Imamo $\sigma_\alpha R' = R'$ i $\sigma_\alpha R = R$ za svaki $\alpha \in R'$, pa slijedi i $\sigma_\alpha R'' = R''$ za svaki $\alpha \in R'$. Slijedi $\sigma_\alpha V'' = V''$ za svaki $\alpha \in R'$. Međutim, za $v'' \in V''$ i $\alpha \in R'$ imamo

$$\sigma_\alpha v'' = v'' - 2 \frac{(\alpha|v'')}{(\alpha|\alpha)} \alpha \implies 2 \frac{(\alpha|v'')}{(\alpha|\alpha)} \alpha = v'' - \sigma_\alpha v'' \in V' \cap V'' = \{0\} \implies (\alpha|v'') = 0.$$

Dakle, $\alpha \perp V'' \forall \alpha \in R'$, pa slijedi $V' \perp V''$.

Korolar 4.4.14. *Ako je neka baza sistema korijena R povezana, sve su baze od R povezane i R je ireducibilan sistem korijena.*

Dokaz: Ako su $B = B(C)$ i $B_1 = B(C_1)$ baze sistema korijena R pridružene Weylovim komorama C i C_1 , prema tvrdnji (a) teorema 4.4.6. postoji $\sigma \in W(R)$ takav da je $\sigma C = C_1$, dakle, $\sigma B = B_1$. Kako su elementi Weylove grupe ortogonalni operatori, iz povezanosti baze B slijedi povezanost baze B_1 .

Pretpostavimo sada da R nije ireducibilan i neka su R' i R'' međusobno komplementarni netrivijski podsystemi od R . Neka je B' baza sistema korijena R' i B'' baza sistema korijena R'' . Tada je $B' \cup B''$ baza sistema korijena R i ona je zbog propozicije 4.4.13. nepovezana.

Propozicija 4.4.15. *Neka su R_1 i R_2 direktni faktori sistema korijena R . Tada su $R_1 \cup R_2$ i $R_1 \cap R_2$ direktni faktori od R .*

Dokaz: Neka su R'_1 i R'_2 podsystemi od R komplementarni podsystemima R_1 i R_2 . Stavimo

$$V_1 = \text{span } R_1, \quad V_2 = \text{span } R_2, \quad V'_1 = \text{span } R'_1, \quad V'_2 = \text{span } R'_2.$$

Tvrdimo da su $R_1 \cap R_2$ i $R'_1 \cup R'_2$ međusobno komplementarni podsistemi od R i da vrijedi

$$\text{span}(R_1 \cap R_2) = V_1 \cap V_2 \quad \text{i} \quad \text{span}(R'_1 \cup R'_2) = V'_1 + V'_2.$$

Prije svega, iz $R = R_1 \cup R'_1$ i $R = R_2 \cup R'_2$, slijedi

$$R = (R_1 \cup R'_1) \cap (R_2 \cup R'_2) = (R_1 \cap R_2) \cup (R_1 \cap R'_2) \cup (R'_1 \cap R_2) \cup (R'_1 \cap R'_2) \subseteq (R_1 \cap R_2) \cup (R'_1 \cup R'_2),$$

dakle, vrijedi

$$R = (R_1 \cap R_2) \cup (R'_1 \cup R'_2).$$

S druge strane, kako je $R_1 \cap R'_1 = \emptyset$ i $R_2 \cap R'_2 = \emptyset$, imamo

$$(R_1 \cap R_2) \cap (R'_1 \cup R'_2) = (R_1 \cap R_2 \cap R'_1) \cup (R_1 \cap R_2 \cap R'_2) = \emptyset.$$

Što se tiče potprostora razapetih s ta dva komplementarna podskupa od R , imamo

$$\text{span}(R'_1 \cup R'_2) = \text{span } R'_1 + \text{span } R'_2 = V'_1 + V'_2.$$

Nadalje,

$$V_1 \cap V_2 = (\text{span } R_1) \cap (\text{span } R_2) \supseteq \text{span}(R_1 \cap R_2).$$

Prema tome, vrijedi

$$V = \text{span } R = \text{span}(R_1 \cap R_2) + \text{span}(R'_1 \cup R'_2) \subseteq (V_1 \cap V_2) + (V'_1 + V'_2),$$

dakle,

$$V = (V_1 \cap V_2) + (V'_1 + V'_2).$$

Dokažimo da je ta suma direktna. Prije svega, iz

$$\dim V \leq \dim(V_1 \cap V_2) + \dim(V'_1 + V'_2) \quad \text{i} \quad \dim(V'_1 + V'_2) = \dim V'_1 + \dim V'_2 - \dim(V'_1 \cap V'_2)$$

slijedi

$$\dim V \leq \dim(V_1 \cap V_2) - \dim(V'_1 \cap V'_2) + \dim V'_1 + \dim V'_2. \quad (4.5)$$

Zamijenimo li uloge R_1 i R_2 sa R'_1 i R'_2 dobivamo i nejednakost

$$\dim V \leq \dim(V'_1 \cap V'_2) - \dim(V_1 \cap V_2) + \dim V_1 + \dim V_2.$$

Kako je $\dim V = \dim V_1 + \dim V'_1 = \dim V_2 + \dim V'_2$, imamo $\dim V_1 = \dim V - \dim V'_1$ i $\dim V_2 = \dim V - \dim V'_2$, pa iz prethodne nejednakosti dobivamo

$$\dim V \leq \dim(V'_1 \cap V'_2) - \dim(V_1 \cap V_2) + 2 \dim V - \dim V'_1 - \dim V'_2,$$

odnosno,

$$\dim V \geq \dim(V_1 \cap V_2) - \dim(V'_1 \cap V'_2) + \dim V'_1 + \dim V'_2.$$

Dakle, u (4.5) vrijedi znak jednakosti, pa slijedi

$$\dim V = \dim(V_1 \cap V_2) + \dim V'_1 + \dim V'_2 - \dim(V'_1 \cap V'_2) = \dim(V_1 \cap V_2) + \dim(V'_1 + V'_2).$$

Time je dokazano da je

$$V = (V_1 \cap V_2) \dot{+} (V'_1 + V'_2).$$

Treba još dokazati da je $\text{span}(R_1 \cap R_2) = V_1 \cap V_2$, a ne samo $\text{span}(R_1 \cap R_2) \subseteq V_1 \cap V_2$. Pretpostavimo da je $v \in V_1 \cap V_2$ ortogonalan na sve korijene $\alpha \in R_1 \cap R_2$. Kako je

$$(V_1 \cap V_2)^\perp = V_1^\perp + V_2^\perp = V'_1 + V'_2 = \text{span}(R'_1 \cup R'_2),$$

sljedi da je v ortogonalan i na sve korijene iz $R'_1 \cup R'_2$. Sada iz $R = (R_1 \cap R_2) \cup (R'_1 \cup R'_2)$ zaključujemo da je v ortogonalan na sve korijene iz R . Kako je $V = \text{span } R$, sljedi $v = 0$. Time je dokazano da je $\text{span}(R_1 \cap R_2) = V_1 \cap V_2$.

To pokazuje da su $R_1 \cap R_2$ i $R'_1 \cup R'_2$ međusobno komplementarni podskupovi od R i da je

$$V = \text{span}(R_1 \cap R_2) \dot{+} \text{span}(R'_1 \cup R'_2).$$

Drugim riječima, $R_1 \cap R_2$ i $R'_1 \cup R'_2$ su međusobno komplementarni podsistemi od R . Posebno, $R_1 \cap R_2$ je direktni faktor od R . Također je $R'_1 \cup R'_2$ direktni faktor od R , a zamjenom uloge R_1 i R_2 sa R'_1 i R'_2 zaključujemo da je $R_1 \cup R_2$ direktni faktor od R .

Za podskup S od R stavimo

$$V_S = \text{span } S \quad \text{i} \quad R_S = R \cap V_S.$$

Očito je za svaki podskup S od R tako definiran skup R_S podsistem od R koji sadrži S . Štoviše, R_S je najmanji podsistem od R koji sadrži skup S .

Teorem 4.4.16. *Neka je $B = B(C)$ baza sistema korijena R u odnosu na neku Weyalovu komoru C . Neka su $B_1, \dots, B_s$ sve različite komponente povezanosti od B . Tada su $R_{B_1}, \dots, R_{B_s}$ svi ireducibilni direktni faktori od R i vrijedi*

$$R = R_{B_1} \cup \dots \cup R_{B_s} \quad (\text{disjunktna unija}) \quad \text{i} \quad V = V_{B_1} \oplus \dots \oplus V_{B_s}.$$

Dokaz: Kako je B baza prostora V i skupovi $B_1, \dots, B_s$ su međusobno ortogonalni, vrijedi

$$V = V_{B_1} \oplus \dots \oplus V_{B_s}.$$

Za svaki korijen $\beta \in R$ njegov je nosač $\text{Supp}_C(\beta)$ prema propoziciji 4.4.12. povezan. To znači da je $\text{Supp}_C(\beta) \subseteq B_j$ za neki $j \in \{1, \dots, s\}$. Tada je $\beta \in R_{B_j}$. To pokazuje da je

$$R = R_{B_1} \cup \dots \cup R_{B_s} \tag{4.6}$$

i ta je unija disjunktna jer su potprostori $V_{B_1}, \dots, V_{B_s}$ međusobno ortogonalni. Dakle, svaki podsistem R_{B_j} je direktni faktor od R . Očito je B_j baza sistema korijena R_{B_j} (u odnosu na Weylovu komoru $C \cap V_{B_j}$). Kako je skup B_j povezan, prema korolaru 4.4.14. svaki je podsistem R_{B_j} ireducibilan.

Neka je sada R' bilo koji ireducibilan direktni faktor od R . Tada je za svaki $j \in \{1, \dots, s\}$ prema propoziciji 4.4.15. $R' \cap R_{B_j}$ direktni faktor od R i vrijedi $\text{span}(R' \cap R_{B_j}) = (\text{span } R') \cap (\text{span } R_{B_j})$. Odatle sljedi da je $R' \cap R_{B_j}$ direktni faktor od R_{B_j} , a kako je sistem korijena R_{B_j} ireducibilan, vrijedi ili $R' \cap R_{B_j} = \emptyset$ ili $R' \cap R_{B_j} = R_{B_j}$. Sada iz (4.6) sljedi da je $R' = R_{B_j}$ za neki $j \in \{1, \dots, s\}$. Time je dokazano da su $R_{B_1}, \dots, R_{B_s}$ svi ireducibilni direktni faktori od R .

Teorem 4.4.16. ima sljedeće dvije neposredne posljedice:

Korolar 4.4.17. *Uz oznake iz teorema 4.4.16. ako su $\alpha \in R_{B_i}$ i $\beta \in R_{B_j}$ za neke $i \neq j$, onda $\alpha + \beta \notin R$.*

Korolar 4.4.18. *Sistem korijena $R \neq \emptyset$ je ireducibilan ako i samo ako je svaka njegova baza povezana.*

Definirali smo standardan podskup sistema korijena R kao podskup $S \subseteq R_+(C)$ za neku Weylovu komoru C takav da je $(\alpha|\beta) \leq 0 \forall \alpha, \beta \in S, \alpha \neq \beta$. Klasificirat ćemo sada sve standardne podskupove sistema korijena tako da svakom pridružimo određen dijagram i zatim klasificiramo sve takve dijagrame. Budući da su baze sistema korijena standardni podskupovi, na taj način ćemo doći do klasifikacije svih ireducibilnih sistema korijena.

Ciklus u sistemu korijena R je standardni podskup $\{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}$ od R takav da je $n \geq 3$ i vrijedi $(\alpha_i|\alpha_{i+1}) < 0$ za $i = 1, \dots, n-1$ i $(\alpha_n|\alpha_1) < 0$. Broj n zove se tada **duljina ciklusa**.

Propozicija 4.4.19. *U sistemu korijena nema ciklusa.*

Dokaz: Neka je $\{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}$ ciklus u sistemu korijena R . Stavimo $\alpha = \alpha_1 + \dots + \alpha_n$. Prema propoziciji 4.4.10. α je korijen. Nadalje, kako je $(\alpha_i|\alpha_j) \leq 0$ za $i \neq j$, iz $(\alpha_2|\alpha_3) < 0$ slijedi $(\alpha_2|\alpha) < 0$, a iz $(\alpha_n|\alpha_1) < 0$ slijedi $(\alpha|\alpha_1) < 0$. To pokazuje da je $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha\}$ ciklus. Prema tome, za nepostojanje ciklusa je dovoljno dokazati da ne postoji ciklus duljine 3.

Pretpostavimo, dakle, da je $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$ ciklus u R . Sada za korijen $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ imamo

$$\begin{aligned} 2(\alpha|\alpha) &= 2(\alpha_1|\alpha_1) + 2(\alpha_2|\alpha_2) + 2(\alpha_3|\alpha_3) + 4(\alpha_1|\alpha_2) + 4(\alpha_1|\alpha_3) + 4(\alpha_2|\alpha_3) = \\ &= [(\alpha_1|\alpha_1) + (\alpha_2|\alpha_2) + 4(\alpha_1|\alpha_2)] + [(\alpha_1|\alpha_1) + (\alpha_3|\alpha_3) + 4(\alpha_1|\alpha_3)] + [(\alpha_2|\alpha_2) + (\alpha_3|\alpha_3) + 4(\alpha_2|\alpha_3)]. \end{aligned}$$

Odatle i iz propozicije 4.4.5. slijedi $2(\alpha|\alpha) \leq 0$, a to je nemoguće, jer su po propoziciji 4.4.9. vektori $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ linearno nezavisni, pa je njihova suma α različita od 0. Ova kontradikcija dokazuje propoziciju.

Propozicija 4.4.20. *Neka je S standardni podskup od R i $\beta \in S$. Tada je β susjed najviše trima korijenima iz S .*

Dokaz: Pretpostavimo da su $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ međusobno različiti korijeni iz S koji su susjedi korijenu β . Tada je $(\beta|\alpha_j) < 0$ za svaki $j = 1, 2, 3, 4$. Budući da u R nema ciklusa, nužno je $(\alpha_i|\alpha_j) = 0$ za $i \neq j$. Stavimo sada

$$\alpha = 2\beta + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4.$$

Tada je

$$(\alpha|\alpha) = 4(\beta|\beta) + \sum_{i=1}^4 (\alpha_i|\alpha_i) + \sum_{i=1}^4 (\beta|\alpha_i) = \sum_{i=1}^4 [(\beta|\beta) + (\alpha_i|\alpha_i) + 4(\beta|\alpha_i)]$$

a to je prema propoziciji 4.4.5. ≤ 0 . No to je nemoguće, jer su vektori $\beta, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ linearno nezavisni, pa je $\alpha \neq 0$.

Neka je S standardni podskup od R i S' neprazan povezan podskup od S . Definiramo tada skup

$$S/S' = (S \setminus S') \cup \{\beta_{S'}\}.$$

Pri tome podsjećamo da je

$$\beta_{S'} = \sum_{\alpha \in S'} \alpha.$$

Uočimo da je S/S' također standardni podskup od R . Naime, ako je C Weylova komora takva da je $S \subseteq R_+(C)$, onda je $\beta_{S'} \in R_+(C)$, dakle, $S/S' \subseteq R_+(C)$. Nadalje, za $\alpha \in S \setminus S'$ i $\alpha' \in S'$ je $(\alpha|\alpha') \leq 0$, dakle, vrijedi $(\alpha|\beta_{S'}) \leq 0$.

Propozicija 4.4.21. *Neka je S' neprazan povezan podskup standardnog podskupa S od R . Korijen $\alpha \in S \setminus S'$ je susjed nekom korijenu $\alpha' \in S'$ ako i samo ako je α susjed korijenu $\beta_{S'}$. Posebno, S je povezan ako i samo ako je S/S' povezan.*

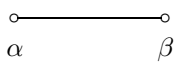
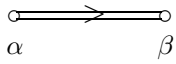
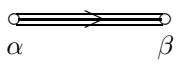
Dokaz: Tvrdnja je očita, jer je

$$(\alpha|\beta_{S'}) = \sum_{\alpha' \in S'} (\alpha|\alpha') \quad \text{i} \quad (\alpha|\alpha') \leq 0 \quad \forall \alpha' \in S'.$$

Propozicija 4.4.22. *Neka je S povezan standardni podskup od R . Tada je najviše jedan korijen $\beta \in S$ susjed trima različitim korijenima iz S .*

Dokaz: Pretpostavimo da su β i β' različiti korijeni iz S i da je svaki od njih susjed trima različitim korijenima iz S . Neka je $(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m)$ lanac minimalne duljine koji povezuje $\beta = \alpha_0$ sa $\beta' = \alpha_m$. Stavimo $S' = \{\beta, \alpha_1, \dots, \alpha_{m-1}, \beta'\}$. Tada je S' povezan podskup od S . Budući da nema ciklusa u S' , korijen β nije susjed nijednom korijenu iz S' različitom od α_1 . Isto tako, korijen β' nije susjed nijednom korijenu iz S' osim α_{m-1} . Stoga postoje međusobno različiti korijeni $\beta_1, \beta_2 \in S \setminus S'$ koji su susjedi korijenu β i međusobno različiti korijeni $\beta'_1, \beta'_2 \in S \setminus S'$ koji su susjedi korijenu β' . Ponovo zbog nepostojanja ciklusa sva četiri korijena $\beta_1, \beta_2, \beta'_1$ i β'_2 su međusobno različita. No tada su prema propoziciji 4.4.21. svi oni susjedi korijenu $\beta_{S'} \in S/S'$, a to je nemoguće zbog propozicije 4.4.20. Ova kontradikcija pokazuje da ne postoje dva različita korijena u S koji su svaki susjedi trima različitim korijenima iz S , odnosno, propozicija je dokazana.

Svakom standardnom podskupu S od R pridružujemo njegov **Dynkinov dijagram** $D(S)$ na sljedeći način: vrhovi od $D(S)$ su korijeni iz S ; dva različita vrha α i β iz $D(S)$ su spojena sa $n(\alpha, \beta)n(\beta, \alpha)$ spojnice (dakle, ili među njima nema spojnica ili ima jedna, dvije ili tri spojnice); ako su vrhovi α i β spojeni i ti korijeni nisu iste duljine (dakle, vrhovi su spojeni s dvije ili s tri spojnice) to se označuje znakom strelice od duljeg prema kraćem korijenu. U četiri moguća slučaja iz tablice na str. 90 za standardni dvočlani skup $S = \{\alpha, \beta\}$ sa $\|\alpha\| \geq \|\beta\|$ Dynkinovi dijagrami su sljedeći:

1. :		$n(\beta, \alpha) = 0, \quad n(\alpha, \beta) = 0, \quad \vartheta = 90^\circ;$
2. :		$n(\beta, \alpha) = -1, \quad n(\alpha, \beta) = -1, \quad \ \alpha\ = \ \beta\ , \quad \vartheta = 120^\circ;$
3. :		$n(\beta, \alpha) = -1, \quad n(\alpha, \beta) = -2, \quad \ \alpha\ = \sqrt{2}\ \beta\ , \quad \vartheta = 135^\circ;$
4. :		$n(\beta, \alpha) = -1, \quad n(\alpha, \beta) = -3, \quad \ \alpha\ = \sqrt{3}\ \beta\ , \quad \vartheta = 150^\circ.$

Dynkinov dijagram standardnog skupa korijena S bez označenih strelica je običan graf i on se zove **Coxeterov graf** od S . Označavat ćemo ga sa $Cox(S)$. Kažemo da je Dynkinov dijagram $D(S)$ povezan, ako je graf $Cox(S)$ povezan, odnosno, ako je standardan skup korijena S povezan. **Komponente povezanosti** od $D(S)$ su $D(S_1), \dots, D(S_n)$, gdje su $S_1, \dots, S_n$ komponente povezanosti od S .

Ako su S i T standardni skupovi korijena, **izomorfizam Dynkinovih dijagrama** sa $D(S)$ na $D(T)$ je bijekcija $f : S \rightarrow T$ koja čuva broj spojnica između vrhova (tj. broj spojnica između α i β iz S jednak je broju spojnica između $f(\alpha)$ i $f(\beta)$) i koja čuva orijentaciju (tj. ako su $\alpha, \beta \in S$

spojeni s dvije ili tri spojnice u $D(S)$ onda je $\|\alpha\| > \|\beta\|$ ako i samo ako je $\|f(\alpha)\| > \|f(\beta)\|$. Odmah se vidi da je bijekcija $f : S \rightarrow T$ izomorfizam sa $D(S)$ na $D(T)$ ako i samo ako je $n(\alpha, \beta) = n(f(\alpha), f(\beta)) \quad \forall \alpha, \beta \in S$.

Propozicija 4.4.23. *Neka je S' povezan podskup standardnog skupa korijena S takav da $Cox(S')$ nema dvostrukih ni trostrukih spojnica. Tada se $D(S/S')$ dobiva iz $D(S)$ tako da se S' stegne u jednu točku $\beta_{S'}$.*

Dokaz: Prema propoziciji 4.4.21. korijen $\alpha \in S \setminus S'$ je susjed korijenu $\beta_{S'}$ ako i samo ako je α susjed nekom korijenu $\alpha' \in S'$. Budući da nema ciklusa, takav $\alpha' \in S'$ je jedinstven. Svojstvo od S' da $D(S')$ nema dvostrukih ni trostrukih spojnica znači da su svi korijeni iz S' međusobno iste duljine. Prema propoziciji 4.4.10. tada i korijen $\beta_{S'}$ ima tu istu duljinu. Kako je $(\alpha|\beta_{S'}) = (\alpha|\alpha')$ (jer $(\alpha|\alpha'') = 0 \quad \forall \alpha'' \in S' \setminus \{\alpha'\}$) nalazimo da je $n(\alpha, \beta_{S'}) = n(\alpha, \alpha')$ i $n(\beta_{S'}, \alpha) = n(\alpha', \alpha)$. Dakle, orijentacija i broj spojnica između α i α' u $D(S)$ jednak je orijentaciji i broju spojnica između α i $\beta_{S'}$ u $D(S/S')$. Time je propozicija dokazana.

Sada ćemo pojačati propoziciju 4.4.20.

Propozicija 4.4.24. *Neka je S standardni skup korijena. Za svaki $\beta \in S$ ukupan broj spojnica između β i njegovih susjeda u S je najviše tri.*

Dokaz: Neka su $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ svi međusobno različiti susjedi od β u S (naravno, prema propoziciji 4.4.20. je $n \leq 3$). Budući da u S nema ciklusa, vrijedi $(\alpha_i|\alpha_j) = 0$ za $i \neq j$. Odatle slijedi da je $\sigma_{\alpha_i}\alpha_j = \alpha_j$ za $i \neq j$ i da refleksije $\sigma_{\alpha_1}, \dots, \sigma_{\alpha_n}$ međusobno komutiraju. Neka je $\sigma \in W(R)$ njihov produkt, $\sigma = \sigma_{\alpha_1} \cdots \sigma_{\alpha_n}$, i stavimo $\gamma = \sigma\beta$. Tada je

$$\gamma = \beta - \sum_{i=1}^n n(\beta, \alpha_i)\alpha_i,$$

pa slijedi

$$n(\gamma, \beta) = 2 \frac{(\gamma|\beta)}{(\beta|\beta)} = 2 - \sum_{i=1}^n n(\beta, \alpha_i) 2 \frac{(\alpha_i|\beta)}{(\beta|\beta)} = 2 - \sum_{i=1}^n n(\beta, \alpha_i)n(\alpha_i, \beta) = 2 - \sum_{i=1}^n m_i,$$

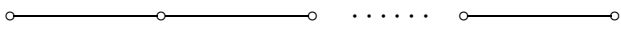
gdje je $m_i = n(\beta, \alpha_i)(\alpha_i, \beta)$ broj spojnica vrhova α_i i β u $Cox(S)$. Dakle,

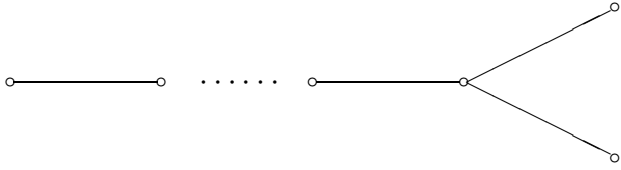
$$\sum_{i=1}^n m_i = 2 - n(\gamma, \beta) \leq 2 + |n(\gamma, \beta)|.$$

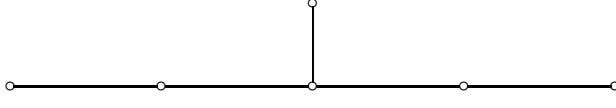
Međutim, operator $\sigma \in W(R)$ je ortogonalan pa korijeni β i $\gamma = \sigma\beta$ imaju istu duljinu. Sada iz tablice na str. 90 slijedi da je $|n(\gamma, \beta)| \leq 1$, dakle,

$$\sum_{i=1}^n m_i \leq 3.$$

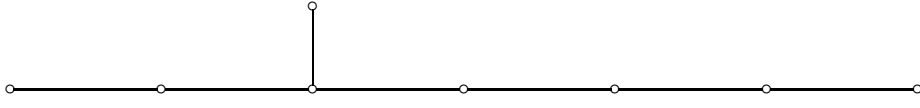
Teorem 4.4.25. *Neka je S povezan standardan skup korijena takav da u njegovom Dynkinovom dijagramu $D(S)$ nema ni dvostrukih ni trostrukih spojnica (tj. svi korijeni u S imaju istu duljinu). Tada je $D(S)$ izomorfan jednom od sljedećih dijagrama:*

A_ℓ :  ($\ell \geq 1$ točaka)

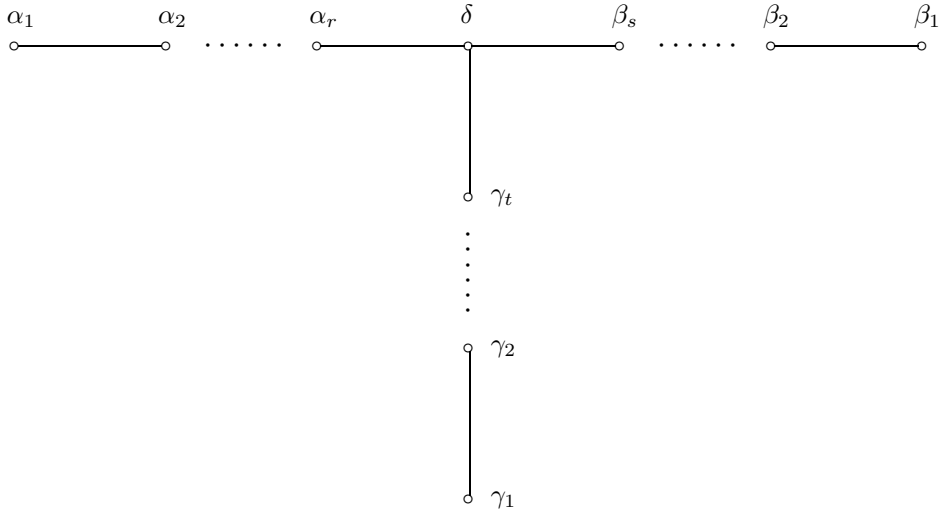
D_ℓ :  ($\ell \geq 4$ točaka)

E_6 : 

E_7 : 

E_8 : 

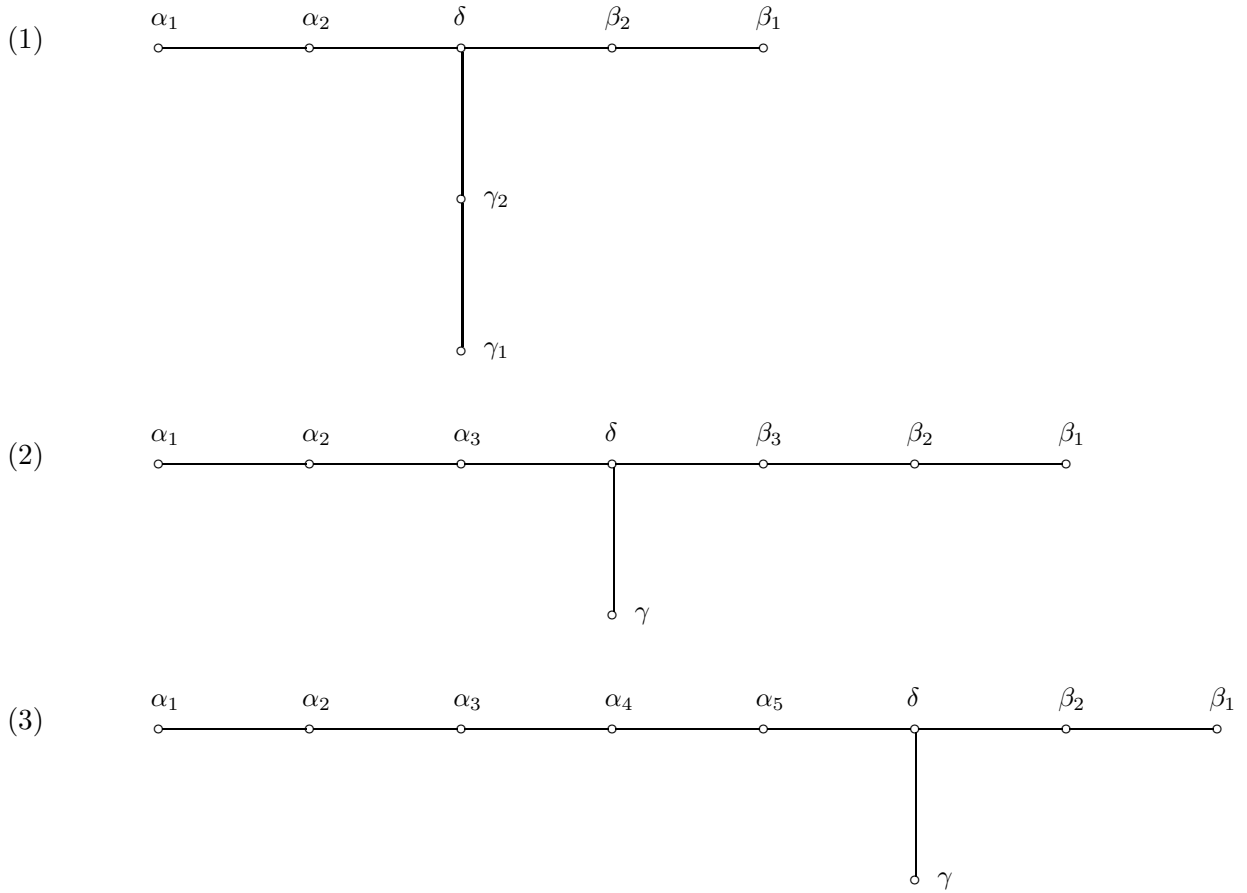
Dokaz: Označimo sa ℓ broj elemenata skupa S , tj. broj vrhova u Dynkinovom dijagramu $D(S)$. Možemo pretpostaviti da su duljine svih korijena u S jednake 1. Pretpostavimo da $D(S)$ nije izomorfan dijagramu A_ℓ . Tada prema propozicijama 4.4.20. i 4.4.22. postoji jedinstven $\delta \in S$ koji ima tri susjeda u S ; broj susjeda svih ostalih vrhova je jedan ili dva. To znači da je dijagram $D(S)$ sljedećeg oblika:



Možemo pretpostaviti da je $1 \leq t \leq s \leq r$. Sada ćemo isključiti tri dijagrama koji ne mogu biti izomorfni $D(S)$, dakle, $D(S)$ ih ne može sadržavati niti kao poddijagram. To su slučajevi

- (1) $r = s = t = 2$;
- (2) $r = s = 3, t = 1$;
- (3) $r = 5, s = 2, t = 1$.

Dakle, radi se o dijagramima:



U svakom od ovih slučajeva definiramo vektor $v \neq 0$ ovako:

- (1) $v = \alpha_1 + 2\alpha_2 + \beta_1 + 2\beta_2 + \gamma_1 + 2\gamma_2 + 3\delta$;
- (2) $v = \alpha_1 + 2\alpha_2 + 3\alpha_3 + \beta_1 + 2\beta_2 + 3\beta_3 + 2\gamma + 4\delta$;
- (3) $v = \alpha_1 + 2\alpha_2 + 3\alpha_3 + 4\alpha_4 + 5\alpha_5 + 2\beta_1 + 4\beta_2 + 3\gamma + 6\delta$.

Uzmemo li u obzir da su svi korijeni duljine 1, a da su svi skalarni produkti susjednih korijena jednaki $-\frac{1}{2}$, direktnim računom provjeravamo da u svakom od ova tri slučaja vrijedi $(v|v) = 0$. To je, naravno, nemoguće i ova kontradikcija pokazuje da su stvarno navedena tri dijagrama nemoguća.

Sada zaključujemo da je nužno $t = 1$; doista, kad bi bilo $t \geq 2$, dijagram $D(S)$ bi imao poddijagram tipa (1), a to je nemoguće. Nadalje, nužno je $s \leq 2$; doista, kad bi bilo $s \geq 3$, dijagram $D(S)$ bi imao poddijagram tipa (2). Napokon, ako je $s = 2$ onda je nužno $r \leq 4$; doista, kad bi bilo $s = 2$ i $r \geq 5$, dijagram $D(S)$ bi imao poddijagram tipa (3), što je također nemoguće. To pokazuje da su (osim A_ℓ , $\ell \geq 1$) preostale jedino sljedeće mogućnosti:

- (a) $t = s = 1$, $r \geq 1$; tada je $\ell \geq 4$ i dijagram je tipa D_ℓ .
- (b) $t = 1$, $s = r = 2$; tada je $\ell = 6$ i dijagram je tipa E_6 .
- (c) $t = 1$, $s = 2$, $r = 3$; tada je $\ell = 7$ i dijagram je tipa E_7 .
- (d) $t = 1$, $s = 2$, $r = 4$; tada je $\ell = 8$ i dijagram je tipa E_8 .

Time je teorem 4.4.25. dokazan.

Teorem 4.4.26. *Neka je S povezan standardni skup korijena takav da se u njegovom Dynkinovom dijagramu $D(S)$ pojavljuje dvostruka ili trostruka spojnica. Tada je $D(S)$ izomorfan jednom od sljedećih dijagrama:*

$$B_\ell : \quad \circ \text{---} \circ \quad \dots \quad \circ \text{---} \overleftrightarrow{\circ \text{---} \circ} \quad (\ell \geq 2 \text{ točaka})$$

$$C_\ell : \quad \circ \text{---} \circ \quad \dots \quad \circ \text{---} \overleftarrow{\circ \text{---} \circ} \quad (\ell \geq 3 \text{ točaka})$$

$$F_4 : \quad \circ \text{---} \overleftrightarrow{\circ \text{---} \circ} \text{---} \circ$$

$$G_2 : \quad \overleftrightarrow{\circ \text{---} \circ}$$

Dokaz: Ukoliko $D(S)$ sadrži trostruku spojnicu, onda prema propoziciji 4.4.24. nijedan od dvaju vrhova koji su spojeni trostrukom spojnicom nema drugih susjeda. Kako je S povezan, to znači da osim ta dva uopće nema drugih vrhova u $D(S)$. Dakle, $D(S)$ je izomorfan dijagramu koji je u iskazu teorema označen sa G_2 .

Pretpostavimo sada da $D(S)$ nema trostrukih spojnica, ali ima barem jednu dvostruku spojnicu. U daljnjem privremeno zanemarimo strelice, odnosno promatramo Coxeterove grafove. Uočimo da $Cox(S)$ ne može sadržavati podgraf sljedećih dvaju oblika:

$$\overleftrightarrow{\alpha_1 \text{---} \alpha_2} \text{---} \alpha_3 \text{---} \dots \text{---} \alpha_{m-1} \text{---} \overleftrightarrow{\alpha_m} \quad (m \geq 1)$$

i

$$\overleftrightarrow{\alpha_1 \text{---} \alpha_2} \text{---} \alpha_3 \text{---} \dots \text{---} \alpha_{m-1} \text{---} \alpha_m \begin{array}{l} \nearrow \circ \\ \searrow \circ \end{array} \quad (m \geq 1)$$

Doista, pretpostavimo da $Cox(S)$ sadrži jedan od ta dva podgrafa. Stavimo $S' = \{\alpha_1, \dots, \alpha_m\}$. Tada $Cox(S/S')$ sadrži kao podgraf

$$\overleftrightarrow{\alpha_1 \text{---} \alpha_2} \text{---} \alpha_3 \text{---} \dots \text{---} \alpha_m \quad \text{ili} \quad \overleftrightarrow{\alpha_1 \text{---} \alpha_2} \text{---} \alpha_m \begin{array}{l} \nearrow \circ \\ \searrow \circ \end{array}$$

a i jedno i drugo je nemoguće zbog propozicije 4.4.24. Prema tome, zaključujemo da je $D(S)$ izomorfan dijagramu tipa B_ℓ , C_ℓ ili F_4 ili da sadrži poddijagram jednog od sljedećih dvaju oblika:

$$\alpha_1 \text{---} \alpha_2 \text{---} \alpha_3 \text{---} \overleftrightarrow{\alpha_4} \text{---} \alpha_5 \quad \text{ili} \quad \beta_1 \text{---} \beta_2 \text{---} \beta_3 \text{---} \overleftarrow{\beta_4} \text{---} \beta_5$$

Isključit ćemo sada te dvije mogućnosti i to ponovo tako da konstruiramo vektore v i w različite od 0 takve da je $(v|v) = 0$ i $(w|w) = 0$. To su vektori

$$v = \alpha_1 + 2\alpha_2 + 3\alpha_3 + 4\alpha_4 + 2\alpha_5 \quad \text{i} \quad w = \beta_1 + 2\beta_2 + \beta_3 + 2\beta_4 + \beta_5.$$

Možemo uzeti da su u oba slučaja kraći vektori duljine 1. Dakle,

$$(\alpha_1|\alpha_1) = (\alpha_2|\alpha_2) = (\alpha_3|\alpha_3) = 2, \quad (\alpha_4|\alpha_4) = (\alpha_5|\alpha_5) = 1,$$

$$(\beta_1|\beta_1) = (\beta_2|\beta_2) = (\beta_3|\beta_3) = 1, \quad (\beta_4|\beta_4) = (\beta_5|\beta_5) = 2.$$

Kad znamo duljine i broj spojnica susjednih vektora γ i δ , iz tablice na str. 90 možemo izračunati njihov skalarni produkt

$$(\gamma|\delta) = \|\gamma\| \cdot \|\delta\| \cdot \cos \vartheta.$$

Ako su oba korijena duljine 1, spojeni su s jednom spojnicom i tada je $(\gamma|\delta) = -\frac{1}{2}$. Ako su oba korijena duljine $\sqrt{2}$, također su spojeni s jednom spojnicom, no tada je $(\gamma|\delta) = -1$. Napokon, ako je jedan korijen duljine 1, a drugi duljine $\sqrt{2}$, tada su spojeni s dvije spojnice pa dobivamo $(\gamma|\delta) = -1$. Dakle,

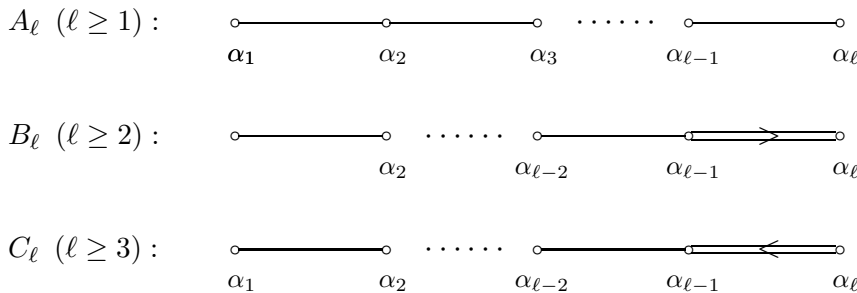
$$(\alpha_1|\alpha_2) = -1, \quad (\alpha_2|\alpha_3) = -1, \quad (\alpha_3|\alpha_4) = -1, \quad (\alpha_4|\alpha_5) = -\frac{1}{2},$$

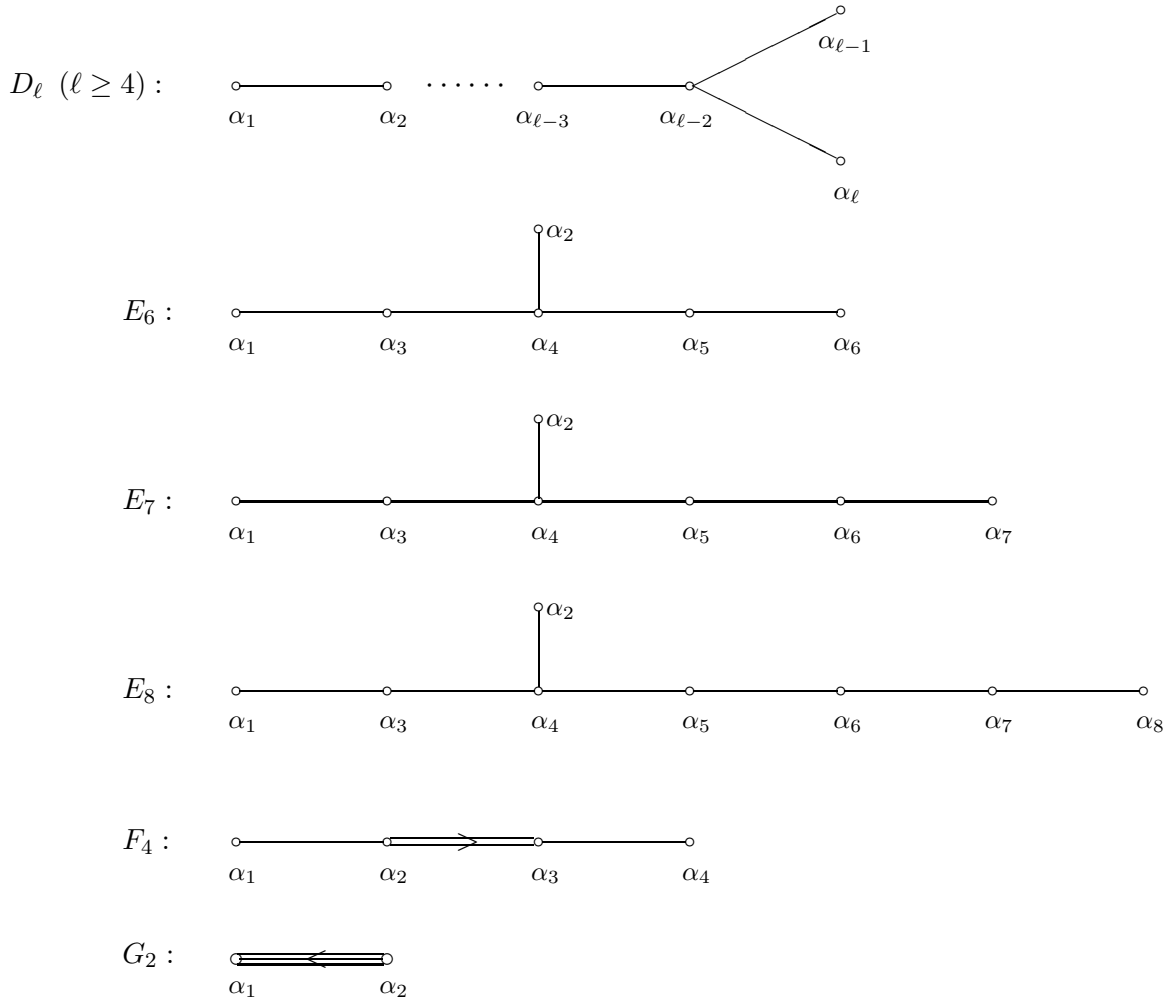
$$(\beta_1|\beta_2) = -\frac{1}{2}, \quad (\beta_2|\beta_3) = -\frac{1}{2}, \quad (\beta_3|\beta_4) = -1, \quad (\beta_4|\beta_5) = -1.$$

Odatle direktnim računom nalazimo $(v|v) = (w|w) = 0$. Time je teorem 4.4.26. dokazan.

Teoremi 4.4.25. i 4.4.26. daju sve moguće klase izomorfizama Dynkinovih dijagrama povezanih standardnih skupova korijena. Baza ireducibilnog sistema korijena je standardan povezan skup korijena, pa teoremi 4.4.25. i 4.4.26. određuju sve moguće klase izomorfizama Dynkinovih dijagrama ireducibilnih sistema korijena. Ireducibilan sistem korijena R u realnom unitarnom prostoru V smatrat ćemo izomornim sa istim sistemom korijena ali s drugim skalarnim produktom u V . Nije teško dokazati da su svi skalarni produkti u V u odnosu na koje je R sistem korijena u V međusobno proporcionalni. Odatle slijedi da su brojevi $n(\alpha, \beta)$ neovisni o tome koji smo skalarni produkt u V izabrali. Uz takvo proširenje pojma izomornosti ireducibilnih sistema korijena iz teorema 4.4.7. slijedi da su ireducibilni sistemi korijena R i R' izomorfni ako i samo su njihovi Dynkinovi dijagrami izomorfni. Na taj način dobivamo klasifikaciju mogućih ireducibilnih sistema korijena:

Teorem 4.4.27. *Ako je R ireducibilan sistem korijena u ℓ -dimenzionalnom realnom unitarnom prostoru, onda je njegov Dynkinov dijagram jedan od sljedećih:*





Svaki od Dynkinovih dijagrama iz teorema 4.4.27. stvarno pripada nekom ireducibilnom reduciranom sistemu korijena. To ćemo ustanoviti eksplicitnim konstrukcijama.

U daljnjem je $\mathbb{R}^n$ realan unitaran prostor svih uređenih n -torki realnih brojeva sa standardnim skalarnim produktom

$$(x|y) = \xi_1\eta_1 + \xi_2\eta_2 + \cdots + \xi_n\eta_n, \quad x = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n), y = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n) \in \mathbb{R}^n.$$

Nadalje, $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ označava standardnu ortonormiranu bazu u $\mathbb{R}^n$: e_j ima j -tu koordinatu 1, a ostale 0. Aditivna podgrupa od $\mathbb{R}^n$ generirana s tom bazom je $\mathbb{Z}^n$.

Sada ćemo redom za svaki Dynkinov dijagram sa ℓ vrhova:

- (1) definirati realan unitaran prostor V dimenzije ℓ ; to će uvijek biti ili $\mathbb{R}^\ell$ ili određeni potprostor od $\mathbb{R}^n$ za neki $n > \ell$;
- (2) zadati konačan skup $R \subseteq V$, za koji se direktno može provjeriti da je sistem korijena u realnom unitarnom prostoru V ;
- (3) zadati jednu bazu $B = \{\alpha_1, \dots, \alpha_\ell\}$ sistema korijena R ;
- (4) zapisati pripadni skup pozitivnih vektora R_+ ;
- (5) napisati pripadnu tzv. Cartanovu matricu $[n(\alpha_i, \alpha_j)]_{i,j=1}^\ell$.

Također, u slučajevima A_ℓ , B_ℓ , C_ℓ i D_ℓ potpuno ćemo opisati Weylovu grupu $W = W(R)$. U svim slučajevima navest ćemo broj korijena $|R|$ i red Weylove grupe $|W|$.

Tip A_ℓ ($\ell \geq 1$): V je ortogonalni komplement vektora $e_1 + \dots + e_{\ell+1}$ u prostoru $\mathbb{R}^{\ell+1}$:

$$V = \{x \in \mathbb{R}^{\ell+1}; (x|e_1 + \dots + e_{\ell+1}) = 0\} = \{x = (\xi_1, \dots, \xi_{\ell+1}) \in \mathbb{R}^{\ell+1}; \xi_1 + \dots + \xi_{\ell+1} = 0\}.$$

Nadalje,

$$R = \{\alpha \in \mathbb{Z}^{\ell+1} \cap V; (\alpha|\alpha) = 2\} = \{\alpha_{ij} = e_i - e_j; i, j = 1, \dots, \ell+1, i \neq j\};$$

$$B = \{\alpha_1, \dots, \alpha_\ell\}, \quad \alpha_i = \alpha_{i,i+1} = e_i - e_{i+1}; \quad R_+ = \{\alpha_{ij}; 1 \leq i < j \leq \ell+1\}.$$

Prikazi pozitivnih korijena pomoću korijena iz baze B su:

$$\alpha_{ij} = \alpha_i + \dots + \alpha_{j-1}, \quad 1 \leq i < j \leq \ell+1.$$

Cartanova matrica je:

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 2 \end{bmatrix}.$$

Refleksija σ_{α_i} zamjenjuje indekse i i $i+1$ a ostale ostavlja na miru:

$$\sigma_{\alpha_i}(\xi_1, \dots, \xi_i, \xi_{i+1}, \dots, \xi_{\ell+1}) = (\xi_1, \dots, \xi_{i+1}, \xi_i, \dots, \xi_{\ell+1}).$$

Prema tome, σ_{α_i} odgovara transpoziciji $(i, i+1)$ u grupi $\mathcal{S}_{\ell+1}$ svih permutacija skupa $\{1, \dots, \ell+1\}$. Budući da te transpozicije generiraju čitavu grupu $\mathcal{S}_{\ell+1}$, zaključujemo da je Weylova grupa izomorfna grupi $\mathcal{S}_{\ell+1}$. Napokon, $|R| = \ell(\ell+1)$ i $|W| = (\ell+1)!$.

Tip B_ℓ ($\ell \geq 2$): Sada stavljamo

$$V = \mathbb{R}^\ell, \quad R = \{\alpha \in \mathbb{Z}^\ell; (\alpha|\alpha) \in \{1, 2\}\} = \{\pm e_i; 1 \leq i \leq \ell\} \cup \{\pm e_i \pm e_j; i, j = 1, \dots, \ell, i \neq j\};$$

$$B = \{\alpha_1, \dots, \alpha_\ell\}, \quad \alpha_i = e_i - e_{i+1} \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell-1, \quad \alpha_\ell = e_\ell;$$

$$R_+ = \{e_i; i = 1, \dots, \ell\} \cup \{e_i \pm e_j; 1 \leq i < j \leq \ell\}.$$

Prikazi pozitivnih korijena pomoću korijena iz baze B su:

$$e_i = \alpha_i + \dots + \alpha_\ell \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell;$$

$$e_i - e_j = \alpha_i + \dots + \alpha_{j-1} \quad \text{za} \quad 1 \leq i < j \leq \ell;$$

$$e_i + e_j = \alpha_i + \dots + \alpha_{j-1} + 2\alpha_j + \dots + 2\alpha_\ell \quad \text{za} \quad 1 \leq i < j \leq \ell.$$

Cartanova matrica je:

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 2 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}.$$

Weylova grupa W djeluje na bazu $(e_1, \dots, e_\ell)$ od V permutacijama uz množenje nekih članova sa -1 . Dakle, W je izomorfna semidirektnom produktu grupe $(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z})^\ell$ i grupe permutacija $\mathcal{S}_\ell$, pri čemu je $(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z})^\ell$ normalna podgrupa, a na njoj djeluje grupa permutacija $\mathcal{S}_\ell$. Napokon, $|R| = 2\ell^2$ i $|W| = 2^\ell \ell!$.

Tip C_ℓ ($\ell \geq 3$): Sada uzimamo:

$$V = \mathbb{R}^\ell, \quad R = \{\pm 2e_i; 1 \leq i \leq \ell\} \cup \{\pm e_i \pm e_j; i, j = 1, \dots, \ell, i \neq j\},$$

$$B = \{\alpha_1, \dots, \alpha_\ell\}, \quad \alpha_i = e_i - e_{i+1} \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell - 1, \quad \alpha_\ell = 2e_\ell;$$

$$R_+ = \{2e_i; 1 \leq i \leq \ell\} \cup \{e_i \pm e_j; 1 \leq i < j \leq \ell\}.$$

Prikazi pozitivnih korijena pomoću korijena iz baze B su:

$$2e_i = 2\alpha_i + \dots + 2\alpha_{\ell-1} + \alpha_\ell;$$

$$e_i - e_j = \alpha_i + \dots + \alpha_{j-1} \quad \text{za} \quad 1 \leq i < j \leq \ell;$$

$$e_i + e_j = \alpha_i + \dots + \alpha_{j-1} + 2\alpha_j + \dots + 2\alpha_{\ell-1} + \alpha_\ell \quad \text{za} \quad 1 \leq i < j \leq \ell.$$

Cartanova matrica je transponirana Cartanovoj matrici sistema tipa B_ℓ :

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -2 & 2 \end{bmatrix}.$$

Weylova grupa za ovaj tip podudara se s Weylovom grupom za tip B_ℓ , i isti su brojevi $|R| = 2\ell^2$ i $|W| = 2^\ell \ell!$.

Tip D_ℓ ($\ell \geq 4$): Sada je

$$V = \mathbb{R}^\ell, \quad R = \{\alpha \in \mathbb{Z}^\ell; (\alpha|\alpha) = 2\} = \{\pm e_i \pm e_j; i, j = 1, \dots, \ell, i \neq j\}.$$

Jedna baza $B = \{\alpha_1, \dots, \alpha_\ell\}$ od R je dana sa

$$\alpha_i = e_i - e_{i+1} \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell - 1, \quad \alpha_\ell = e_{\ell-1} + e_\ell.$$

Tada je

$$R_+ = \{e_i \pm e_j; 1 \leq i < j \leq \ell\}.$$

Prikazi pozitivnih korijena pomoću korijena iz baze B su:

$$e_i - e_j = \alpha_i + \dots + \alpha_{j-1} \quad \text{za} \quad 1 \leq i < j \leq \ell;$$

$$e_i + e_j = \alpha_i + \dots + \alpha_{j-1} + 2\alpha_j + \dots + 2\alpha_{\ell-2} + \alpha_{\ell-1} + \alpha_\ell, \quad \text{za} \quad 1 \leq i > j \leq \ell - 2;$$

$$e_i + e_{\ell-1} = \alpha_i + \dots + \alpha_\ell \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell - 2;$$

$$e_i + e_\ell = \alpha_i + \dots + \alpha_{\ell-2} + \alpha_\ell \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell - 2; \quad e_{\ell-1} + e_\ell = \alpha_\ell.$$

Cartanova matrica je

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 & 2 \end{bmatrix}.$$

Weylova grupa je grupa permutacija vektora $e_1, \dots, e_\ell$ uz paran broj promjena predznaka. Dakle, W je izomorfna semidirektnom produktu $(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z})^{\ell-1}$ i $\mathcal{S}_\ell$. Napokon, $|R| = 2\ell(\ell-1)$ i $|W| = 2^{\ell-1}\ell!$.

Tip E_ℓ ($\ell = 6, 7, 8$): Napisat ćemo samo V , R i $B = \{\alpha_1, \dots, \alpha_8\}$ za E_8 . Sistemi korijena E_6 i E_7 dobivaju se tako da se uzmu potprostori V' i V'' od V razapeti s prvih 6, odnosno, s prvih 7 vektora baze B ; traženi sistemi korijena su tada $R \cap V'$ i $R \cap V''$.

Za E_8 uzimamo $V = \mathbb{R}^8$. Zatim stavimo

$$I = \mathbb{Z}^8 + \mathbb{Z}\frac{1}{2}e, \quad \text{gdje je } e = e_1 + e_2 + e_3 + e_4 + e_5 + e_6 + e_7 + e_8,$$

i neka je J aditivna podgrupa od I dana sa

$$J = \left\{ \sum_{i=1}^8 c_i e_i + \frac{c}{2}e; \ c_i, c \in \mathbb{Z}, \ c + \sum_{i=1}^8 c_i \in 2\mathbb{Z} \right\}.$$

Sada je

$$\begin{aligned} R &= \{\alpha \in J; \ (\alpha|\alpha) = 2\} = \\ &= \{\pm e_i \pm e_j; \ i, j \in \{1, \dots, 8\}, \ i \neq j\} \cup \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^8 (-1)^{k_i} e_i; \ k_i \in \{0, 1\}, \ \sum_{i=1}^8 k_i \in 2\mathbb{Z} \right\}. \end{aligned}$$

Jedna baza $B = \{\alpha_1, \dots, \alpha_8\}$ sistema korijena R dana je sa

$$\alpha_1 = e_1 + e_8 - \frac{1}{2}e = \frac{1}{2}(e_1 - e_2 - e_3 - e_4 - e_5 - e_6 - e_7 + e_8), \quad \alpha_2 = e_1 + e_2, \quad \alpha_3 = e_2 - e_1,$$

$$\alpha_4 = e_3 - e_2, \quad \alpha_5 = e_4 - e_3, \quad \alpha_6 = e_5 - e_4, \quad \alpha_7 = e_6 - e_5, \quad \alpha_8 = e_7 - e_6.$$

Cartanove matrice za E_6 , E_7 i E_8 , njihovi brojevi korijena $|R|$ i redovi $|W|$ pripadnih Weylovih grupa su:

$$E_6: \begin{bmatrix} 2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix},$$

$$|R| = 72, \quad |W| = 2^7 \cdot 3^4 \cdot 5 = 544.320.$$

$$E_7 : \begin{bmatrix} 2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix},$$

$$|R| = 126, \quad |W| = 2^{10} \cdot 3^4 \cdot 5 \cdot 7 = 30.481.920.$$

$$E_8 : \begin{bmatrix} 2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix},$$

$$|R| = 240, \quad |W| = 2^{14} \cdot 3^5 \cdot 5^2 \cdot 7 = 7.315.660.800.$$

Tip F_4 : Sada je $V = \mathbb{R}^4$. Nadalje, promatramo diskretnu aditivnu podgrupu $I = \mathbb{Z}^4 + \frac{1}{2}\mathbb{Z}e$ od $\mathbb{R}^4$, gdje je $e = e_1 + e_2 + e_3 + e_4$, i stavimo

$$R = \{\alpha \in I; (\alpha|\alpha) \in \{1, 2\}\}.$$

Tada je

$$R = \{\pm e_i; i = 1, 2, 3, 4\} \cup \{\pm(e_i - e_j); 1 \leq i < j \leq 4\} \cup \left\{ \frac{1}{2}(\pm e_1 \pm e_2 \pm e_3 \pm e_4) \right\}.$$

Jedna je baza $B = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}$, gdje je

$$\alpha_1 = e_2 - e_3, \quad \alpha_2 = e_3 - e_4, \quad \alpha_3 = e_4, \quad \alpha_4 = \frac{1}{2}(e_1 - e_2 - e_3 - e_4).$$

Pozitivni korijeni u odnosu na tu bazu su:

$$R_+ = \{e_i; i = 1, 2, 3, 4\} \cup \{e_i - e_j; 1 \leq i < j \leq 4\} \cup \left\{ \frac{1}{2}(e_1 \pm e_2 \pm e_3 \pm e_4) \right\}.$$

Cartanova matrica i brojevi $|R|$ i $|W|$ su:

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -2 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}, \quad |R| = 48, \quad |W| = 2^7 \cdot 3^2 = 1152.$$

Tip G_2 : Za V uzimamo ortogonalni komplement od $e = e_1 + e_2 + e_3$ u $\mathbb{R}^3$, tj.

$$V = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3\} \in \mathbb{R}^3; \quad \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 0\}.$$

Sistem korijena je $R = \{\alpha \in \mathbb{Z}^3 \cap V; \quad (\alpha|\alpha) \in \{2, 6\}\}$, tj.

$$R = \{\pm(e_1 - e_2), \pm(e_2 - e_3), \pm(e_1 - e_3), \pm(2e_1 - e_2 - e_3), \pm(2e_2 - e_1 - e_3), \pm(2e_3 - e_1 - e_2)\}.$$

Jedna je baza $B = \{\alpha_1, \alpha_2\}$, gdje su $\alpha_1 = e_1 - e_2$ i $\alpha_2 = -2e_1 + e_2 + e_3$. Tada je

$$\begin{aligned} R_+ &= \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_1 + \alpha_2, 2\alpha_1 + \alpha_2, 3\alpha_1 + \alpha_2, 3\alpha_1 + 2\alpha_2\} = \\ &= \{e_1 - e_2, -e_1 + e_3, -e_2 + e_3, -2e_1 + e_2 + e_3, e_1 - 2e_2 + e_3, -e_1 - e_2 + 2e_3\}. \end{aligned}$$

Cartanova matrica i brojevi $|R|$ i $|W|$ su:

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -3 & 2 \end{bmatrix}, \quad |R| = |W| = 12.$$

4.5 Klasifikacija kompleksnih prostih Liejevih algebri

Za svaki ireducibilan sistem korijena R postoji kompleksna prosta Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ takva da je za svaku njenu Cartanovu podalgebru $\mathfrak{h}$ pripadni sistem korijena $R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ izomorfan sistemu korijena R . Štoviše, dvije proste kompleksne Liejeve algebre su izomorfne ako i samo ako su njihovi sistemi korijena izomorfni. To je posljedica sljedećeg općeg teorema:

Teorem 4.5.1. (Serre—ov teorem egzistencije) *Neka je R sistem korijena u realnom unitarnom prostoru V . Tada postoji poluprosta kompleksna Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ i njena Cartanova podalgebra $\mathfrak{h}$ takve da je sistem korijena R izomorfan sistemu korijena $R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ u realnom prostoru $\mathfrak{h}(R) = \text{span}_{\mathbb{R}} R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$. Ako izaberemo bazu $B = \{\alpha_1, \dots, \alpha_\ell\}$ sistema korijena R i stavimo $c_{ij} = n(\alpha_i, \alpha_j)$, ta se Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ može realizirati kao Liejeva algebra generirana sa 3ℓ generatora $\{h_i, x_i, y_i; 1 \leq i \leq \ell\}$ i s relacijama:*

$$(S1) \quad [h_i, h_j] = 0 \text{ za sve } i, j = 1, \dots, \ell.$$

$$(S2) \quad [x_i, y_i] = h_i, [x_i, y_j] = 0 \text{ za } i, j = 1, \dots, \ell, i \neq j.$$

$$(S3) \quad [h_i, x_j] = c_{ji}x_j, [h_i, y_j] = -c_{ji}y_j \text{ za sve } i, j = 1, \dots, \ell.$$

$$(S_{ij}^+) \quad (\text{ad } x_i)^{-c_{ji}+1}(x_j) = 0 \text{ za } i, j = 1, \dots, \ell.$$

$$(S_{ij}^-) \quad (\text{ad } y_i)^{-c_{ji}+1}(y_j) = 0 \text{ za } i, j = 1, \dots, \ell.$$

Drugim riječima, ako je $\mathfrak{l}$ bilo koja Liejeva algebra i ako je $f : \{h_i, x_i, y_i; 1 \leq i \leq \ell\} \rightarrow \mathfrak{l}$ preslikavanje sa svojstvom da slike $H_i = f(h_i)$, $X_i = f(x_i)$, $Y_i = f(y_i)$ zadovoljavaju gornje relacije u Liejevoj algebri $\mathfrak{l}$, odnosno, da vrijedi

1. $[H_i, H_j] = 0$ za sve $i, j = 1, \dots, \ell$,
2. $[X_i, Y_i] = h_i$, $[X_i, Y_j] = 0$ za $i, j = 1, \dots, \ell$, $i \neq j$,
3. $[H_i, X_j] = c_{ji}X_j$, $[H_i, Y_j] = -c_{ji}Y_j$ za sve $i, j = 1, \dots, \ell$,
4. $(\text{ad}_{\mathfrak{l}} X_i)^{-c_{ji}+1}(X_j) = 0$ za $i, j = 1, \dots, \ell$,
5. $(\text{ad}_{\mathfrak{l}} Y_i)^{-c_{ji}+1}(Y_j) = 0$ za $i, j = 1, \dots, \ell$,

onda se f jedinstveno proširuje do homomorfizma $F : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{l}$.

Prema tome, klasifikacija ireducibilnih sistema korijena iz prethodnog odjeljka daje klasifikaciju prostih kompleksnih Liejevih algebri: klase izomorfности su pridružene Dynkinovim dijagramima A_ℓ , $\ell \geq 1$, B_ℓ , $\ell \geq 2$, C_ℓ , $\ell \geq 3$, D_ℓ , $\ell \geq 4$, E_ℓ , $\ell = 6, 7, 8$, F_4 i G_2 . U ovom odjeljku vidjet ćemo da primjeri matičnih Liejevih algebri iz odjeljka 1.1. numerirani sa **1.**, **2.**, **3.** i **4.** daju upravo proste Liejeve algebre sa četiri beskonačne serije Dynkinovih dijagrama. Te se Liejeve algebre zovu **klasične kompleksne proste Liejeve algebre**. Preostalih pet vrsta s Dynkinovim dijagramima E_6 , E_7 , E_8 , F_4 i G_2 zovu se **izuzetne kompleksne proste Liejeve algebre**.

Proučimo sada поближе svaki od primjera iz odjeljka 1.1.

1. Promatramo Liejevu algebru matrica $\mathfrak{g} = \mathfrak{sl}(\ell + 1, \mathbb{C}) = \{x \in \mathfrak{gl}(\ell + 1, \mathbb{C}); \text{Tr } x = 0\}$ za $\ell \in \mathbb{N}$, tzv. **specijalnu linearnu Liejevu algebru**. Neka je $\mathfrak{h}$ skup svih dijagonalnih matrica u $\mathfrak{g}$. Tada je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$ i

$$R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h}) = \{\alpha_{ij}; 1 \leq i, j \leq \ell + 1, i \neq j\},$$

gdje je

$$\alpha_{ij}(\text{diag}(c_1, \dots, c_{\ell+1})) = c_i - c_j.$$

Nadalje, $\mathfrak{g}_{\alpha_{ij}}$ je potprostor svih matrica $x = [x_{pq}] \in \mathfrak{g}$ takvih da je $x_{pq} = 0$ ako je $p \neq i$ ili $q \neq j$. Dakle, $\mathfrak{g}_{\alpha_{ij}} = \text{span}\{e_{ij}\}$. Pri tome je u ovom i daljnjim primjerima e_{ij} oznaka za kvadratnu matricu formata $(\ell + 1) \times (\ell + 1)$ koja ima 1 na presjecištu i -tog retka i j -tog stupca, a svi ostali su joj elementi jednaki 0. Tada je $h_{\alpha_{ij}} = e_{ii} - e_{jj} = [e_{ij}, e_{ji}]$. Nadalje, korijenski potprostor $\mathfrak{g}_{\alpha_{ij}}$ razapet je matricom e_{ij} .

2. Neka je sada $\mathfrak{g}$ tzv. **simplektička Liejeva algebra**:

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{sp}(2\ell, \mathbb{C}) = \{x \in \mathfrak{gl}(2\ell, \mathbb{C}); sx = -x^t s\}, \quad \text{gdje je} \quad s = \begin{bmatrix} 0 & I_\ell \\ -I_\ell & 0 \end{bmatrix}.$$

Pri tome je I_ℓ oznaka za jediničnu matricu ℓ -tog reda.

Ako proizvoljnu matricu $x \in \mathfrak{gl}(2\ell, \mathbb{C})$ pišemo pomoću kvadratnih blokova ℓ -tog reda kao $x = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$, onda se lako vidi da je $x \in \mathfrak{g}$ ako i samo ako je $d = -a^t$, $b^t = b$ i $c^t = c$. Dakle,

$$\mathfrak{g} = \left\{ \begin{bmatrix} a & b \\ c & -a^t \end{bmatrix}; a, b, c \in \mathfrak{gl}(\ell, \mathbb{C}), b = b^t, c = c^t \right\}.$$

Primijetimo da je $\mathfrak{sp}(2, \mathbb{C}) = \mathfrak{sl}(2, \mathbb{C})$, dakle, nove primjere dobivamo samo za $\ell \geq 2$.

Neka je $\mathfrak{h}$ skup svih dijagonalnih matrica u $\mathfrak{g}$, tj.

$$\mathfrak{h} = \{\text{diag}(c_1, \dots, c_\ell, -c_1, \dots, -c_\ell); c_1, \dots, c_\ell \in \mathbb{C}\}.$$

Tada je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$ i pripadni sistem korijena je

$$R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h}) = \{\pm\alpha_i; 1 \leq i \leq \ell\} \cup \{\beta_{ij}; 1 \leq i, j \leq \ell, i \neq j\} \cup \{\pm\gamma_{ij}; 1 \leq i < j \leq \ell\},$$

uz oznake

$$\begin{aligned} \alpha_i(\text{diag}(c_1, \dots, c_\ell, -c_1, \dots, -c_\ell)) &= 2c_i, & 1 \leq i \leq \ell; \\ \beta_{ij}(\text{diag}(c_1, \dots, c_\ell, -c_1, \dots, -c_\ell)) &= c_i - c_j, & 1 \leq i, j \leq \ell, \quad i \neq j; \\ \gamma_{ij}(\text{diag}(c_1, \dots, c_\ell, -c_1, \dots, -c_\ell)) &= c_i + c_j, & 1 \leq i < j \leq \ell. \end{aligned}$$

Nadalje, tada je

$$\begin{aligned} h_{\alpha_i} &= -h_{-\alpha_i} = e_{ii} - e_{\ell+i, \ell+i}, & 1 \leq i \leq \ell, \\ h_{\beta_{ij}} &= e_{ii} - e_{jj} - e_{\ell+i, \ell+i} + e_{\ell+j, \ell+j}, & 1 \leq i, j \leq \ell, \quad i \neq j, \quad -\beta_{ij} = \beta_{ji}, \\ h_{\gamma_{ij}} &= -h_{-\gamma_{ij}} = e_{ii} + e_{jj} - e_{\ell+i, \ell+i} - e_{\ell+j, \ell+j}, & 1 \leq i < j \leq \ell. \end{aligned}$$

Korijenski potprostori su $\mathfrak{g}_\alpha = \text{span}\{e_\alpha\}$, $\alpha \in R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$, gdje su bazni vektori korijenskih potprostora e_α dani sa

$$\begin{aligned} e_{\alpha_i} &= e_{i, \ell+i}, & e_{-\alpha_i} &= e_{\ell+i, i}, & 1 \leq i \leq \ell, \\ e_{\beta_{ij}} &= e_{ij} - e_{\ell+j, \ell+i}, & 1 \leq i, j \leq \ell, \quad i \neq j, & \quad -\beta_{ij} = \beta_{ji}, \\ e_{\gamma_{ij}} &= e_{i, \ell+j} + e_{j, \ell+i}, & e_{-\gamma_{ij}} &= e_{\ell+i, j} + e_{\ell+j, i}, & 1 \leq i < j \leq \ell. \end{aligned}$$

3. Promatramo sada tzv. **ortogonalnu kompleksnu Liejevu algebru** neparnog reda:

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{o}(2\ell + 1, \mathbb{C}) = \{x \in \mathfrak{gl}(2\ell + 1, \mathbb{C}); sx = -x^t s\}, \quad \text{gdje je} \quad s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_\ell \\ 0 & I_\ell & 0 \end{bmatrix}.$$

Proizvoljnu matricu $x \in \mathfrak{gl}(2\ell + 1, \mathbb{C})$ zapišimo u blok-formi u skladu s blokovima u gornjoj matrici s :

$$x = \begin{bmatrix} \alpha & f & g \\ h^t & a & b \\ k^t & c & d \end{bmatrix}, \quad \alpha \in \mathbb{C}, \quad f, g, h, k \in \mathbb{C}^\ell, \quad a, b, c, d \in \mathfrak{gl}(\ell, \mathbb{C}),$$

pri čemu smo $\mathbb{C}^\ell$ identificirali s prostorom $M_{\ell,1}(\mathbb{C})$ jednorednih matrica duljine ℓ . Tada je $x \in \mathfrak{o}(2\ell + 1, \mathbb{C})$ ako i samo ako je $\alpha = 0$, $d = -a^t$, $b^t = -b$, $c^t = -c$, $h = -g$ i $k = -f$. Dakle,

$$\mathfrak{g} = \left\{ \begin{bmatrix} 0 & f & g \\ -g^t & a & b \\ -f^t & c & -a^t \end{bmatrix}; f, g \in \mathbb{C}^\ell, a, b, c \in \mathfrak{gl}(\ell, \mathbb{C}), b^t = -b, c^t = -c \right\}.$$

Neka je $\mathfrak{h}$ skup svih dijagonalnih matrica iz $\mathfrak{g}$, tj.

$$\mathfrak{h} = \{\text{diag}(0, c_1, \dots, c_\ell, -c_1, \dots, -c_\ell); c_1, \dots, c_\ell \in \mathbb{C}\}.$$

Tada je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$ i pripadni sistem korijena je

$$R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h}) = \{\pm\alpha_i; 1 \leq i \leq \ell\} \cup \{\beta_{ij}; 1 \leq i, j \leq \ell, i \neq j\} \cup \{\pm\gamma_{ij}; 1 \leq i < j \leq \ell\},$$

uz oznake

$$\begin{aligned} \alpha_i(\text{diag}(0, c_1, \dots, c_\ell, -c_1, \dots, -c_\ell)) &= c_i, & 1 \leq i \leq \ell; \\ \beta_{ij}(\text{diag}(0, c_1, \dots, c_\ell, -c_1, \dots, -c_\ell)) &= c_i - c_j, & 1 \leq i, j \leq \ell, \quad i \neq j; \\ \gamma_{ij}(\text{diag}(0, c_1, \dots, c_\ell, -c_1, \dots, -c_\ell)) &= c_i + c_j, & 1 \leq i < j \leq \ell. \end{aligned}$$

Koristimo uobičajenu oznaku e_{ij} za matricu s jedinicom na presjecištu i -tog retka i j -tog stupca i na svim ostalim mjestima 0, s tim da se sada indeksi i, j kreću skupom $\{0, 1, \dots, 2\ell\}$. Tada je

$$\begin{aligned} h_{\alpha_i} &= -h_{-\alpha_i} = 2e_{ii} - 2e_{\ell+i, \ell+i}, & 1 \leq i \leq \ell, \\ h_{\beta_{ij}} &= e_{ii} - e_{jj} - e_{\ell+i, \ell+i} + e_{\ell+j, \ell+j}, & 1 \leq i, j \leq \ell, \quad i \neq j, \quad -\beta_{ij} = \beta_{ji}, \\ h_{\gamma_{ij}} &= -h_{-\gamma_{ij}} = e_{ii} + e_{jj} - e_{\ell+i, \ell+i} - e_{\ell+j, \ell+j}, & 1 \leq i < j \leq \ell. \end{aligned}$$

Korijenski potprostori su $\mathfrak{g}_\alpha = \text{span}\{e_\alpha\}$, $\alpha \in R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$, gdje su bazni vektori korijenskih potprostora e_α dani sa

$$\begin{aligned} e_{\alpha_i} &= e_{i,0} - e_{0, \ell+i}, & e_{-\alpha_i} &= e_{0,i} - e_{\ell+i,0}, & 1 \leq i \leq \ell, \\ e_{\beta_{ij}} &= e_{ij} - e_{\ell+j, \ell+i}, & 1 \leq i, j \leq \ell, \quad i \neq j, & -\beta_{ij} = \beta_{ji}, \\ e_{\gamma_{ij}} &= e_{j, \ell+i} - e_{i, \ell+j}, & e_{-\gamma_{ij}} &= e_{\ell+i, j} - e_{\ell+j, i}, & 1 \leq i < j \leq \ell. \end{aligned}$$

Napomenimo još da nije teško dokazati da je Liejeva algebra $\mathfrak{o}(3, \mathbb{C})$ izomorfna Liejevoj algebri $\mathfrak{sl}(2, \mathbb{C})$, te da je Liejeva algebra $\mathfrak{o}(5, \mathbb{C})$ izomorfna Liejevoj algebri $\mathfrak{sp}(4, \mathbb{C})$.

4. Na koncu promatramo kompleksnu ortogonalnu Liejevu algebru parnog reda:

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{o}(2\ell, \mathbb{C}) = \{x \in \mathfrak{gl}(2\ell, \mathbb{C}); sx = -x^t s\}, \quad \text{gdje je} \quad s = \begin{bmatrix} 0 & I_\ell \\ I_\ell & 0 \end{bmatrix}.$$

Proizvoljnu matricu $x \in \mathfrak{gl}(2\ell, \mathbb{C})$ zapišimo u blok-formi:

$$x = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}, \quad a, b, c, d \in \mathfrak{gl}(\ell, \mathbb{C}).$$

Tada je $x \in \mathfrak{g}$ ako i samo ako je $d = -a^t$, $b^t = -b$ i $c^t = -c$. Dakle,

$$\mathfrak{g} = \left\{ \begin{bmatrix} a & b \\ c & -a^t \end{bmatrix}; a, b, c \in \mathfrak{gl}(\ell, \mathbb{C}), b^t = -b, c^t = -c \right\}.$$

Neka je ponovo $\mathfrak{h}$ skup svih dijagonalnih matrica iz $\mathfrak{g}$, tj.

$$\mathfrak{h} = \{\text{diag}(c_1, \dots, c_\ell, -c_1, \dots, -c_\ell); c_1, \dots, c_\ell \in \mathbb{C}\}.$$

Tada je $\mathfrak{h}$ Cartanova podalgebra od $\mathfrak{g}$ i pripadni sistem korijena je

$$R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h}) = \{\beta_{ij}; 1 \leq i, j \leq \ell, i \neq j\} \cup \{\pm\gamma_{ij}; 1 \leq i < j \leq \ell\},$$

uz oznake

$$\begin{aligned} \beta_{ij}(\text{diag}(c_1, \dots, c_\ell, -c_1, \dots, -c_\ell)) &= c_i - c_j, & 1 \leq i, j \leq \ell, & i \neq j; \\ \gamma_{ij}(\text{diag}(c_1, \dots, c_\ell, -c_1, \dots, -c_\ell)) &= c_i + c_j, & 1 \leq i < j \leq \ell. \end{aligned}$$

Sada je

$$\begin{aligned} h_{\beta_{ij}} &= e_{ii} - e_{jj} - e_{\ell+i, \ell+i} + e_{\ell+j, \ell+j}, & 1 \leq i, j \leq \ell, & i \neq j, & -\beta_{ij} = \beta_{ji}, \\ h_{\gamma_{ij}} &= -h_{-\gamma_{ij}} = e_{ii} + e_{jj} - e_{\ell+i, \ell+i} - e_{\ell+j, \ell+j}, & 1 \leq i < j \leq \ell. \end{aligned}$$

Korijenski potprostori su $\mathfrak{g}_\alpha = \text{span}\{e_\alpha\}$, $\alpha \in R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$, gdje su bazni vektori korijenskih potprostora e_α dani sa

$$\begin{aligned} e_{\beta_{ij}} &= e_{ij} - e_{\ell+j, \ell+i}, & 1 \leq i, j \leq \ell, & i \neq j, & -\beta_{ij} = \beta_{ji}, \\ e_{\gamma_{ij}} &= e_{i, \ell+j} - e_{j, \ell+i}, & e_{-\gamma_{ij}} &= e_{\ell+j, i} - e_{\ell+i, j}, & 1 \leq i < j \leq \ell. \end{aligned}$$

Napomenimo da Liejeve algebre $\mathfrak{o}(2, \mathbb{C})$ i $\mathfrak{o}(4, \mathbb{C})$ nisu proste: $\mathfrak{o}(2, \mathbb{C})$ je komutativna, a $\mathfrak{o}(4, \mathbb{C})$ je direktna suma dvaju prostih ideala koji su oba izomorfna Liejevoj algebri $\mathfrak{sl}(2, \mathbb{C})$. Nadalje, pokazuje se da je Liejeva algebra $\mathfrak{o}(6, \mathbb{C})$ izomorfna Liejevoj algebri $\mathfrak{sl}(3, \mathbb{C})$. Napokon, nema drugih međusobnih izomorfizama osim ovih koje smo naveli: proste Liejeve algebre iz četiriju serija $\mathfrak{sl}(n, \mathbb{C})$, $n \geq 2$, $\mathfrak{o}(2\ell + 1, \mathbb{C})$, $\ell \geq 2$, $\mathfrak{sp}(2\ell, \mathbb{C})$, $\ell \geq 3$, $\mathfrak{o}(2\ell, \mathbb{C})$, $\ell \geq 4$, sve su međusobno neizomorfne.

Proučit ćemo sada поближе sistem korijena $R = R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ za svaku klasičnu kompleksnu prostu Liejevu algebru $\mathfrak{g}$ i izabranu Cartanovu podalgebru $\mathfrak{h}$ i posebno, ustanoviti njihove Dynkinove dijagrame. Na realnim međusobno dualnim prostorima $\mathfrak{h}(R) = \text{span}_{\mathbb{R}}\{h_\alpha; \alpha \in R\}$ i $\mathfrak{h}^*(R) = \text{span}_{\mathbb{R}} R$ imamo skalarne produkte inducirane Killingovom formom $B_{\mathfrak{g}}$. Skalarne produkte među korijenima zbog određivanja brojeva $n(\alpha, \beta)$ bit će nam znatno lakše računati pomoću elemenata $h_\alpha \in \mathfrak{h}(R)$. Podsjetimo se da je za $\alpha \in R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ h_α jedinstven element iz $[\mathfrak{g}_\alpha, \mathfrak{g}_{-\alpha}]$ takav da je $\alpha(h_\alpha) = 2$ i da je

$$h_\alpha = \frac{2}{B_{\mathfrak{g}}(t_\alpha, t_\alpha)} t_\alpha,$$

pri čemu je $\lambda \mapsto t_\lambda$ izomorfizam sa $\mathfrak{h}^*$ na $\mathfrak{h}$ induciran nedegeneriranom restrikcijom Killingove forme $B_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{h} \times \mathfrak{h}}$:

$$\lambda(h) = B_{\mathfrak{g}}(h, t_\lambda) \quad \forall h \in \mathfrak{h}.$$

Tim izomorfizmom prenesen je skalarni produkt $B_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{h}(R) \times \mathfrak{h}(R)}$ na prostor $\mathfrak{h}^*(R)$:

$$(\lambda|\mu) = B_{\mathfrak{g}}(t_\lambda, t_\mu) = \lambda(t_\mu) = \mu(t_\lambda), \quad \lambda, \mu \in \mathfrak{h}^*(R).$$

Za $\alpha \in R$ imamo

$$B_{\mathfrak{g}}(h_\alpha, h_\alpha) = \frac{4}{B_{\mathfrak{g}}(t_\alpha, t_\alpha)^2} B(t_\alpha, t_\alpha) = \frac{4}{B_{\mathfrak{g}}(t_\alpha, t_\alpha)},$$

dakle,

$$t_\alpha = \frac{1}{2} B_{\mathfrak{g}}(t_\alpha, t_\alpha) h_\alpha = \frac{1}{2} \frac{4}{B_{\mathfrak{g}}(h_\alpha, h_\alpha)} h_\alpha = \frac{2}{B_{\mathfrak{g}}(h_\alpha, h_\alpha)} h_\alpha.$$

Stoga za $\alpha, \beta \in R$ nalazimo

$$(\alpha|\beta) = B_{\mathfrak{g}}(t_\alpha, t_\beta) = 4 \frac{B(h_\alpha, h_\beta)}{B_{\mathfrak{g}}(h_\alpha, h_\alpha) B_{\mathfrak{g}}(h_\beta, h_\beta)}$$

i, posebno,

$$(\alpha|\alpha) = \frac{4}{B_{\mathfrak{g}}(h_\alpha, h_\alpha)}.$$

Odatle je

$$n(\alpha, \beta) = 2 \frac{(\alpha|\beta)}{(\beta|\beta)} = 2 \frac{B_{\mathfrak{g}}(h_\alpha, h_\beta)}{B_{\mathfrak{g}}(h_\alpha, h_\alpha) B_{\mathfrak{g}}(h_\beta, h_\beta)} B_{\mathfrak{g}}(h_\beta, h_\beta) = 2 \frac{B(h_\alpha, h_\beta)}{B(h_\alpha, h_\alpha)} \quad (4.7)$$

i

$$\frac{\|\alpha\|^2}{\|\beta\|^2} = \frac{B_{\mathfrak{g}}(h_\beta, h_\beta)}{B_{\mathfrak{g}}(h_\alpha, h_\alpha)}. \quad (4.8)$$

U daljnjem ćemo za svaku od klasičnih kompleksnih prostih Liejevih algebri $\mathfrak{g}$ i izabranu Cartanovu podalgebru $\mathfrak{h}$ utvrdit ćemo Dynkinov dijagram pripadnog sistema korijena $R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$. U tu svrhu mogli bismo koristiti opisani skalarni produkt $(\cdot | \cdot)$ na prostoru $\mathfrak{h}^*(R)$, odnosno, skalarni produkt $B_{\mathfrak{g}}|_{\mathfrak{h}(R) \times \mathfrak{h}(R)}$ na prostoru $\mathfrak{h}(R)$. Međutim, mnogo je jednostavnije koristiti jedan drugi skalarni produkt, tj. onaj koji se dobije iz simetrične bilinearne forme na $\mathfrak{g}$ definirane pomoću traga matrica, a ne traga operatora adjungirane reprezentacije na prostoru $\mathfrak{g}$. Naime, ako je $\mathfrak{g}$ Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(n, \mathbb{C})$, definiramo simetričnu bilinearnu formu $A_{\mathfrak{g}} : \mathfrak{g} \times \mathfrak{g} \rightarrow \mathbb{C}$ sa

$$A_{\mathfrak{g}}(x, y) = \text{Tr } xy, \quad x, y \in \mathfrak{g}. \quad (4.9)$$

Ta je forma uvijek nedegenerirana, a u slučaju da je $\mathfrak{g}$ prosta Liejeva podalgebra od $\mathfrak{gl}(n, \mathbb{C})$, ona je proporcionalna Killingovoj formi. To je posljedica činjenice da forma $A_{\mathfrak{g}}$ ima isto svojstvo invarijantnosti s obzirom na adjungiranu reprezentaciju $z \mapsto \text{ad } z$ od $\mathfrak{g}$ kao i Killingova forma $B_{\mathfrak{g}}$. Doista, za bilo koje $x, y, z \in \mathfrak{g}$ imamo redom

$$\begin{aligned} A_{\mathfrak{g}}((\text{ad } z)x, y) + A_{\mathfrak{g}}(x, (\text{ad } z)y) &= \text{Tr } ([z, x]y + x[z, y]) = \\ &= \text{Tr } (zxy - xzy + xzy - xyz) = \text{Tr } zxy - \text{Tr } xyz = 0. \end{aligned}$$

Propozicija 4.5.2. *Neka je $\mathfrak{g}$ prosta kompleksna Liejeva algebra i neka je $A : \mathfrak{g} \times \mathfrak{g} \rightarrow \mathbb{C}$ bilinearna forma invarijantna s obzirom na adjungiranu reprezentaciju $z \mapsto \text{ad } z$, $z \in \mathfrak{g}$, tj. takva da je*

$$A((\text{ad } z)x, y) + A(x, (\text{ad } z)y) = 0 \quad \forall x, y, z \in \mathfrak{g}.$$

Tada postoji $c \in \mathbb{C}$ takav da je $A(x, y) = cB_{\mathfrak{g}}(x, y) \quad \forall x, y \in \mathfrak{g}$.

Dokaz: Budući da je bilinearna forma $B_{\mathfrak{g}}$ nedegenerirana, postoji jedinstven linearni operator $T : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}$ takav da je

$$A(x, y) = B_{\mathfrak{g}}(Tx, y) \quad \forall x, y \in \mathfrak{g}.$$

Za $x, y, z \in \mathfrak{g}$ imamo redom

$$B_{\mathfrak{g}}(T(\text{ad } z)x, y) = A((\text{ad } z)x, y) = -A(x, (\text{ad } z)y) = -B_{\mathfrak{g}}(Tx, (\text{ad } z)y) = B_{\mathfrak{g}}((\text{ad } z)Tx, y).$$

Sada iz nedegeneriranosti Killingove forme $B_{\mathfrak{g}}$ slijedi $T(ad z) = (ad z)T \quad \forall z \in \mathfrak{g}$. Dakle, T je preplitanje reprezentacije ad sa samom sobom. Međutim, kako je Liejeva algebra $\mathfrak{g}$ prosta, reprezentacija ad je ireducibilna. Prema tvrdnji (c) Dixmier–Schurove leme (teorem 1.2.6.) postoji $c \in \mathbb{C}$ takav da je $T = cI_{\mathfrak{g}}$. Dakle, $A(x, y) = B_{\mathfrak{g}}(Tx, y) = B_{\mathfrak{g}}(cx, y) = cB_{\mathfrak{g}}(x, y)$.

Odredit ćemo sada eksplicitno faktor proporcionalnosti u slučaju klasičnih prostih Liejevih algebri:

Propozicija 4.5.3. *Neka je $\mathfrak{g}$ klasična prosta kompleksna Liejeva algebra, tj. $\mathfrak{g} = \mathfrak{sl}(n, \mathbb{C})$, $n \geq 2$, $\mathfrak{g} = \mathfrak{sp}(n, \mathbb{C})$, $n \in 2\mathbb{N}$, ili $\mathfrak{g} = \mathfrak{o}(n, \mathbb{C})$, $n = 3$ ili $n \geq 5$. Tada je bilinearna forma $A_{\mathfrak{g}} : \mathfrak{g} \times \mathfrak{g} \rightarrow \mathbb{C}$ definirana sa (4.9) proporcionalna Killingovoj formi $B_{\mathfrak{g}}$ i faktori proporcionalnosti su u tri slučaja jednaki $\frac{1}{2n}$ za $\mathfrak{sl}(n, \mathbb{C})$, $\frac{1}{(n+2)}$ za $\mathfrak{sp}(n, \mathbb{C})$ i $\frac{1}{n-2}$ za $\mathfrak{o}(n, \mathbb{C})$. Dakle,*

$$(a) \quad B_{\mathfrak{sl}(n, \mathbb{C})}(x, y) = 2n \operatorname{Tr} xy, \quad \forall x, y \in \mathfrak{sl}(n, \mathbb{C}).$$

$$(b) \quad B_{\mathfrak{sp}(n, \mathbb{C})}(x, y) = (n+2) \operatorname{Tr} xy, \quad \forall x, y \in \mathfrak{sp}(n, \mathbb{C}).$$

$$(c) \quad B_{\mathfrak{o}(n, \mathbb{C})}(x, y) = (n-2) \operatorname{Tr} xy, \quad \forall x, y \in \mathfrak{o}(n, \mathbb{C}).$$

Dokaz: Prva tvrdnja neposredna je posljedica propozicije 4.5.2. Dakle, u svakom od tri slučaja vrijedi $A_{\mathfrak{g}}(x, y) = cB_{\mathfrak{g}}(x, y)$, $\forall x, y \in \mathfrak{g}$, gdje je $c \in \mathbb{C}$. Da bismo izračunali c , dovoljno je izračunati $A_{\mathfrak{g}}(x, x)$ i $B_{\mathfrak{g}}(x, x)$ za zgodno izabrani $x \in \mathfrak{g}$. Provedimo to za svaki od slučajeva. U njima ćemo upotrebljavati uvedene oznake za korijene i korijske vektore.

1. $\mathfrak{g} = \mathfrak{sl}(\ell+1)$, $\ell \in \mathbb{N}$. Izaberimo $x = h_{\alpha_1} = e_{11} - e_{22}$. Tada je $A_{\mathfrak{g}}(x, x) = \operatorname{Tr} x^2 = 2$. Nadalje, svi elementi baze

$$\{e_{ii} - e_{i+1, i+1}; \quad 1 \leq i \leq \ell\} \cup \{e_{ij}; \quad 1 \leq i, j \leq \ell+1, \quad i \neq j\}$$

Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ su svojstveni vektori operatora $ad x$:

$$\begin{aligned} (ad x)(e_{ii} - e_{i+1, i+1}) &= 0, & \text{za } 1 \leq i \leq \ell; \\ (ad x)e_{12} &= 2e_{12}; & (ad x)e_{21} &= -2e_{21}; \\ (ad x)e_{1i} &= e_{1i}, & (ad x)e_{i1} &= -e_{i1}, & \text{za } 3 \leq i \leq \ell+1; \\ (ad x)e_{2i} &= -e_{2i}, & (ad x)e_{i2} &= e_{i2} & \text{za } 3 \leq i \leq \ell+1; \\ (ad x)e_{ij} &= 0 & \text{za } i \neq j & \text{ i } \{i, j\} \cap \{1, 2\} = \emptyset. \end{aligned}$$

Prema tome,

$$B_{\mathfrak{g}}(x, x) = \operatorname{Tr} (ad x)^2 = 2 \cdot 4 + 4(\ell-1) = 4(\ell+1).$$

Dakle, u ovom je slučaju

$$c = \frac{2}{4(\ell+1)} = \frac{1}{2(\ell+1)}.$$

2. $\mathfrak{g} = \mathfrak{sp}(2\ell, \mathbb{C})$, $\ell \in \mathbb{N}$. U ovom slučaju biramo $x = h_{\alpha_1} = e_{11} - e_{\ell+1, \ell+1}$. Ponovo je $A_{\mathfrak{g}}(x, x) = \operatorname{Tr} x^2 = 2$. Operator $ad x$ ima u bazi

$$\{h_{\alpha_i}; \quad 1 \leq i \leq \ell\} \cup \{e_{\alpha_i}; \quad 1 \leq i \leq \ell\} \cup \{e_{\beta_{ij}}; \quad 1 \leq i, j \leq \ell, \quad i \neq j\} \cup \{e_{\pm \gamma_{ij}}; \quad 1 \leq i < j \leq \ell\}$$

Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ dijagonalnu matricu:

$$(ad x)h_{\alpha_i} = 0, \quad \text{za } 1 \leq i \leq \ell;$$

$$\begin{aligned}
(ad x)e_{\alpha_1} &= 2e_{\alpha_1}; & (ad x)e_{-\alpha_1} &= -2e_{-\alpha_1}; \\
(ad x)e_{\alpha_i} &= (ad x)e_{-\alpha_i} = 0 & \text{za } 2 \leq i \leq \ell; \\
(ad x)e_{\beta_{1i}} &= e_{\beta_{1i}}, & (ad x)e_{\beta_{i1}} &= -e_{\beta_{i1}} \quad \text{za } 2 \leq i \leq \ell; \\
(ad x)e_{\beta_{ij}} &= 0 & \text{za } 2 \leq i, j \leq \ell, \quad i \neq j; \\
(ad x)e_{\gamma_{1i}} &= e_{\gamma_{1i}}, & (ad x)e_{-\gamma_{1i}} &= -e_{-\gamma_{1i}}, \quad \text{za } 2 \leq i \leq \ell; \\
(ad x)e_{\gamma_{ij}} &= (ad x)e_{-\gamma_{ij}} = 0 & \text{za } 2 \leq i < j \leq \ell.
\end{aligned}$$

Prema tome,

$$B_{\mathfrak{g}}(x, x) = 2 \cdot 4 + 4(\ell - 1) = 4(\ell + 1).$$

Dakle,

$$c = \frac{2}{4(\ell + 1)} = \frac{1}{2(\ell + 1)} = \frac{1}{2\ell + 2}.$$

3. $\mathfrak{g} = \mathfrak{o}(2\ell + 1, \mathbb{C})$, $\ell \in \mathbb{N}$. Biramo $x = \frac{1}{2}h_{\alpha_1} = e_{11} - e_{\ell+1, \ell+1}$. Ponovo je $A_{\mathfrak{g}}(x, x) = \text{Tr } x^2 = 2$. Sada operator $ad x$ djeluje na vektore baze

$$\{h_{\alpha_i}; 1 \leq i \leq \ell\} \cup \{e_{\alpha_i}; 1 \leq i \leq \ell\} \cup \{e_{\beta_{ij}}; 1 \leq i, j \leq \ell, i \neq j\} \cup \{e_{\pm\gamma_{ij}}; 1 \leq i < j \leq \ell\}$$

Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ ovako:

$$\begin{aligned}
(ad x)h_{\alpha_i} &= 0, & \text{za } 1 \leq i \leq \ell; \\
(ad x)e_{\alpha_1} &= e_{\alpha_1}; & (ad x)e_{-\alpha_1} &= -e_{-\alpha_1}; \\
(ad x)e_{\alpha_i} &= (ad x)e_{-\alpha_i} = 0 & \text{za } 2 \leq i \leq \ell; \\
(ad x)e_{\beta_{1i}} &= e_{\beta_{1i}}, & (ad x)e_{\beta_{i1}} &= -e_{\beta_{i1}} \quad \text{za } 2 \leq i \leq \ell; \\
(ad x)e_{\beta_{ij}} &= 0 & \text{za } 2 \leq i, j \leq \ell, \quad i \neq j; \\
(ad x)e_{\gamma_{1i}} &= e_{\gamma_{1i}}, & (ad x)e_{-\gamma_{1i}} &= -e_{-\gamma_{1i}}, \quad \text{za } 2 \leq i \leq \ell; \\
(ad x)e_{\gamma_{ij}} &= (ad x)e_{-\gamma_{ij}} = 0 & \text{za } 2 \leq i < j \leq \ell.
\end{aligned}$$

Prema tome,

$$B_{\mathfrak{g}}(x, x) = 2 + 4(\ell - 1) = 2(2\ell - 1).$$

Dakle,

$$c = \frac{2}{2(2\ell - 1)} = \frac{1}{2\ell - 1} = \frac{1}{(2\ell + 1) - 2}.$$

4. $\mathfrak{g} = \mathfrak{o}(2\ell, \mathbb{C})$, $\ell \in \mathbb{N}$, $\ell \geq 3$. Biramo $x = h_{\beta_{12}} = e_{11} - e_{22} - e_{\ell+1, \ell+1} + e_{\ell+2, \ell+2}$. Sada je $A_{\mathfrak{g}}(x, x) = \text{Tr } x^2 = 4$. Nadalje, operator $ad x$ djeluje na vektore baze

$$\{h_{\beta_{i, \ell+i}}; 1 \leq i \leq \ell\} \cup \{e_{\beta_{ij}}; 1 \leq i, j \leq \ell, i \neq j\} \cup \{e_{\pm\gamma_{ij}}; 1 \leq i < j \leq \ell\}$$

Liejeve algebre $\mathfrak{g}$ ovako:

$$\begin{aligned}
(ad x)h_{\beta_{i, \ell+i}} &= 0 & \text{za } 1 \leq i \leq \ell; \\
(ad x)e_{\beta_{12}} &= 2e_{\beta_{12}}, & (ad x)e_{\beta_{21}} &= -2e_{\beta_{21}}; \\
(ad x)e_{\beta_{1i}} &= e_{\beta_{1i}}, & (ad x)e_{\beta_{2i}} &= -e_{\beta_{2i}}, \quad \text{za } 3 \leq i \leq \ell; \\
(ad x)e_{\beta_{i1}} &= -e_{\beta_{i1}}, & (ad x)e_{\beta_{i2}} &= e_{\beta_{i2}}, \quad \text{za } 3 \leq i \leq \ell; \\
(ad x)e_{\beta_{ij}} &= 0 & \text{za } 3 \leq i, j \leq \ell, \quad i \neq j; \\
(ad x)e_{\gamma_{12}} &= (ad x)e_{-\gamma_{12}} = 0;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(ad x)e_{\gamma_{1i}} &= e_{\gamma_{1i}}, & (ad x)e_{\gamma_{2i}} &= -e_{\gamma_{2i}}, & \text{za } 3 \leq i \leq \ell; \\
(ad x)e_{-\gamma_{1i}} &= -e_{-\gamma_{1i}}, & (ad x)e_{-\gamma_{2i}} &= e_{-\gamma_{2i}} & \text{za } 3 \leq i \leq \ell; \\
(ad x)e_{\gamma_{ij}} &= (ad x)e_{-\gamma_{ij}} = 0 & \text{za } 3 \leq i < j \leq \ell.
\end{aligned}$$

Prema tome,

$$B_{\mathfrak{g}}(x, x) = 2 \cdot 4 + 8(\ell - 2) = 8(\ell - 1).$$

Dakle,

$$c = \frac{4}{8(\ell - 1)} = \frac{1}{2(\ell - 1)} = \frac{1}{2\ell - 2}.$$

Time je propozicija 4.5.3. u potpunosti dokazana.

Napomena. Direktnim računom lako se vidi da (c) vrijedi i za $n = 2$ i $n = 4$ iako pripadne Liejeve algebre nisu proste: $\mathfrak{o}(2, \mathbb{C})$ je komutativna, a $\mathfrak{o}(4, \mathbb{C})$ je direktna suma dvaju prostih ideala, koji su oba izomorfni sa $\mathfrak{sl}(2, \mathbb{C})$.

Posljedica je propozicije 4.5.3. da se u slučaju kad je $\mathfrak{g}$ klasična prosta kompleksna Liejeva algebra umjesto skalarnog produkta induciran na $\mathfrak{h}(R)$ i na njegovu dualu $\mathfrak{h}^*(R)$ Killingovom formom $B_{\mathfrak{g}}$ možemo koristiti skalarnim produktima induciranom bilinearnom formom $A_{\mathfrak{g}}(x, y) = \text{Tr } xy$, $x, y \in \mathfrak{g}$. U daljnjem ćemo upravo te skalarne produkte i na $\mathfrak{h}^*(R)$ i na $\mathfrak{h}(R)$ označavati sa $(\cdot | \cdot)$, a pripadne norme sa $\| \cdot \|$. Sada formule (4.7) i (4.8) prelaze u

$$n(\alpha, \beta) = 2 \frac{(h_{\alpha} | h_{\beta})}{(h_{\alpha} | h_{\alpha})} \quad \text{i} \quad \frac{\|\alpha\|^2}{\|\beta\|^2} = \frac{\|h_{\beta}\|^2}{\|h_{\alpha}\|^2}. \quad (4.10)$$

Sada ćemo identificirati Dynkinove dijagrame klasičnih prostih kompleksnih Liejevih algebri. I dalje upotrebljavamo uvedene oznake za četiri serije klasičnih Liejevih algebri.

Specijalna linearna Liejeva algebra $\mathfrak{sl}(\ell + 1, \mathbb{C})$, $\ell \geq 1$

Stavimo $\alpha_i = \alpha_{i, i+1}$, $1 \leq i \leq \ell$. Lako se vidi da je tada

$$\alpha_{ij} = \alpha_i + \cdots + \alpha_{j-1}, \quad 1 \leq i < j \leq \ell + 1,$$

$$\alpha_{ij} = -\alpha_{ji} = -\alpha_j - \cdots - \alpha_{i-1}, \quad 1 \leq j < i \leq \ell + 1.$$

To pokazuje da je $B = \{\alpha_1, \dots, \alpha_{\ell}\}$ baza sistema korijena $R = R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$. Pripadni skup pozitivnih korijena je $R_+ = \{\alpha_{ij}; 1 \leq i < j \leq \ell + 1\}$.

Odredimo sada Dynkinov dijagram sistema korijena R . Najprije računamo skalarne produkte $(h_{\alpha_i} | h_{\alpha_j})$, $1 \leq i, j \leq \ell$:

$$(h_{\alpha_i} | h_{\alpha_i}) = \text{Tr}(e_{ii} - e_{i+1, i+1})^2 = \text{Tr}(e_{ii} + e_{i+1, i+1}) = 2$$

$$(h_{\alpha_i} | h_{\alpha_{i+1}}) = \text{Tr}(e_{ii} - e_{i+1, i+1})(e_{i+1, i+1} - e_{i+2, i+2}) = \text{Tr}(-e_{i+1, i+1}) = -1 \quad \text{za } 1 \leq i \leq \ell - 1;$$

$$(h_{\alpha_i} | h_{\alpha_j}) = \text{Tr}(e_{ii} - e_{i+1, i+1})(e_{jj} - e_{j+1, j+1}) = 0 \quad \text{ako je } 1 \leq i, j \leq \ell, \quad |i - j| \geq 2.$$

Odatle i iz (4.10) nalazimo

$$n(\alpha_i, \alpha_{i+1}) = 2 \frac{(h_{\alpha_{i+1}} | h_{\alpha_i})}{(h_{\alpha_i} | h_{\alpha_i})} = 2 \frac{-1}{2} = -1 = n(\alpha_{i+1}, \alpha_i) \quad 1 \leq i \leq \ell - 1,$$

i

$$n(\alpha_i, \alpha_j) = 0 \quad \text{ako je } |i - j| \geq 2.$$

To pokazuje da je Dynkinov dijagram sistema korijena $R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ tipa A_{ℓ} .

Ortogonalna Liejeva algebra $\mathfrak{o}(2\ell + 1, \mathbb{C})$, $\ell \geq 2$

Stavimo $\delta_i = \beta_{i,i+1}$ za $1 \leq i \leq \ell - 1$ i $\delta_\ell = \alpha_\ell$. Tada nalazimo

$$\alpha_i = \delta_i + \cdots + \delta_\ell, \quad 1 \leq i \leq \ell,$$

$$\beta_{ij} = \delta_i + \cdots + \delta_{j-1}, \quad 1 \leq i < j \leq \ell,$$

$$\gamma_{ij} = \delta_i + \cdots + \delta_{j-1} + 2\delta_j + \cdots + 2\delta_\ell, \quad 1 \leq i < j \leq \ell.$$

Dakle, $\{\delta_1, \dots, \delta_\ell\}$ je baza sistema korijena $R = R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ i skup pozitivnih korijena u odnosu na tu bazu je

$$R_+ = \{\alpha_i; 1 \leq i \leq \ell\} \cup \{\beta_{ij}; 1 \leq i < j \leq \ell\} \cup \{\gamma_{ij}; 1 \leq i < j \leq \ell\}.$$

Odredimo sada Coxeterov graf i Dynkinov dijagram od R . Imamo

$$h_{\delta_i} = e_{ii} - e_{i+1,i+1} - e_{\ell+i,\ell+i} + e_{\ell+i+1,\ell+i+1} \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell - 1 \quad \text{i} \quad h_{\delta_\ell} = 2e_{\ell\ell} - 2e_{2\ell,2\ell}$$

pa je

$$(h_{\delta_i} | h_{\delta_i}) = \text{Tr}(e_{ii} - e_{i+1,i+1} - e_{\ell+i,\ell+i} + e_{\ell+i+1,\ell+i+1})^2 = 4 \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell - 1,$$

$$(h_{\delta_\ell} | h_{\delta_\ell}) = \text{Tr}(2e_{\ell\ell} - 2e_{2\ell,2\ell})^2 = 8,$$

$$\begin{aligned} (h_{\delta_i} | h_{\delta_{i+1}}) &= \text{Tr}(e_{ii} - e_{i+1,i+1} - e_{\ell+i,\ell+i} + e_{\ell+i+1,\ell+i+1})(e_{i+1,i+1} - e_{i+2,i+2} - e_{\ell+i+1,\ell+i+1} + e_{\ell+i+2,\ell+i+2}) = \\ &= \text{Tr}(-e_{i+1,i+1} - e_{\ell+i+1,\ell+i+1}) = -2 \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell - 2, \end{aligned}$$

$$(h_{\delta_{\ell-1}} | h_{\delta_\ell}) = \text{Tr}(e_{\ell-1,\ell-1} - e_{\ell\ell} - e_{2\ell-1,2\ell-1} + e_{2\ell,2\ell})(2e_{\ell\ell} - 2e_{2\ell,2\ell}) = \text{Tr}(-2e_{\ell\ell} - 2e_{2\ell,2\ell}) = -4.$$

Svi ostali međusobni skalarni produkti vektora baze h_{δ_i} jednaki su nuli, jer su produkti tih matrica jednaki nuli. Odatle imamo prema (4.10)

$$n(\delta_i, \delta_{i+1}) = 2 \frac{(h_{\delta_{i+1}} | h_{\delta_i})}{(h_{\delta_i} | h_{\delta_i})} = 2 \frac{-2}{4} = -1 = n(\delta_{i+1}, \delta_i) \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell - 2,$$

$$n(\delta_{\ell-1}, \delta_\ell) = 2 \frac{(h_{\delta_\ell} | h_{\delta_{\ell-1}})}{(h_{\delta_{\ell-1}} | h_{\delta_{\ell-1}})} = 2 \frac{-4}{4} = -2,$$

$$n(\delta_\ell, \delta_{\ell-1}) = 2 \frac{(h_{\delta_{\ell-1}} | h_{\delta_\ell})}{(h_{\delta_\ell} | h_{\delta_\ell})} = 2 \frac{-4}{8} = -1.$$

Nadalje, $n(\delta_i, \delta_j) = 0$ ako je $|i - j| \geq 2$. Dakle,

$$n(\delta_i, \delta_{i+1})n(\delta_{i+1}, \delta_i) = 1 \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell - 2; \quad n(\delta_{\ell-1}, \delta_\ell)n(\delta_\ell, \delta_{\ell-1}) = 2.$$

Prema tome, u Coxeterovom grafu spojeni su samo vrhovi δ_i i δ_{i+1} za $1 \leq i \leq \ell - 1$ i to s jednom linijom za $1 \leq i \leq \ell - 2$ i s dvije linije za $i = \ell - 1$. Nadalje, omjeri kvadrata duljina korijena $\delta_{\ell-1}$ i δ_ℓ su prema (4.10) :

$$\frac{\|\delta_{\ell-1}\|^2}{\|\delta_\ell\|^2} = \frac{\|h_{\delta_\ell}\|^2}{\|h_{\delta_{\ell-1}}\|^2} = \frac{8}{4} = 2.$$

Dakle, korijen $\delta_{\ell-1}$ dulji je od korijena δ_ℓ , pa je u Dynkinovom dijagramu strelica usmjerena od vrha $\delta_{\ell-1}$ prema vrhu δ_ℓ . To znači da je Dynkinov dijagram sistema korijena $R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ tipa B_ℓ .

Simplektička Liejeva algebra $\mathfrak{sp}(2\ell, \mathbb{C})$, $\ell \geq 2$

Stavimo kao i u prethodnom primjeru $\delta_i = \beta_{i,i+1}$ za $1 \leq i \leq \ell - 1$ i $\delta_\ell = \alpha_\ell$. Tada je

$$\alpha_i = 2\delta_i + \cdots + 2\delta_{\ell-1} + \delta_\ell, \quad 1 \leq i \leq \ell,$$

$$\beta_{ij} = \delta_i + \cdots + \delta_{j-1}, \quad 1 \leq i < j \leq \ell,$$

$$\gamma_{ij} = \delta_i + \cdots + \delta_{j-1} + 2\delta_j + \cdots + 2\delta_{\ell-1} + \delta_\ell, \quad 1 \leq i < j \leq \ell.$$

Dakle, $\{\delta_1, \dots, \delta_\ell\}$ je baza sistema korijena $R = R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ i skup pozitivnih korijena u odnosu na tu bazu je

$$R_+ = \{\alpha_i; 1 \leq i \leq \ell\} \cup \{\beta_{ij}; 1 \leq i < j \leq \ell\} \cup \{\gamma_{ij}; 1 \leq i < j \leq \ell\}.$$

Izračunajmo sada skalarne produkte $(h_{\delta_i} | h_{\delta_j})$. Imamo

$$h_{\delta_i} = e_{ii} - e_{i+1,i+1} - e_{\ell+i,\ell+i} + e_{\ell+i+1,\ell+i+1} \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell - 1; \quad h_{\delta_\ell} = e_{\ell\ell} - e_{2\ell,2\ell}.$$

Prema tome, za $1 \leq i \leq \ell - 1$ je

$$(h_{\delta_i} | h_{\delta_i}) = \text{Tr}(e_{ii} - e_{i+1,i+1} - e_{\ell+i,\ell+i} + e_{\ell+i+1,\ell+i+1})^2 = \text{Tr}(e_{ii} + e_{i+1,i+1} + e_{\ell+i,\ell+i} + e_{\ell+i+1,\ell+i+1}) = 4,$$

a

$$(h_{\delta_\ell} | h_{\delta_\ell}) = \text{Tr}(e_{\ell\ell} - e_{2\ell,2\ell})^2 = \text{Tr}(e_{\ell\ell} + e_{2\ell,2\ell}) = 2.$$

Dakle, kvadrati duljina vektora baze $h_{\delta_1}, \dots, h_{\delta_{\ell-1}}$ su međusobno jednaki kao i u prethodnom primjeru, ali sada je kvadrat duljine vektora h_{δ_ℓ} upola manji. Prema (4.10) duljine korijena $\delta_1, \dots, \delta_{\ell-1}$ su jednake a kvadrat duljine korijena δ_ℓ je dvostruko veći od kvadrata duljina ostalih. Odredimo među kojim vrhovima postoje spojnice. Imamo

$$\begin{aligned} (h_{\delta_i} | h_{\delta_{i+1}}) &= \text{Tr}(e_{ii} - e_{i+1,i+1} - e_{\ell+i,\ell+i} + e_{\ell+i+1,\ell+i+1})(e_{i+1,i+1} - e_{i+2,i+2} - e_{\ell+i+1,\ell+i+1} + e_{\ell+i+2,\ell+i+2}) = \\ &= \text{Tr}(-e_{i+1,i+1} - e_{\ell+i+1,\ell+i+1}) = -2 \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell - 2, \end{aligned}$$

$$(h_{\delta_{\ell-1}} | h_{\delta_\ell}) = \text{Tr}(e_{\ell-1,\ell-1} - e_{\ell\ell} - e_{2\ell-1,2\ell-1} + e_{2\ell,2\ell})(e_{\ell\ell} - e_{2\ell,2\ell}) = \text{Tr}(-e_{\ell\ell} - e_{2\ell,2\ell}) = -2.$$

Svi ostali međusobni skalarni produkti vektora baze h_{δ_i} jednaki su nuli, jer su produkti tih matrica jednaki nuli. Prema (4.10) imamo

$$n(\delta_i, \delta_{i+1}) = 2 \frac{(h_{\delta_{i+1}} | h_{\delta_i})}{(h_{\delta_i} | h_{\delta_i})} = 2 \frac{-2}{4} = -1 = n(\delta_{i+1}, \delta_i) \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell - 2,$$

$$n(\delta_{\ell-1}, \delta_\ell) = 2 \frac{(h_{\delta_\ell} | h_{\delta_{\ell-1}})}{(h_{\delta_{\ell-1}} | h_{\delta_{\ell-1}})} = 2 \frac{-2}{4} = -1,$$

$$n(\delta_\ell, \delta_{\ell-1}) = 2 \frac{(h_{\delta_{\ell-1}} | h_{\delta_\ell})}{(h_{\delta_\ell} | h_{\delta_\ell})} = 2 \frac{-2}{2} = -2.$$

Dakle,

$$n(\delta_i, \delta_{i+1})n(\delta_{i+1}, \delta_i) = 1 \quad \text{za} \quad 1 \leq i \leq \ell - 2; \quad n(\delta_{\ell-1}, \delta_\ell)n(\delta_\ell, \delta_{\ell-1}) = 2.$$

Prema tome, Coxeterov graf je isti kao i u prethodnom slučaju. Međutim, sada je korijen δ_ℓ dulji od korijena $\delta_{\ell-1}$, pa je strelica u Dynkinovom dijagramu okrenuta suprotno: od δ_ℓ prema $\delta_{\ell-1}$. Dakle, Dynkinov dijagram sistema korijena $R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ je tipa C_ℓ .

Ortogonalna Liejeva algebra $\mathfrak{o}(2\ell, \mathbb{C})$, $\ell \geq 3$

Sada stavimo $\alpha_i = \beta_{i,i+1}$ za $q \leq i \leq \ell - 1$ i $\alpha_\ell = \gamma_{\ell-1,\ell}$. Tada je

$$\beta_{ij} = \alpha_i + \cdots + \alpha_{j-1} \quad 1 \leq i < j \leq \ell,$$

$$\gamma_{ij} = \alpha_i + \cdots + \alpha_{j-1} + 2\alpha_j + \cdots + 2\alpha_{\ell-2} + \alpha_{\ell-1} + \alpha_\ell, \quad 1 \leq i < j \leq \ell.$$

Dakle, $\{\alpha_1, \dots, \alpha_\ell\}$ je baza sistema korijena $R = R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ i pripadni skup pozitivnih korijena je

$$R_+ = \{\beta_{ij}; 1 \leq i < j \leq \ell\} \cup \{\gamma_{ij}; 1 \leq i < j \leq \ell\}.$$

Imamo

$$h_{\alpha_i} = h_{\beta_{i,i+1}} = e_{ii} - e_{i+1,i+1} - e_{\ell+i,\ell+i} + e_{\ell+i+1,\ell+i+1} \quad \text{za } 1 \leq i \leq \ell - 1,$$

$$h_{\alpha_\ell} = h_{\gamma_{\ell-1,\ell}} = e_{\ell-1,\ell-1} + e_{\ell\ell} - e_{2\ell-1,2\ell-1} - e_{2\ell,2\ell}.$$

Prema tome, za $1 \leq i \leq \ell - 1$ je

$$(h_{\alpha_i} | h_{\alpha_i}) = \text{Tr}(e_{ii} - e_{i+1,i+1} - e_{\ell+i,\ell+i} + e_{\ell+i+1,\ell+i+1})^2 = \text{Tr}(e_{ii} + e_{i+1,i+1} + e_{\ell+i,\ell+i} + e_{\ell+i+1,\ell+i+1}) = 4,$$

$$(h_{\alpha_\ell} | h_{\alpha_\ell}) = \text{Tr}(e_{\ell-1,\ell-1} + e_{\ell\ell} - e_{2\ell-1,2\ell-1} - e_{2\ell,2\ell})^2 = \text{Tr}(e_{\ell-1,\ell-1} + e_{\ell\ell} + e_{2\ell-1,2\ell-1} + e_{2\ell,2\ell}) = 4.$$

Dakle, prema (4.10) u ovom su slučaju duljine svih vektora izabrane baze od R iste duljine. Odredimo sada spojnice među vrhovima. Imamo za $1 \leq i \leq \ell - 2$

$$\begin{aligned} (h_{\alpha_i} | h_{\alpha_{i+1}}) &= \text{Tr}(e_{ii} - e_{i+1,i+1} - e_{\ell+i,\ell+i} + e_{\ell+i+1,\ell+i+1})(e_{i+1,i+1} - e_{i+2,i+2} - e_{\ell+i+1,\ell+i+1} + e_{\ell+i+2,\ell+i+2}) = \\ &= \text{Tr}(-e_{i+1,i+1} - e_{\ell+i+1,\ell+i+1}) = -2. \end{aligned}$$

Nadalje,

$$\begin{aligned} (h_{\alpha_{\ell-2}} | h_{\alpha_\ell}) &= \text{Tr}(e_{\ell-2,\ell-2} - e_{\ell-1,\ell-1} - e_{2\ell-2,2\ell-2} + e_{2\ell-1,2\ell-1})(e_{\ell-1,\ell-1} + e_{\ell\ell} - e_{2\ell-1,2\ell-1} - e_{2\ell,2\ell}) = \\ &= \text{Tr}(-e_{\ell-1,\ell-1} - e_{2\ell-1,2\ell-1}) = -2 \end{aligned}$$

ali

$$\begin{aligned} (h_{\alpha_{\ell-1}} | h_{\alpha_\ell}) &= \text{Tr}(e_{\ell-1,\ell-1} - e_{\ell\ell} - e_{2\ell-1,2\ell-1} + e_{2\ell,2\ell})(e_{\ell-1,\ell-1} + e_{\ell\ell} - e_{2\ell-1,2\ell-1} - e_{2\ell,2\ell}) = \\ &= \text{Tr}(e_{\ell-1,\ell-1} - e_{\ell\ell} + e_{2\ell-1,2\ell-1} - e_{2\ell,2\ell}) = 0. \end{aligned}$$

Svi ostali međusobni skalarni produkti elemenata h_{α_i} jednaki su nuli jer su svi međusobni produkti tih matrica jednaki nuli. Sada pomoću (4.10) dobivamo

$$n(\alpha_i, \alpha_{i+1}) = 2 \frac{(h_{\alpha_{i+1}} | h_{\alpha_i})}{(h_{\alpha_i} | h_{\alpha_i})} = 2 \frac{-2}{4} = -1 = n(\alpha_{i+1}, \alpha_i), \quad \text{za } 1 \leq i \leq \ell - 2,$$

$$n(\alpha_{\ell-2}, \alpha_\ell) = 2 \frac{(h_{\alpha_\ell} | h_{\alpha_{\ell-2}})}{(h_{\alpha_{\ell-2}} | h_{\alpha_{\ell-2}})} = 2 \frac{-2}{4} = -1 = n(\alpha_\ell, \alpha_{\ell-2}).$$

To znači da je Coxeterov graf sistema korijena $R(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$, a time i Dynkinov dijagram jer su svi korijeni iste duljine, tipa D_ℓ .

Bibliografija

- [1] N. Bourbaki, *Lie Groups and Lie Algebras*, Ch. 1–3, Springer–Verlag, 2nd printing, Berlin–Heidelberg–New York–London–Paris–Tokyo, 1989; Ch. 4–6, Springer–Verlag, Berlin–Heidelberg–New York, 2002; Ch. 7–9, Springer–Verlag, Berlin–Heidelberg, 2005.
- [2] R. Carter, G. Segal, I. Macdonald, *Lectures on Lie Groups and Lie Algebras*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995.
- [3] K. Erdmann and M.J. Wildon, *Introduction to Lie Algebras*, Springer–Verlag, London, 2006.
- [4] W.A. de Graaf, *Lie Algebras: Theory and Algorithms*, North–Holland, Elsevier, Amsterdam–Lausanne–New York–Oxford–Shannon–Singapore–Tokyo, 2000.
- [5] B.C. Hall, *Lie Groups, Lie Algebras, and Representations, An Elementary Introduction*, Springer–Verlag, New York, 2004.
- [6] J.E. Humphreys, *Introduction to Lie Algebras and Representation Theory*, Springer–Verlag, Berlin–Heidelberg–New York, 1972.
- [7] N. Jacobson, *Lie Algebras*, Dover Publications, New York, 1979.
- [8] V.S. Varadarajan, *Lie Groups, Lie Algebras, and Their Representations*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1974.
- [9] H. Weyl, *The Classical Groups, Their Invariants and Representations*, Princeton Univ. Press, Princeton, N.J., 1997.
- [10] D.J. Winter, *Abstract Lie Algebras*, Dover Publications, Inc., Mineola, N.Y., 2008.