



# Analiza și Prognoza Seriilor de Timp

Capitolul 7: Cointegrare și Modele VECM



Daniel Traian PELE

Academia de Studii Economice din București

IDA Institute Digital Assets

Blockchain Research Center

AI4EFin Artificial Intelligence for Energy Finance

Academia Română, Institutul de Prognoză Economică

MSCA Digital Finance

## Cuprins

### Fundamente

- Motivație
- Regresia Falsă
- Conceptul de Cointegrare
- Metoda Engle-Granger
- Metoda Johansen

### Aplicații

- Estimarea VECM
- Considerații Practice
- Exemple Practice
- Studiu de caz: Rate ale dobânzii
- Rezumat și Quiz



## Obiective de învățare

La finalul acestui capitol, veți fi capabili să:

- Cointegrare:** Înțelegeți conceptul și relațiile de echilibru pe termen lung
- Regresia falsă:** Recunoașteți și evitați problema regresiei false (spurious regression)
- Engle-Granger:** Aplicați metoda în doi pași pentru testarea cointegrării
- Johansen:** Efectuați testul pentru cointegrare multiplă
- VECM (Vector Error Correction Model — Model Vectorial de Corecție a Erorilor):** Estimați și interpretați aceste modele
- Viteza de ajustare:** Analizați coeficienții  $\alpha$  și vectorii de cointegrare  $\beta$
- Python:** Implementați analiza de cointegrare cu aplicații practice



## De ce contează cointegrarea?

### Provocarea

- Nestaționaritate:** Multe serii economice/financiare sunt I(1) (integrate de ordinul 1)
  - ▶ PIB (Produsul Intern Brut), prețuri acțiuni, cursuri valutare, rate ale dobânzii au rădăcini unitare
- Regresia standard:** Cu variabile I(1)  $\succ$  rezultate false
  - ▶ Diferențierea elimină nestaționaritatea dar pierde informația pe termen lung

### Soluția: Cointegrarea

- Trend stochastic comun:** Unele serii nestaționare se mișcă împreună pe termen lung
  - ▶ Această relație pe termen lung poate fi modelată!

### Premiul Nobel 2003

- Clive Granger a primit Premiul Nobel în Economie (împreună cu Robert Engle)
- Contribuția: "metode pentru analiza seriilor de timp economice cu tendințe comune"



## Aplicații practice

### Finanțe

- Pairs Trading:** Tranzacționarea spread-ului între acțiuni cointegrate
- Structura la termen:** rate ale dobânzii pe termen scurt și lung
- Spot-Futures:** Prețurile spot și futures converg la maturitate

### Macroeconomie

- Consum și Venit:** Ipoteza venitului permanent
- Bani și Prețuri:** Teoria cantitativă a banilor
- PPP** (Purchasing Power Parity — Paritatea Puterii de Cumpărare): Cursuri valutare și niveluri de prețuri

### Analiza politicilor

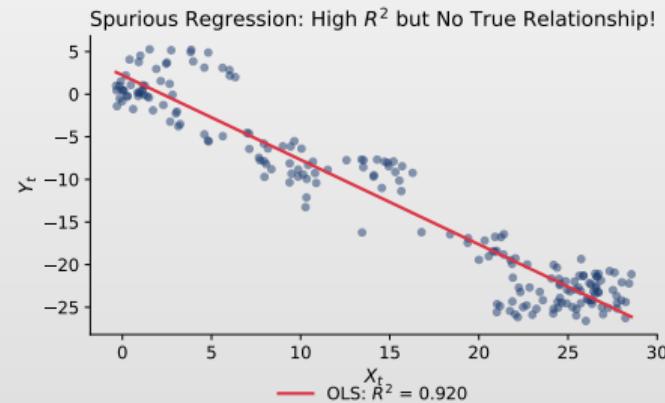
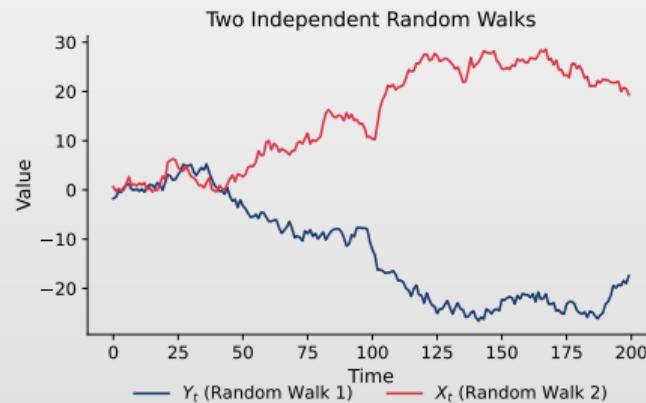
- Politica Fiscală:** Cheltuieli guvernamentale și venituri fiscale
- Politica Monetară:** Transmiterea ratelor dobânzii
- Piața Muncii:** Salarii și productivitate



## Regresia falsă: exemplu vizual

### Atenție

- **Rezultat:** Două mersuri aleatorii complet independente prezintă corelație ridicată ( $R^2 > 0.8$ ) doar din întâmplare
- De aceea avem nevoie de analiza cointegrării



## Problema regresiei false

Granger & Newbold (1974)

- **Configurare:** Regresarea unui mers aleatoriu pe un alt mers aleatoriu independent
  - ▶  $Y_t = \alpha + \beta X_t + u_t$ , unde  $Y_t$  și  $X_t$  sunt procese I(1) independente

Simptomele regresiei false

- **Coeficienti:**  $R^2$  ridicat (adesea  $> 0.9$ ) și statistici  $t$  semnificative
  - ▶ Chiar dacă variabilele sunt complet necorelate!
- **Diagnostic:** Statistica Durbin-Watson foarte mică ( $DW \approx 0$ )
  - ▶ Reziduurile sunt nestaționare (au rădăcină unitară)

Regulă practică (Granger)

- Dacă  $R^2 > DW$ , suspectați regresie falsă!



## Corelații false în lumea reală

### Explorarea datelor poate produce corelații fără sens

- Cu suficiente variabile și serii lungi de timp, apar tipare pur întâmplătoare
  
- Distanța dintre Neptun și Uranus ↔ Prețul acțiunilor SAP SE (2002–2023)
- Utilizarea porumbului OMG în South Dakota ↔ Căutări Google “i cant even” (2004–2023)
- Ratingurile serialului *Two and a Half Men* ↔ Combustibil pentru avioane în Serbia (2006–2015)
- Popularitatea meme-ului “It's Wednesday my dudes” ↔ Prețul acțiunilor Boeing (2006–2023)

### Lecție

- Corelație ridicată ≠ cauzalitate
- Seriile nestaționare cu tendințe comune produc  $R^2$  ridicat prin construcție
- Testați întotdeauna staționaritatea și cointegrarea înainte de a interpreta rezultatele regresiei

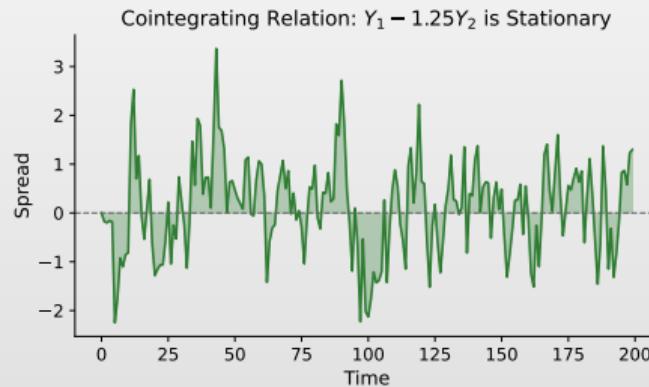
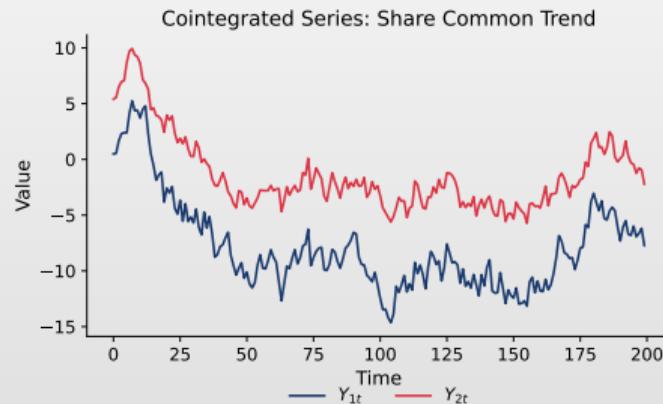
 Explorați mai multe exemple: [tylervigen.com/spurious-correlations](http://tylervigen.com/spurious-correlations)



## Cointegrarea: exemplu vizual

### De reținut

- **Cointegrare:** Ambele serii sunt  $I(1)$  și evoluează împreună
- Combinarea lor liniară (spread-ul) este staționară  $\rightarrow$  aceasta este cointegrarea!



Q TSA\_ch7\_cointegrated\_series



## Definiția cointegrării

### Definiție 1 (Cointegrare (Engle & Granger, 1987))

- **Definiție:** Variabilele  $Y_{1t}, \dots, Y_{kt}$  sunt **cointegrate de ordinul**  $(d, b)$ , notat  $CI(d, b)$ , dacă:
  1. Toate variabilele sunt integrate de ordinul  $d$ :  $Y_{it} \sim I(d)$
  2. Există o combinație liniară  $\beta'Y_t$  care este integrată de ordinul  $(d - b)$ , unde  $b > 0$

### Cazul cel mai comun: $CI(1, 1)$

- **Variabile:** Sunt  $I(1)$  (au rădăcini unitare)  $\succ$  combinația liniară este  $I(0)$
- **Vectorul de cointegrare:**  $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_k)'$   $\succ$  definește echilibrul pe termen lung

### Observație

- **Unicitate:** Vectorul de cointegrare este unic doar până la înmulțire scalară. Se normalizează:  
 $\beta_1 = 1$



## Intuiție: tendințe stochastice comune

### De ce apare cointegrarea?

- **Tendențe stochastice comune:** Variabilele cointegrate împart un trend comun
  - ▶  $Y_{1t} = \gamma_1 \tau_t + S_{1t}$ ,  $Y_{2t} = \gamma_2 \tau_t + S_{2t}$
  - ▶  $\tau_t$  este un mers aleatoriu comun și  $S_{it}$  sunt componente staționare

### Combinăția liniară elimină tendință

- $\gamma_2 Y_{1t} - \gamma_1 Y_{2t} = \gamma_2 S_{1t} - \gamma_1 S_{2t} \sim I(0)$

### Interpretare economică

- Cointegrarea reprezintă o **relație de echilibru pe termen lung**
  - ▶ Variabilele pot devia pe termen scurt
  - ▶ Dar sunt “trase înapoi” spre echilibru în timp
- Vectorul de cointegrare definește echilibrul



## Rangul de cointegrare

### Câte relații de cointegrare?

- Condiție:** Pentru  $k$  variabile  $I(1) \succ$  maximum  $r = k - 1$  relații de cointegrare
- Cazuri posibile:**
  - ▶  $r = 0$ : Nu există cointegrare (variabilele divergează)
  - ▶  $r = k$ : Toate variabilele sunt  $I(0)$  (contradicție)

### Exemplu: 3 variabile

- Rangul de cointegrare:**
  - ▶  $r = 0$ : Nu există cointegrare
  - ▶  $r = 1$ : O relație de cointegrare
  - ▶  $r = 2$ : Două relații de cointegrare (doar 1 tendință comună)

### Observație

- Relația:** Numărul de tendințe stochastice comune =  $k - r$



## Metoda în doi pași Engle-Granger

### Pasul 1: Estimarea regresiei de cointegrare

- Regresia OLS** (Ordinary Least Squares — Metoda Celor Mai Mici Pătrate):  $Y_t = \alpha + \beta X_t + e_t$
- Reziduuri:**  $\hat{e}_t = Y_t - \hat{\alpha} - \hat{\beta} X_t$

### Pasul 2: Testarea staționarității reziduurilor

- Testul ADF** (Augmented Dickey-Fuller):  $\Delta \hat{e}_t = \rho \hat{e}_{t-1} + \sum_{j=1}^p \gamma_j \Delta \hat{e}_{t-j} + v_t$
- Ipoteze:**
  - ▶  $H_0: \rho = 0$  (rădăcină unitară  $\succ$  nu există cointegrare)
  - ▶  $H_1: \rho < 0$  (staționare  $\succ$  există cointegrare)

### Important

- Folosiți **valorile critice Engle-Granger**, nu cele ADF standard! (mai negative deoarece reziduurile sunt estimate)



## Valorile critice Engle-Granger

### Valori critice pentru testul de cointegrare

Număr de Variabile	1%	5%	10%
2	-3.90	-3.34	-3.04
3	-4.29	-3.74	-3.45
4	-4.64	-4.10	-3.81
5	-4.96	-4.42	-4.13

- Sursa: Bazat pe estimările MacKinnon (1991),  $T = 100$

### Limitările metodei Engle-Granger

- Un singur vector:** Testează doar pentru o singură relație de cointegrare
  - ▶ Rezultatele depind de variabila aleasă ca dependentă
- Eșantioane mici:** Bias pentru vectorul de cointegrare estimat
  - ▶ Nu se pot testa ipoteze asupra vectorului de cointegrare



## Portret de cercetător: Søren Johansen



\*1939

W Wikipedia

### Biografie

- Statistician și econometrist danez, Profesor Emerit la Universitatea din Copenhaga
- Cunoscut pentru abordarea matematică riguroasă a econometriei
- Membru al Econometric Society; numeroase distincții în știința statistică

### Contribuții principale

- **Testul de cointegrare Johansen** (1988, 1991) — maxima verosimilitate pentru vectori multipli de cointegrare
- **Statisticile trace și eigenvalue maxim** pentru rangul de cointegrare
- **Estimarea VECM** — legătura între cointegrare și modele cu corecție a erorilor
- Cadrul standard pentru analiza multivariată a cointegrării

## Testul de cointegrare Johansen

### Avantaje față de Engle-Granger

- Vectori multipli:** Testează pentru multiple relații de cointegrare
  - ▶ Permite testarea restricțiilor asupra vectorilor de cointegrare
- Estimare MLE** (Maximum Likelihood Estimation — Estimare prin Maxima Verosimilitate): Mai eficientă
  - ▶ Nu necesită alegerea unei variabile dependente

### Punct de plecare: VAR (Vector Autoregression) în niveluri

- $Y_t = c + A_1 Y_{t-1} + A_2 Y_{t-2} + \dots + A_p Y_{t-p} + \varepsilon_t$

### Următorul pas

- Transformare:** Rescriem în forma VECM



## Derivare: De la VAR la VECM

Punct de plecare: VAR( $p$ ) în niveluri

- $Y_t = A_1 Y_{t-1} + A_2 Y_{t-2} + \cdots + A_p Y_{t-p} + \varepsilon_t$

Pasul 1: Scădem  $Y_{t-1}$  din ambii membri

- Transformare:**

- $$Y_t - Y_{t-1} = A_1 Y_{t-1} + A_2 Y_{t-2} + \cdots + A_p Y_{t-p} - Y_{t-1} + \varepsilon_t$$
- $$\Delta Y_t = (A_1 - I) Y_{t-1} + A_2 Y_{t-2} + \cdots + A_p Y_{t-p} + \varepsilon_t$$

Obiectiv

- Rescriem astfel încât toți termenii să fie fie în **niveluri** ( $Y_{t-1}$ ), fie în **diferențe** ( $\Delta Y_{t-j}$ )



## Derivare: De la VAR la VECM (cont.)

### Pasul 2: Adunăm și scădem termeni strategic

- **Manipulare:** Adunăm și scădem  $A_2 Y_{t-1}$
- **Rezultat:**  $\Delta Y_t = (A_1 + A_2 - I)Y_{t-1} - A_2 \Delta Y_{t-1} + A_3 Y_{t-3} + \dots + \varepsilon_t$
- **Procedură:** Continuăm cu  $A_3 Y_{t-1}$ , etc.

### Pasul 3: Forma generală VECM

- **Rezultat:**  $\Delta Y_t = \Pi Y_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_j \Delta Y_{t-j} + \varepsilon_t$

### Matricele principale

- **Impact termen lung:**

$$\Pi = \sum_{i=1}^p A_i - I$$

- **Dinamică termen scurt:**

$$\Gamma_j = - \sum_{i=j+1}^p A_i, \quad j = 1, \dots, p-1$$



## Derivare: Verificare cu VAR(2)

### Exemplu: VAR(2)

- **Punct de plecare:**  $Y_t = A_1 Y_{t-1} + A_2 Y_{t-2} + \varepsilon_t$ 
  - ▶ Scădem  $Y_{t-1}$ :  $\Delta Y_t = (A_1 - I)Y_{t-1} + A_2 Y_{t-2} + \varepsilon_t$
  - ▶ Adunăm și scădem  $A_2 Y_{t-1}$ :  $\Delta Y_t = (A_1 + A_2 - I)Y_{t-1} + A_2(Y_{t-2} - Y_{t-1}) + \varepsilon_t$
- **Rezultat VECM:**
  - ▶  $\Delta Y_t = \underbrace{(A_1 + A_2 - I)}_{\Pi} Y_{t-1} - \underbrace{A_2}_{\Gamma_1} \Delta Y_{t-1} + \varepsilon_t$

### Verificare

- **VAR(2):**  $\Pi = A_1 + A_2 - I$  și  $\Gamma_1 = -A_2$ 
  - ▶ Folosind formula:  $\Gamma_1 = -\sum_{i=2}^2 A_i = -A_2$  ✓



## Reprezentarea VECM

### Modelul vectorial de corecție a erorilor

- **Ecuăția VECM:**
  - ▶  $\Delta Y_t = c + \Pi Y_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_j \Delta Y_{t-j} + \varepsilon_t$
- **Componente:**
  - ▶  $\Pi = A_1 + A_2 + \dots + A_p - I$  (matricea impactului pe termen lung)
  - ▶  $\Gamma_j = -(A_{j+1} + \dots + A_p)$  (dinamica pe termen scurt)

### Observație: Rangul lui $\Pi$

- **Rangul lui  $\Pi$  determină cointegrarea:**
  - ▶  $\text{rank}(\Pi) = 0$ : Nu există cointegrare (VAR în diferențe)
  - ▶  $\text{rank}(\Pi) = k$ : Toate variabilele sunt  $I(0)$  (VAR în niveluri)
  - ▶  $0 < \text{rank}(\Pi) = r < k$ : Cointegrare cu  $r$  vectori de cointegrare



## Descompunerea lui $\Pi$

Când  $\text{rank}(\Pi) = r < k$

- **Descompunere:**  $\Pi = \alpha\beta'$ 
  - ▶  $\beta$ : matricea  $k \times r$  a vectorilor de cointegrare
  - ▶  $\alpha$ : matricea  $k \times r$  a coeficientilor de ajustare

## Interpretare

- **Termenul de corecție:**  $\beta'Y_{t-1}$  = deviații de la echilibrul pe termen lung
- **Viteza de ajustare:**  $\alpha$  = cât de repede se revine la echilibru

## Formula VECM

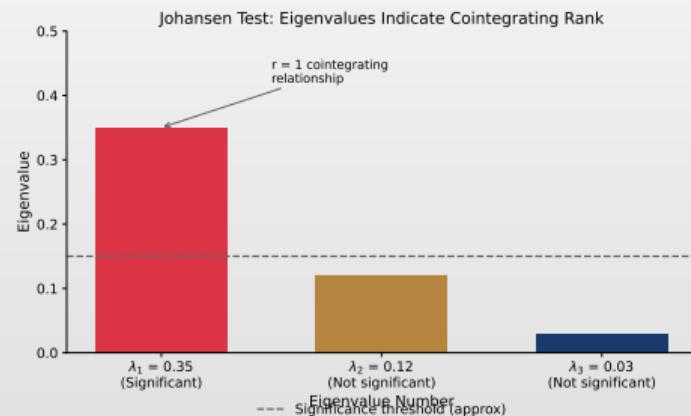
- **Ecuația:**  $\Delta Y_t = c + \alpha(\beta'Y_{t-1}) + \sum_{j=1}^{p-1} \Gamma_j \Delta Y_{t-j} + \varepsilon_t$



## Testul Johansen: interpretare vizuală

### Interpretare

- **Valorile proprii:** Cele semnificative (peste pragul critic) indică relații de cointegrare
- În acest exemplu, doar prima valoare proprie este semnificativă, sugerând  $r = 1$



Q TSA\_ch7\_johansen\_eigenvalues



## Statisticile testului Johansen

### Două statistici de Test

- **Bază:** Valorile proprii  $\hat{\lambda}_1 > \hat{\lambda}_2 > \dots > \hat{\lambda}_k$  ale unei anumite matrici
- **Testul Trace:** Testează  $H_0: \text{rang} \leq r$  vs  $H_1: \text{rang} > r$ 
  - ▶  $\lambda_{\text{trace}}(r) = -T \sum_{i=r+1}^k \ln(1 - \hat{\lambda}_i)$
- **Testul Valorii Proprii Maxime:** Testează  $H_0: \text{rang} = r$  vs  $H_1: \text{rang} = r + 1$ 
  - ▶  $\lambda_{\max}(r, r+1) = -T \ln(1 - \hat{\lambda}_{r+1})$

### Observație

- **Valori critice:** Din Johansen & Juselius (1990)
- Depind de numărul de variabile  $k$  și componente deterministe (constante, trend)



## Procedura de testare

### Testare secvențială (testul Trace)

1. Testați  $H_0: r = 0$  vs  $H_1: r > 0$ 
  - ▶ Dacă nu se respinge: Nu există cointegrare. Stop.
  - ▶ Dacă se respinge: Cel puțin un vector de cointegrare. Continuăm.
2. Testați  $H_0: r \leq 1$  vs  $H_1: r > 1$ 
  - ▶ Dacă nu se respinge:  $r = 1$ . Stop.
  - ▶ Dacă se respinge: Cel puțin doi vectori de cointegrare. Continuăm.
3. Continuăm până când  $H_0$  nu se respinge...

### Componentele deterministe

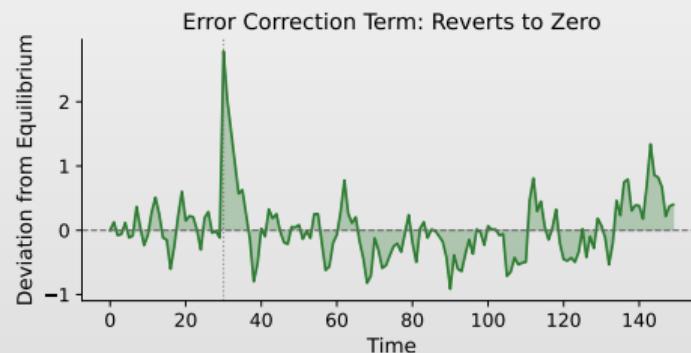
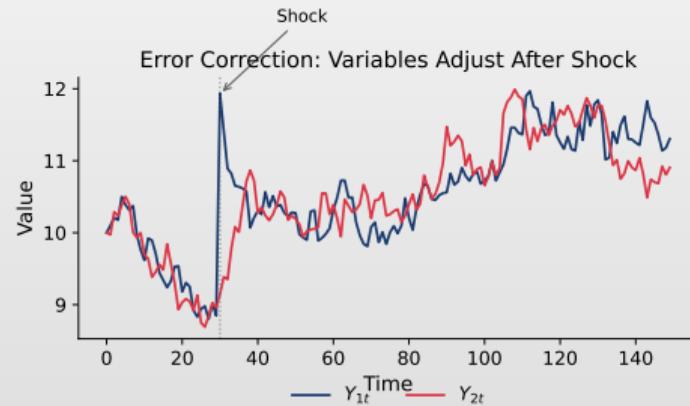
- Alegere:** Specificația trebuie aleasă cu atenție
- ▶ Fără constantă, fără trend (rar utilizat)
  - ▶ Constantă doar în relația de cointegrare
  - ▶ Constantă în ambele (cel mai comun)
  - ▶ Constantă + trend în relația de cointegrare
  - ▶ Constantă + trend în ambele



## Mecanismul de corecție a erorilor: vizualizare

### Interpretare

- Corecția erorilor: Când seriile deviază de la echilibru (zonele umbrite), mecanismul de ajustare le trage înapoi
- Deviațiile pozitive duc la ajustare în jos, deviațiile negative duc la ajustare în sus



## Structura VECM

### Specificația completă VECM

- Pentru  $k = 2$  variabile cu  $r = 1$  relație de cointegrare:

$$\Delta Y_{1t} = c_1 + \alpha_1(Y_{1,t-1} - \beta Y_{2,t-1}) + \gamma_{11}\Delta Y_{1,t-1} + \gamma_{12}\Delta Y_{2,t-1} + \varepsilon_{1t}$$

$$\Delta Y_{2t} = c_2 + \alpha_2(Y_{1,t-1} - \beta Y_{2,t-1}) + \gamma_{21}\Delta Y_{1,t-1} + \gamma_{22}\Delta Y_{2,t-1} + \varepsilon_{2t}$$

### Componente

- **Corectia erorilor:**  $(Y_{1,t-1} - \beta Y_{2,t-1})$  = deviație de la echilibrul
- ▶  $\alpha_1, \alpha_2$  = viteze de ajustare (ar trebui să aibă semne opuse)
- **Dinamica pe termen scurt:**  $\gamma_{ij}$  = coeficienți lag-uri diferențiate
- ▶  $\varepsilon_{it}$  = inovații



## Interpretarea coeficienților de ajustare

### Coeficienții $\alpha$

- Relația de echilibru:**  $Y_1 - \beta Y_2 = 0$ 
  - ▶  $\alpha_1 < 0$ :  $Y_1$  se ajustează în jos când este deasupra echilibrului
  - ▶  $\alpha_2 > 0$ :  $Y_2$  se ajustează în sus când  $Y_1$  este deasupra echilibrului

### Exogenitate slabă

- Dacă  $\alpha_i = 0$ , variabila  $Y_i$  nu răspunde la dezechilibru
  - ▶  $Y_i$  este **slab exogenă** pentru parametrii pe termen lung
  - ▶ Cealaltă variabilă face toată ajustarea
- Poate simplifica estimarea (abordare cu o singură ecuație)

### Testare

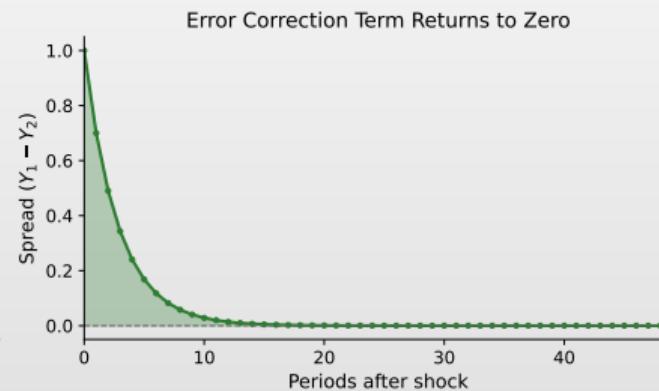
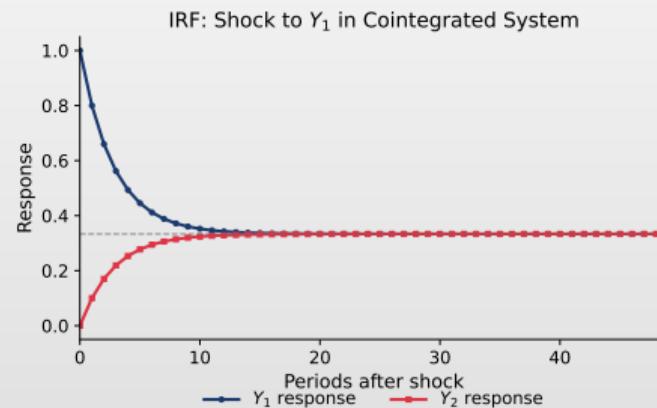
- Exogenitate slabă:**  $H_0 : \alpha_i = 0$  folosind testul raportului de verosimilitate



## Functiile IRF (Impulse Response Functions) ale VECM

### Interpretare

- Efecte permanente:** Într-un sistem cointegrat, şocurile au efecte permanente asupra nivelurilor
- Sistemul revine la echilibrul  $\succ$  converg către o nouă valoare pe termen lung



## VECM vs VAR în diferențe

### Când variabilele sunt cointegrate

	VAR în Diferențe	VECM
Info pe termen lung	Pierdută	Păstrată
Dinamică pe termen scurt	Da	Da
Corecție a erorilor	Nu	Da
Prognoză	Slabă (termen lung)	Mai bună
Interpretare IRF	Doar termen scurt	Ambele

### Teorema reprezentării Granger

- Implicație:** Dacă variabilele sunt cointegrate, trebuie să existe o reprezentare de corecție a erorilor
- Ignorarea cointegrării = specificare greșită a modelului!



## Flux de lucru practic

### Procedură pas cu pas

1. **Teste de Rădăcină Unitară:** Verificați că toate variabilele sunt  $I(1)$ 
  - ▶ ADF, KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin) pe niveluri și prime diferențe
2. **Selectarea numărului de lag-uri:** alegeti  $p$  pentru VAR în niveluri
  - ▶ Folosiți AIC (Akaike), BIC (Bayesian Information Criterion) sau teste LR (Likelihood Ratio) secvențiale
3. **Testul de Cointegrare:** Teste trace/valoare proprie maximă Johansen
  - ▶ Determinați rangul de cointegrare  $r$
4. **Estimați VECM:** Dacă  $0 < r < k$ 
  - ▶ Estimați  $\alpha, \beta, \Gamma_j$
5. **Diagnostică:** Verificați reziduurile pentru autocorelație, normalitate
6. **Analiză:** IRF, FEVD (Forecast Error Variance Decomposition), teste de ipoteze



## Capcane frecvente

### Lucruri de care trebuie să fiți atenți

- Rupturi structurale:** Pot cauza rădăcini unitare sau cointegrare false
- Procese aproape de rădăcină unitară:** Testele au putere scăzută
- Selectarea lag-urilor:**
  - ▶ **Prea multe lag-uri:** Supraparametrizare, pierdere de eficiență
  - ▶ **Prea puține lag-uri:** Autocorelație reziduală, estimări distorsionate
- Specificație deterministă greșită:** Afectează valorile critice
- Eșantioane mici:** Testul Johansen supradimensionat în eșantioane mici

### Recomandare

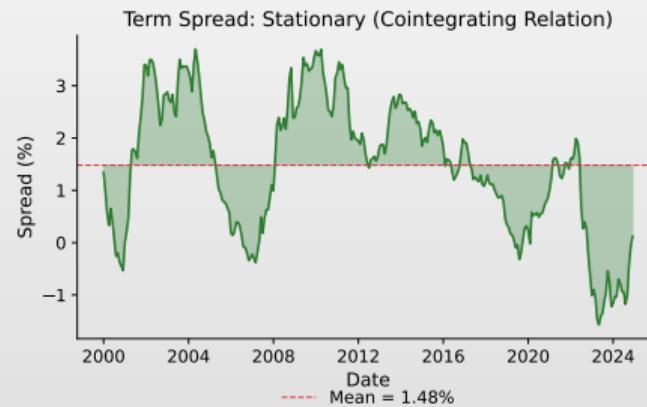
- Verificați întotdeauna:**
  - ▶ Diagnosticele reziduale (testul Portmanteau, normalitatea)
  - ▶ Stabilitatea relației de cointegrare estimate în timp
  - ▶ Sensibilitatea la lungimea lag-urilor și specificația deterministă



## Exemplu 1: structura la termen a ratelor dobânzii

### Ipoteza aşteptărilor

- Concluzie: Ratele pe termen scurt și lung împart o tendință comună
- Spread-ul (prima de termen) este staționar > doavadă de cointegrare!



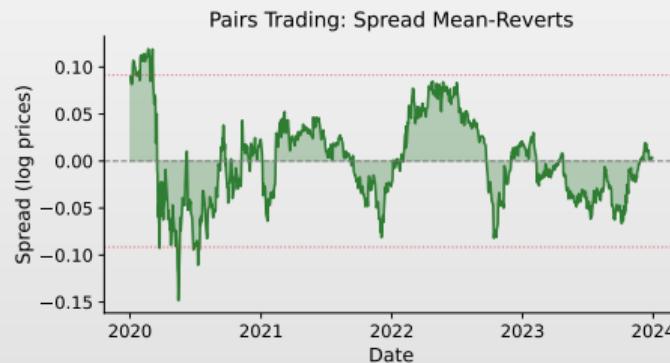
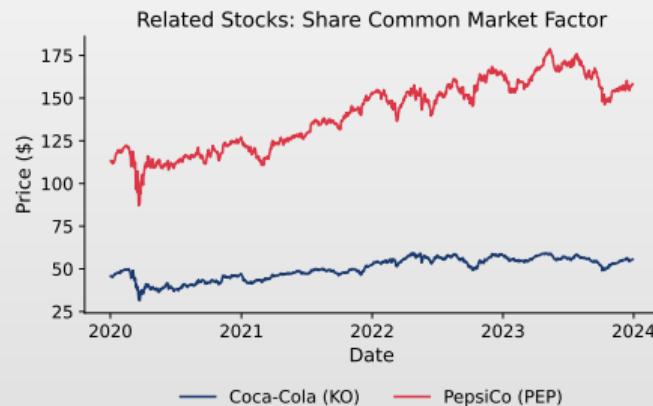
Q TSA\_ch7\_interest\_rates\_coint



## Exemplu 2: pairs trading în finanțe

### Strategie

- **Pairs trading:** Găsiți perechi de acțiuni cointegrate (ex., Coca-Cola & Pepsi)
- Când spread-ul deviază de la medie, tranzacționați așteptând revenirea la medie



Q TSA\_ch7\_pairs\_trading



## Ratele dobânzii: teoria economică

### Ipoteza aşteptărilor în structura la termen

- **Formula:** Rata pe termen lung ca medie a ratelor viitoare așteptate
  - ▶  $R_t^{(n)} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} E_t[r_{t+i}] + \text{prima de termen}$
- **Implicație:** Dacă prima de termen este constantă,  $r_t$  și  $R_t$  sunt cointegrate
  - ▶ Vectorul de cointegrare:  $(1, -1)$

### Rezultate empirice

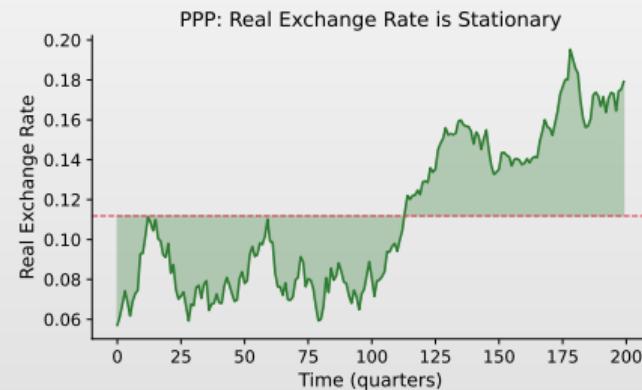
- **Teste de rădăcină unitară:** Ambele rate sunt  $I(1)$ 
  - ▶ O relație de cointegrare (testul Johansen)
- **Vectorul de cointegrare:**  $\approx (1, -1)$ , spread-ul este staționar
  - ▶ Rata pe termen scurt se ajustează la dezechilibru (rata pe termen lung este slab exogenă)



## Exemplu 3: paritatea puterii de cumpărare (PPP)

### Teoria PPP

- **Formula:**  $e_t = p_t - p_t^*$  (cursul de schimb logaritmic = diferențialul de preț)
- Cursul de schimb real ar trebui să fie staționar pe termen lung



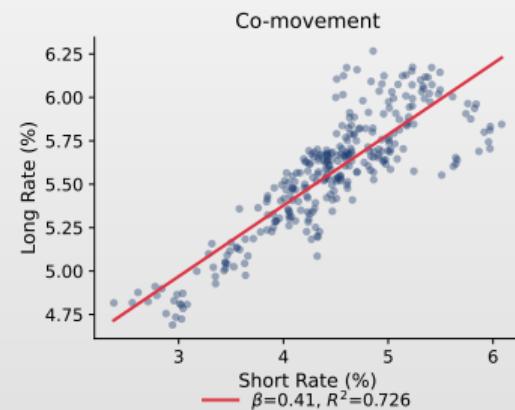
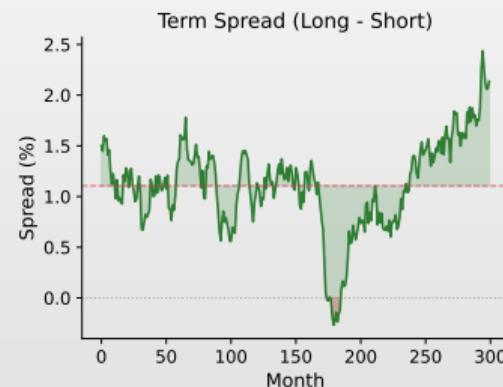
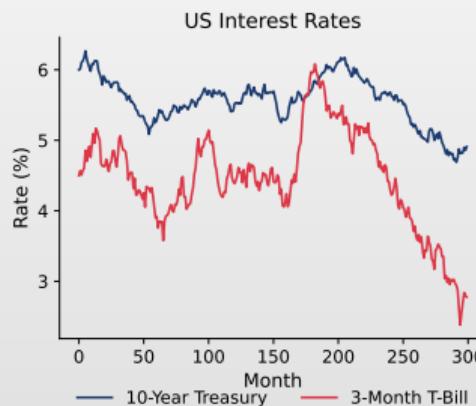
Q TSA\_ch7\_ppp\_cointegration



## Studiu de caz: Cointegrarea ratelor dobânzii

### Date

- Rate dobândă SUA: Pe termen lung (10 ani) și scurt (3 luni)
- Observație: Ambele serii sunt  $I(1)$ , dar spread-ul pare staționar



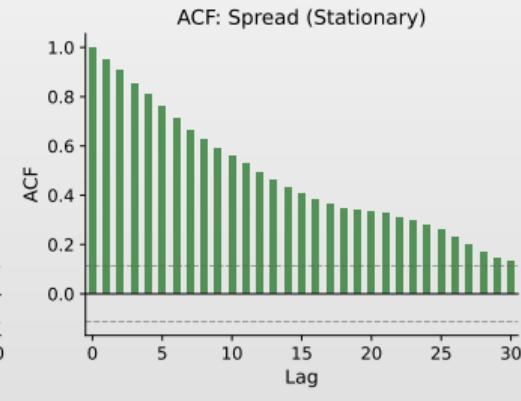
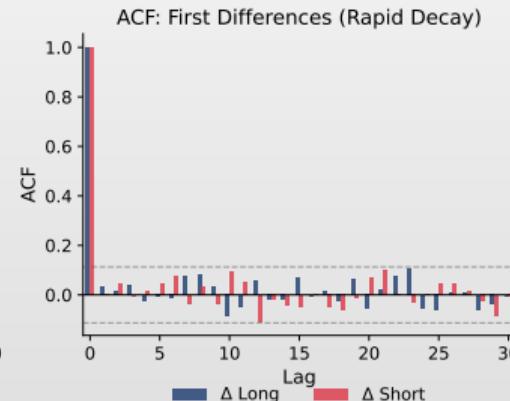
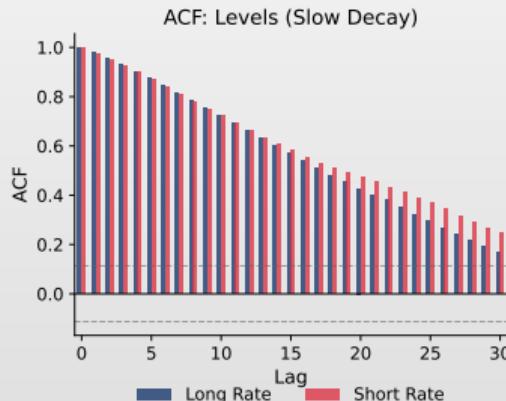
Q TSA\_ch7\_case\_raw\_data



## Pasul 1: Teste de rădăcină unitară

### Rezultate

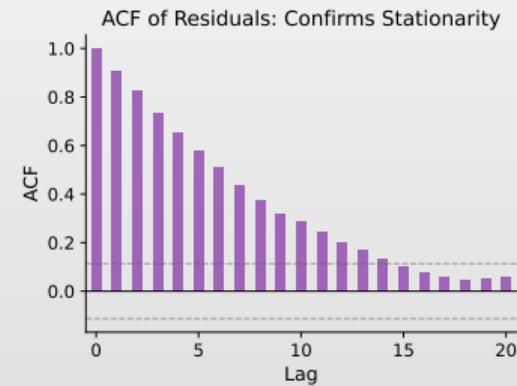
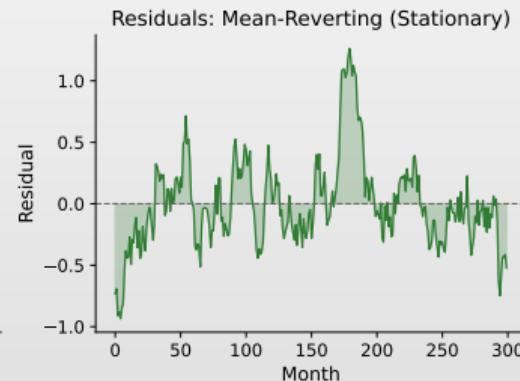
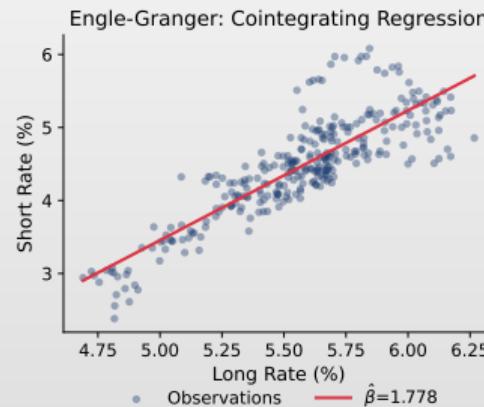
- ACF (Autocorrelation Function) niveluri: Descreștere lentă  $\succ$  nestaționaritate; după diferențiere: scădere rapidă  $\succ$  I(1)
- ACF spread: Staționar  $\succ$  posibilă cointegrare!



## Pasul 2: Testul Engle-Granger de cointegrare

### Rezultate

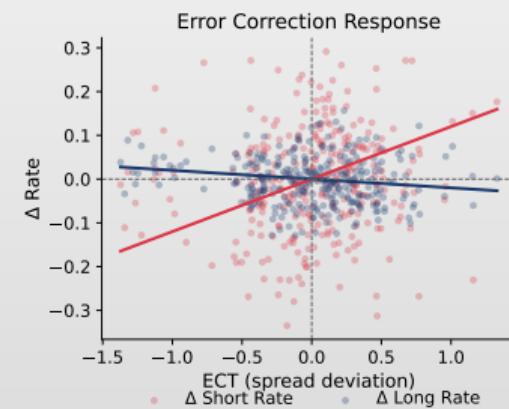
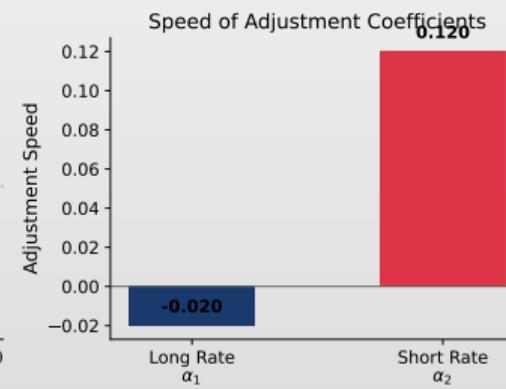
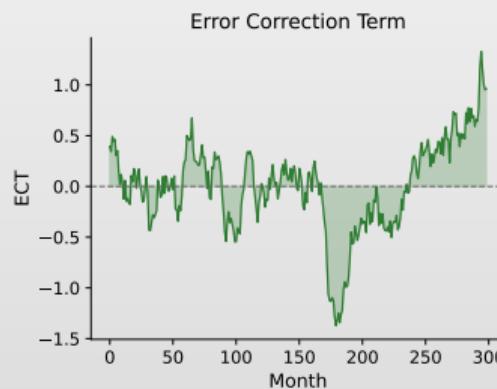
- Regresie: Rata pe termen scurt =  $\alpha + \beta \times$  Rata pe termen lung +  $\varepsilon_t$
- Concluzie: Seriile sunt cointegrate
- Există relație de echilibru pe termen lung



## Pasul 3: Estimare VECM

### Model și ecuații stilizate

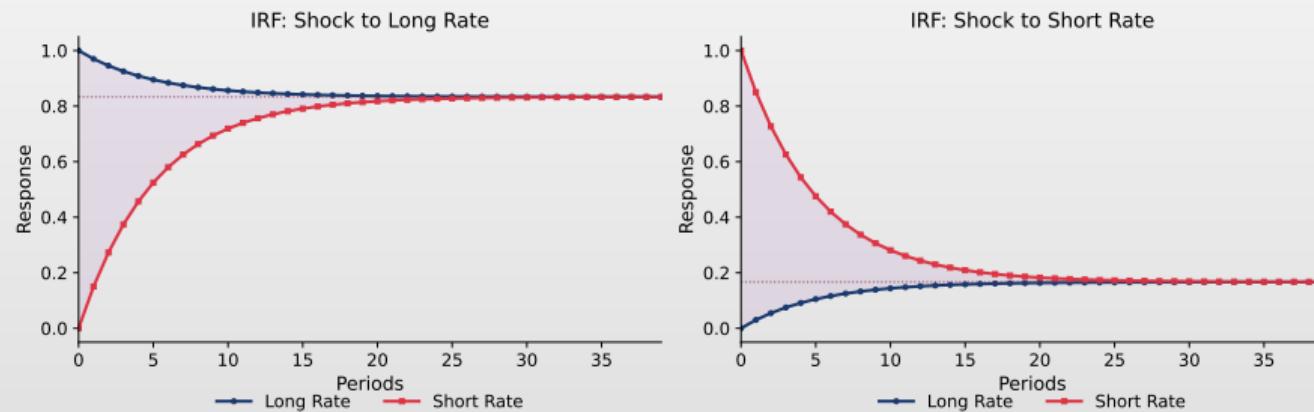
- **VECM(2)**: Rang de cointegrare = 1, vector  $\approx (1, -1)$
- $\Delta r_t = 0.02 - 0.15(r_{t-1} - R_{t-1}) + \text{lag-uri} + \varepsilon_{1t}$
- $\Delta R_t = 0.01 - 0.02(r_{t-1} - R_{t-1}) + \text{lag-uri} + \varepsilon_{2t}$
- **Interpretare**: Rata pe termen scurt se ajustează rapid ( $\alpha_1 = -0.15$ )
- Rata pe termen lung aproape slab exogenă ( $\alpha_2 \approx 0$ )



## Pasul 4: Funcții de răspuns la impuls

### Interpretare

- Efecte permanente:** řocuri în rata pe termen lung afectează persistent ambele rate
- Cointegrare:** Efectele nu converg la zero  $\rightarrow$  caracteristică a seriilor cointegrate



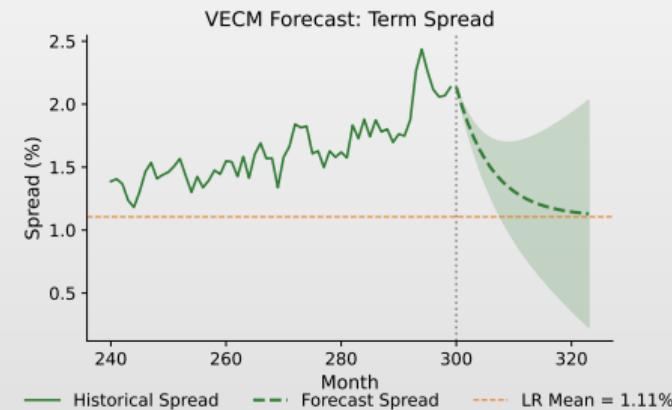
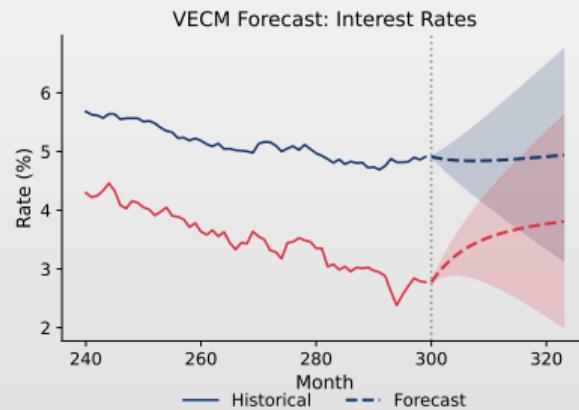
Q TSA\_ch7\_case\_irf



## Pasul 5: Prognoza VECM

### Prognoză

- Orizont:** 24 de luni pentru ambele rate simultan
- Avantaj:** VECM menține relația de cointegrare în prognoză



Q TSA\_ch7\_case\_forecast



## Exercițiu AI: Gândire critică

Prompt de testat în ChatGPT / Claude / Copilot

"Folosind yfinance, descarcă prețurile zilnice de închidere ale aurului (GC=F) și argintului (SI=F) din 2019-01-01 până în 2024-12-31 (aprox. 1.500 observații). Testează dacă fiecare serie este I(1), testează cointegrarea cu Engle-Granger și Johansen, și estimează un model VECM. Analizează parametrii de viteză de ajustare. Vreau cod Python complet."

**Exercițiu:**

1. Rulați prompt-ul într-un LLM (Large Language Model) la alegere și analizați critic răspunsul.
2. Verifică dacă fiecare serie este I(1) înainte de a testa cointegrarea?
3. Folosește atât Engle-Granger cât și Johansen? Care sunt avantajele fiecărui?
4. Cum determină rangul de cointegrare? Statistica Trace vs max-eigenvalue?
5. Interpretează corect coeficienții  $\alpha$  (de ajustare)?

- Atenție:** Codul generat de AI poate rula fără erori și arăta profesional
- Asta nu înseamnă că e corect*



## Concluzii principale

### Concepte principale

- Cointegrare:** Variabile  $I(1)$  cu combinație liniară staționară (trend stochastic comun)
- Regresie falsă:**  $R^2$  ridicat cu variabile  $I(1)$  necorelate
- Corecție a erorilor:** VECM  $\succ$  VAR cu termeni de corecție pentru sisteme cointegrate

### Metode de testare

- Engle-Granger:** Simplu, doi pași, un singur vector de cointegrare
- Johansen:** Vectori multipli, bazat pe MLE (teste trace + max-eigen)

### De reținut

- Putere scăzută:** Testele au putere scăzută în eșantioane mici
- Teorie:** Teoria economică ar trebui să ghideze specificația
- Validare:** Verificați întotdeauna validitatea modelului!



## Ce urmează?

### Extensiile și subiecte conexe

- VECM Structural:** Identificarea șocurilor structurale
- Cointegrare cu prag:** Ajustare neliniară
- Cointegrare de panel:** Secțiuni transversale multiple
- Cointegrare fracționară:** Memorie lungă
- Cointegrare variabilă în timp:** Schimbări de regim

- 
- Întrebări?**



## Formule principale – Rezumat

### Cointegrare

- Definiție:  $Y_t - \beta X_t = u_t \sim I(0)$
- Interpretare: Echilibru pe termen lung

### Test Engle-Granger

- Pas 1:  $Y_t = \alpha + \beta X_t + u_t$
- Pas 2: Test ADF pe  $\hat{u}_t$
- Notă: Valori critice speciale

### Rang de cointegrare

- Rangul  $r$ :  $0 \leq r \leq K - 1$  relații

### Model VECM

- Ecuatie:  $\Delta Y_t = \Pi Y_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i \Delta Y_{t-i} + \varepsilon_t$
- Factorizare:  $\Pi = \alpha \beta'$

### Interpretare $\alpha$ și $\beta$

- $\beta$ : Vectori de cointegrare
- $\alpha$ : Viteza de ajustare

### Test Johansen

- Trace:  $\lambda_{trace} = -T \sum_{i=r+1}^K \ln(1 - \hat{\lambda}_i)$
- Max-Eigen:  $\lambda_{max} = -T \ln(1 - \hat{\lambda}_{r+1})$



## Întrebarea 1

### Întrebare

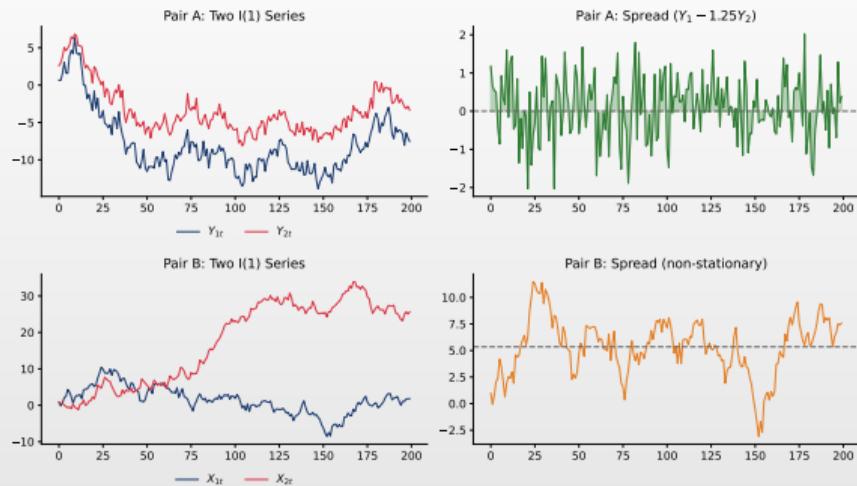
Analizați cele două perechi de serii I(1) de mai jos. Care pereche este cointegrată?

### Variante de răspuns

- (A)** Perechea A, deoarece seriile au aceeași tendință
- (B)** Perechea B, deoarece seriile sunt necorelate
- (C)** Perechea A, deoarece spread-ul lor este staționar
- (D)** Ambele perechi sunt cointegrate



## Întrebarea 1: Răspuns



Răspuns: (C)

- Cointegrare = combinație liniară staționară, nu doar corelație
- Spread-ul perechii B nu este staționar  $\rightarrow$  nu sunt cointegrate



## Întrebarea 2

### Întrebare

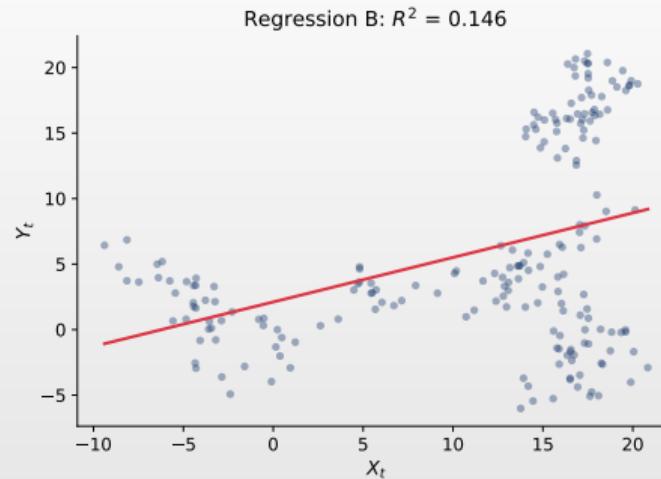
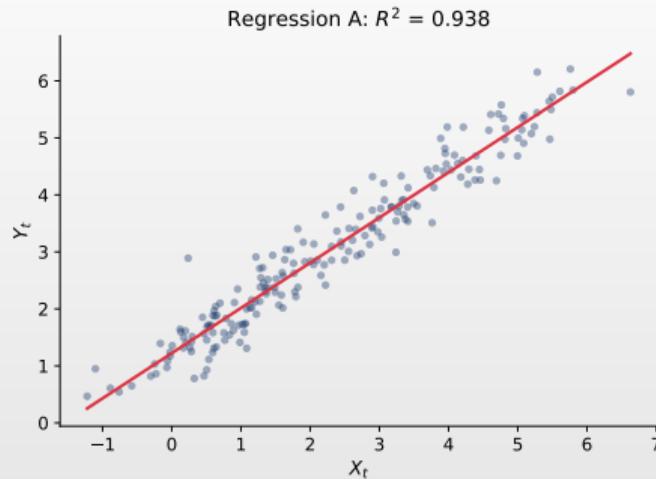
- Ambele regresii de mai jos au  $R^2$  ridicat. Cum puteți distinge o regresie falsă de una genuină?

### Variante de răspuns

- (A) Nu se poate distinge – ambele au  $R^2$  ridicat
- (B) Testând staționaritatea reziduurilor: reziduuri staționare = cointegrare genuină
- (C) Verificând semnificația coeficientului  $\beta$
- (D) Comparând valorile lui  $R^2$ : mai mare = relație mai reală



## Întrebarea 2: Răspuns



Răspuns: (B)

- Testul Engle-Granger: dacă reziduurile OLS sunt staționare (ADF), relația este genuină
- $R^2$  ridicat NU implică relație reală între variabile  $I(1)$ !



## Întrebarea 3

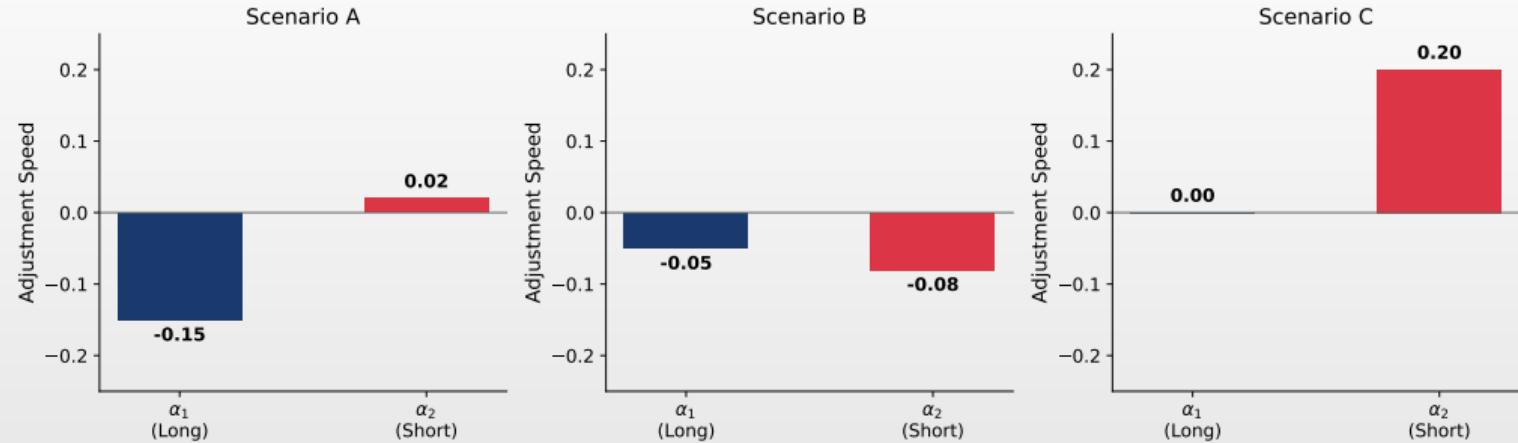
### Întrebare

- În care scenariu rata pe termen lung este slab exogenă (nu se ajustează la dezechilibrul)?

### Variante de răspuns

- (A) Scenariul A:  $\alpha_1 = -0.15, \alpha_2 = 0.02$
- (B) Scenariul B:  $\alpha_1 = -0.05, \alpha_2 = -0.08$
- (C) Scenariul C:  $\alpha_1 = 0.00, \alpha_2 = 0.20$
- (D) Niciun scenariu – ambele variabile trebuie să se ajusteze

### Întrebarea 3: Răspuns



Răspuns: (C)

- $\alpha_1 = 0$ : rata pe termen lung nu răspunde la dezechilibrul slab exogenă
- Toată ajustarea este făcută de rata pe termen scurt ( $\alpha_2 = 0.20$ )



## Întrebarea 4

### Întrebare

Având rezultatele testului Johansen Trace pentru  $K = 3$  variabile, care este rangul de cointegrare?

### Variante de răspuns

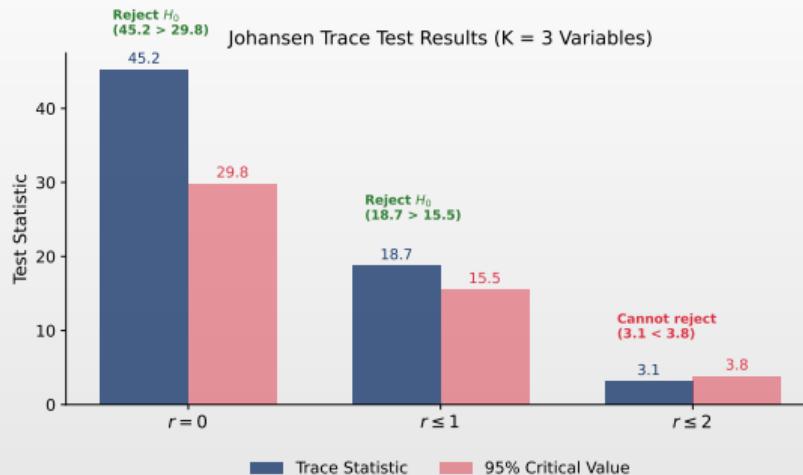
(A)  $r = 0$  (nicio relație de cointegrare)

(B)  $r = 1$  (o relație de cointegrare)

(C)  $r = 2$  (două relații de cointegrare)

(D)  $r = 3$  (sistem complet staționar)

## Întrebarea 4: Răspuns



Răspuns: (C)

- Respingem  $H_0 : r = 0$  ( $45.2 > 29.8$ ) și  $H_0 : r \leq 1$  ( $18.7 > 15.5$ )
- Nu respingem  $H_0 : r \leq 2$  ( $3.1 < 3.8$ )  $\succ$  rangul este  $r = 2$



## Întrebarea 5

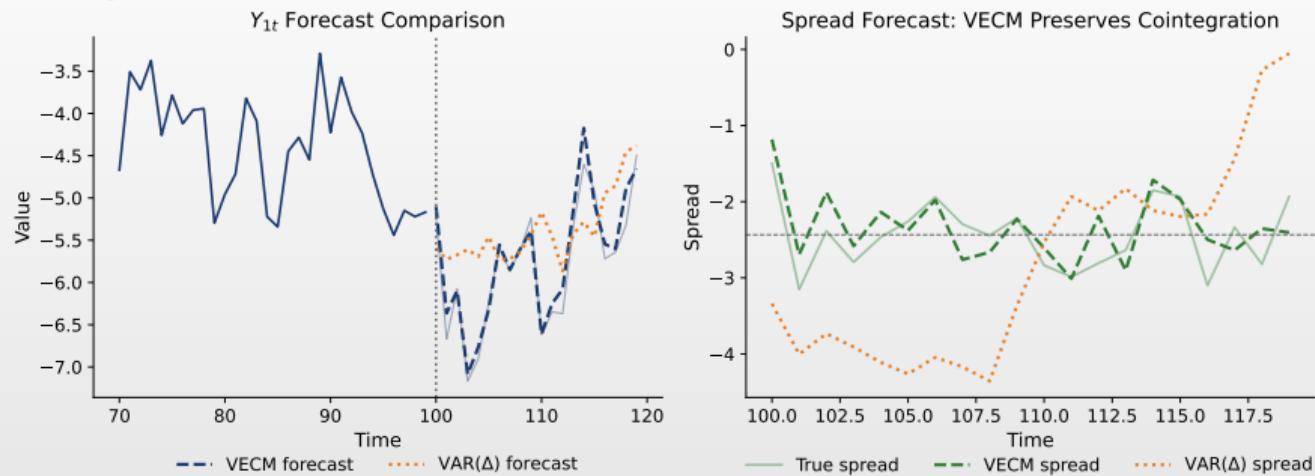
### Întrebare

- Care este avantajul principal al VECM față de VAR în diferențe pentru prognoză?

### Variante de răspuns

- (A)** VECM are mai puțini parametri de estimat
- (B)** VECM menține relația de cointegrare în progrone pe termen lung
- (C)** VAR în diferențe nu poate produce progrone
- (D)** Nu există avantaj – ambele sunt echivalente

## Întrebarea 5: Răspuns



Răspuns: (B)

- VAR(Δ) pierde relația de nivel  $\succ$  spread-ul diverge
- VECM încorporează echilibrul pe termen lung  $\succ$  prognoza rămâne coerentă



## Bibliografie I

### Lucrări fundamentale cointegrare

- Engle, R.F., & Granger, C.W.J. (1987). Co-Integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing, *Econometrica*, 55(2), 251–276.
- Johansen, S. (1988). Statistical Analysis of Cointegration Vectors, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 12(2-3), 231–254.
- Johansen, S. (1991). Estimation and Hypothesis Testing of Cointegration Vectors in Gaussian Vector Autoregressive Models, *Econometrica*, 59(6), 1551–1580.

### Manuale VECM și cointegrare

- Juselius, K. (2006). *The Cointegrated VAR Model: Methodology and Applications*, Oxford University Press.
- Lütkepohl, H. (2005). *New Introduction to Multiple Time Series Analysis*, Springer.



## Bibliografie II

### Teste și aplicații

- Phillips, P.C.B., & Ouliaris, S. (1990). Asymptotic Properties of Residual Based Tests for Cointegration, *Econometrica*, 58(1), 165–193.
- Hamilton, J.D. (1994). *Time Series Analysis*, Princeton University Press.
- Banerjee, A., Dolado, J.J., Galbraith, J.W., & Hendry, D.F. (1993). *Co-Integration, Error-Correction, and the Econometric Analysis of Non-Stationary Data*, Oxford University Press.

### Resurse online și cod

- **Quantlet:** <https://quantlet.com> ➔ Platformă de cod pentru metode cantitative
- **Quantinar:** <https://quantinar.com> ➔ Platformă de învățare pentru metode cantitative
- **GitHub TSA:** [https://github.com/QuantLet/TSA/tree/main/TSA\\_ch7](https://github.com/QuantLet/TSA/tree/main/TSA_ch7) ➔ Cod Python pentru acest capitol



# Vă Mulțumim!

## Întrebări?

Materialele cursului sunt disponibile la: <https://danpele.github.io/Time-Series-Analysis/>

