

# Stratonovicheve stohastičke diferencijalne jednadžbe

---

Majdenić, Jelena

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, School of Applied Mathematics and Informatics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet primijenjene matematike i informatike**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:126:938138>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-31**



**mathos**

Repository / Repozitorij:

[Repository of School of Applied Mathematics and Informatics](#)



Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku  
Fakultet primijenjene matematike i informatike  
Sveučilišni diplomski studij matematike  
Smjer: Financijka matematika i statistika

**Jelena Majdenić**

# **Stratonovicheve stohastičke diferencijalne jednačbe**

Diplomski rad

Osijek, 2023.

Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku  
Fakultet primijenjene matematike i informatike  
Sveučilišni diplomski studij matematike  
Smjer: Financijska matematika i statistika

**Jelena Majdenić**

# **Stratonovicheve stohastičke diferencijalne jednađbe**

Diplomski rad

Mentor: izv. prof. dr. sc. Nenad Šuvak

Osijek, 2023.

# Sadržaj

1	Uvod	1
2	Brownovo gibanje	2
3	Itôv stohastički integral	5
4	Stratonovichev stohastički integral	6
5	Stratonovicheva stohastička diferencijalna jednačba	12
6	Stratonovich-Taylorov razvoj	16
7	Milsteinova aproksimacijska shema	20
	Literatura	23
	Sažetak	24
	Abstract	25
	Životopis	26

# 1 Uvod

Obična diferencijalna jednačba

$$\frac{dx(s)}{ds} = a(s, x(s)), \quad x(0) = x_0,$$

opisuje položaj čestice  $x(t)$  koja se giba brzinom  $a(s, x)$  ovisno o vremenu i trenutnom položaju. Slučajne učinke, uzrokovane pogreškama u mjerenju ili neopservabilnim utjecajima, može se uzeti u obzir dodavanjem slučajnog poremećaja koji može ovisiti o trenutnom položaju. Neka je  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  vjerojatnosni prostor,  $B = (B_t, t \geq 0)$  Brownovo gibanje na tom vjerojatnosnom prostoru i  $\mathbb{F} = (\mathcal{F}_t, t \geq 0)$ , gdje je  $\mathcal{F}_t = \sigma(B_s, 0 \leq s \leq t)$  prirodna filtracija Brownovog gibanja. Jedan od načina za uvođenje slučajnosti u diferencijalnu jednačbu je slučajnost početnog uvjeta i uvođenje slučajnog šuma, odnosno dobivamo stohastičku diferencijalnu jednačbu

$$dX_t = a(t, X_t)dt + b(t, X_t)dB_t, \quad X_0(\omega) = Y(\omega), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

gdje su  $a(t, x)$  i  $b(t, x)$  determinističke funkcije s pretpostavkom da su to neprekidne funkcije prostorne i vremenske varijable. Funkciju  $a(t, x)$  nazivamo drift parametar, a  $b(t, x)$  parametar difuzije. Rješenje stohastičke diferencijalne jednačbe (1) tada postaje slučajni proces  $(X_t, t \in [0, T])$  čija slučajnost proizlazi iz početnog uvjeta i šuma generiranog Brownovim gibanjem.

Zbog g.s. nediferencijabilnosti trajektorija Brownovog gibanja stohastičku diferencijalnu jednačbu zapravo treba shvatiti kao stohastičku integralnu jednačbu

$$X_t = X_0 + \int_0^t a(s, X_s)ds + \int_0^t b(s, X_s)dB_s, \quad 0 \leq t \leq T,$$

gdje je prvi integral na desnoj strani Riemannov integral, a drugi Itôv stohastički integral. Brownovo gibanje  $B$  naziva se pogonski proces Itôve stohastičke diferencijalne jednačbe.

## 2 Brownovo gibanje

Budući da je Brownovo gibanje pogonski proces stohastičke diferencijalne jednačbe, u ovom ćemo poglavlju definirati Brownovo gibanje, navesti nekoliko bitnih svojstava tog slučajnog procesa i razloge uvođenja stohastičkih integrala.

**Definicija 1.** Brownovo gibanje  $B = (B_t, t \geq 0)$  je slučajni proces s indeksnim skupom  $[0, \infty)$  i vrijednostima u  $\mathbb{R}$  koji zadovoljava sljedeće uvjete:

- $B_0 = 0$  g.s.;
- Prirasti  $B_{t_n} - B_{t_{n-1}}, \dots, B_{t_1} - B_{t_0}$  su nezavisni za sve  $n \geq 0$ ,  $0 = t_0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n < \infty$ ;
- $B_t - B_s \stackrel{d}{=} B_{t+h} - B_{s+h}$  za sve  $0 \leq s < t$  i za sve  $h$  za koje vrijedi  $s + h \geq 0$ ;
- $B_t - B_s \sim \mathcal{N}(0, t - s)$ , gdje je  $\mathcal{N}(0, t - s)$  normalna distribucija;
- $t \mapsto B_t(\omega)$  je neprekidna g.s.

Po definiciji, Brownovo gibanje je slučajni proces sa startom u  $B_0 = 0$ , nezavisnim i stacionarnim prirastima i g.s. neprekidnim trajektorijama. Za proces  $(B_t + a, t \geq 0)$ ,  $a \in \mathbb{R}$  kažemo da je Brownovo gibanje sa startom u  $a$ . U nastavku ćemo podrazumjevati da je  $B(t)$  isto što i  $B_t$ , te ćemo za prirast Brownovog gibanja koristiti oznaku  $\Delta_i B = B_{t_i} - B_{t_{i-1}}$ . Neka je  $(B(t), t \geq 0)$  Brownovo gibanje i  $a > 0$  fiksno. Tada je  $(W(t), t \geq 0)$ ,  $W(t) := B(t+a) - B(a)$  također Brownovo gibanje. Vrijedi  $W(0) = 0$ , a g.s. neprekidnost trajektorija nasljeđena je od standardnog Brownovog gibanja. U nastavku ćemo izvesti ostale uvjete iz Definicije 1. Za sve  $s \leq t$  imamo

$$W(t) - W(s) = B(t+a) - B(a) - B(s+a) + B(a) = B(t+a) - B(s+a) \sim \mathcal{N}(0, t-s),$$

$$\begin{aligned} W(t+h) - W(s+h) &= B(t+h+a) - B(a) - B(s+h+a) + B(a) \\ &= B(t+h+a) - B(s+h+a) \sim \mathcal{N}(0, t-s), \end{aligned}$$

gdje je  $h \geq -s$ . Ako je  $t_0 = 0 < t_1 < \dots < t_n$ , onda je

$$W(t_j) - W(t_{j-1}) = B(t_j+a) - B(t_{j-1}+a) \text{ za sve } j = 1, \dots, n,$$

odnosno nezavisnost prirasta procesa  $(W(t), t \geq 0)$  nasljeđena je od nezavisnosti prirasta Brownovog gibanja.

**Lema 1.** Neka je  $(B(t), t \geq 0)$  Brownovo gibanje i  $W(t) := B(t+a) - B(a)$ . Tada su procesi  $(B(t), 0 \leq t \leq a)$  i  $(W(t), t \geq 0)$  nezavisni, to jest  $\sigma$ -algebre generirane ovim procesima su nezavisne:

$$\mathcal{F}_a^B := \sigma(B(t) : 0 \leq t \leq a) \text{ je nezavisna od } \mathcal{F}_\infty^W := \sigma(W(t) : 0 \leq t < \infty).$$

Posebno vrijedi  $B(t) - B(s)$  nezavisno od  $\mathcal{F}_s^B$  za sve  $0 \leq s < t$ .

Dokaz se može pronaći u [2]. Tvrdnja Leme 1. govori da je posljedica nezavisnih prirasta Brownovog gibanja to što Brownovo gibanje nema "memoriju", odnosno svojstvo pamćenja.

**Teorem 1.** Brownovo gibanje  $B = (B_t, t \geq 0)$  je  $\frac{1}{2}$ -sebi-sličan proces odnosno za svaki  $c > 0$  i  $t > 0$  vrijedi  $B_{ct} \sim c^{\frac{1}{2}} B_t$ . Posebno,  $(c^{-\frac{1}{2}} B_{ct}, t \geq 0)$  je također Brownovo gibanje.

Tvrđnja Teorema 1. se lako vidi promatrajući normalnu distribuciju. Znamo da vrijedi  $\mathcal{N}(0, ct) = c^{\frac{1}{2}}\mathcal{N}(0, t)$  odnosno

$$B_{ct} \stackrel{d}{=} B_{ct} - B_0 \sim \mathcal{N}(0, ct) = c^{\frac{1}{2}}\mathcal{N}(0, t) \sim c^{\frac{1}{2}}(B_t - B_0) \stackrel{d}{=} c^{\frac{1}{2}}B_t.$$

U nastavku se bavimo kvadratnom varijacijom Brownovog gibanja i njezinim posljedicama. Prvo definiramo pojam jake  $p$ -varijacije.

**Definicija 2.** Neka je  $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  funkcija i  $\tau = \{t_0, t_1, \dots, t_n\}, 0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = t$ , konačna subdivizija intervala  $[0, t]$ . Sa  $|\tau| := \max_{1 \leq j \leq n} (t_j - t_{j-1})$  označavamo duljinu najvećeg podintervala subdivizije. Za  $p > 0$   $p$ -varijacijska suma za  $\tau$  je

$$S_p^\tau(f; n) := \sum_{\tau} |f(t_j) - f(t_{j-1})|^p = \sum_{j=1}^n |f(t_j) - f(t_{j-1})|^p.$$

Supremum po svim konačnim subdivizijama je jaka  $p$ -varijacija

$$VAR_p(f; t) := \sup\{S_p^\tau(f; n) : \tau \text{ je konačna subdivizija od } [0, t]\}.$$

Često se za zadani niz konačnih subdivizija  $(\tau_n)_{n \geq 1}$  od  $[0, t]$  za koji vrijedi  $\lim_{n \rightarrow \infty} |\tau_n| = 0$  definira  $p$ -varijacija kao

$$var_p(f; t) = \lim_{|\tau_n| \rightarrow 0} S_p^{\tau_n}(f; n).$$

Jaka varijacija  $VAR_p(f; t)$  je uvijek definirana, a ako  $var_p(f; t)$  postoji onda vrijedi  $VAR_p(f; t) \geq var_p(f; t)$ .

**Teorem 2.** Neka je  $B = (B_t, t \geq 0)$  Brownovo gibanje i  $(\tau_n)_{n \geq 1}$  proizvoljan niz konačnih subdivizija od  $[0, t]$  koji zadovoljava  $\lim_{n \rightarrow \infty} |\tau_n| = 0$ . Tada vrijedi konvergencija u srednje-kvadratnom smislu, odnosno

$$var_2(B; t) = t.$$

$S var_2(B; t)$  označavamo kvadratnu varijaciju Brownovog gibanja.

*Dokaz.* Neka je  $\tau = \{t_0, t_1, \dots, t_n\}, 0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n \leq t$ , bilo koja konačna subdivizija od  $[0, t]$ . Brownovo gibanje ima nezavisne i stacionarne priraste pa vrijedi

$$E[\Delta_i B \Delta_j B] = \begin{cases} 0 & , i \neq j \\ \text{Var}(\Delta_i B) = t_i - t_{i-1} = \Delta_i & , i = j. \end{cases}$$

Tada je

$$E\left[\sum_{j=1}^n (B(t_j) - B(t_{j-1}))^2\right] = \sum_{j=1}^n E[(B(t_j) - B(t_{j-1}))^2] = \sum_{j=1}^n (t_j - t_{j-1}) = t.$$

Tada koristeći nezavisnost prirasta Brownovog gibanja i formulu  $\text{Var}(X) = E[X^2] - (E[X])^2$  vrijedi

$$\begin{aligned} E\left[\left(\sum_{j=1}^n (B(t_j) - B(t_{j-1}))^2 - t\right)^2\right] &= \text{Var}\left(\sum_{j=1}^n (B(t_j) - B(t_{j-1}))^2\right) \\ &= \sum_{j=1}^n \text{Var}\left((B(t_j) - B(t_{j-1}))^2\right) \\ &= \sum_{j=1}^n [E[(B(t_j) - B(t_{j-1}))^4] - (t_j - t_{j-1})^2]. \end{aligned}$$

Uočimo da je  $B_1 \stackrel{d}{=} B_1 - B_0 \sim \mathcal{N}(0, 1)$  i znamo da je  $E[B_1^4] = 3$ . Koristeći svojstvo  $B_t - B_s \stackrel{d}{=} B_{t-s}$  i  $\frac{1}{2}$ -sebi-sličnost Brownovog gibanja dobivamo

$$E[(B(t_j) - B(t_{j-1}))^4] = E[B_{t_j - t_{j-1}}^4] = E[(\sqrt{t_j - t_{j-1}} B_1)^4] = 3(t_j - t_{j-1})^2.$$

Znamo da  $|\tau| \rightarrow 0$  pa slijedi

$$\begin{aligned} E\left[\left(\sum_{j=1}^n (B(t_j) - B(t_{j-1}))^2 - t\right)^2\right] &= \sum_{j=1}^n 2(t_j - t_{j-1})^2 \\ &\leq 2|\tau| \sum_{j=1}^n (t_j - t_{j-1}) = 2|\tau|t \rightarrow 0. \end{aligned}$$

□

Posljedice Teorema 2. navedene su u nastavku, a dokazi se mogu pronaći u [2].

**Korolar 1.** *Za gotovo sve trajektorije Brownovog gibanja vrijedi:*

$$\sup \left\{ \sum_{j=1}^n |B(t_j) - B(t_{j-1})|^p : \tau \text{ je konačna subdivizija od } [0, t] \right\} = \infty \text{ g.s. za sve } p < 2.$$

Tvrdnja Korolara 1. za  $p = 1$  znači da Brownovo gibanje nema ograničenu varijaciju. Funkcija  $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  zove se (lokalno) Hölder neprekidna funkcija reda  $\alpha > 0$ , ako za svaki segment  $[a, b] \subset [0, \infty)$  postoji konstanta  $c = c(f, a, [a, b])$  tako da vrijedi  $|f(t) - f(s)| \leq c|t - s|^\alpha$  za sve  $s, t \in [a, b]$ . Za  $\alpha = 1$  kažemo da je funkcija  $f$  Lipschitz neprekidna.

**Korolar 2.** *Gotovo sve trajektorije Brownovog gibanja nisu (lokalno) Hölder neprekidne reda  $\alpha > \frac{1}{2}$ .*

Tvrdnja Korolara 2. povlači da trajektorije Brownovog gibanja nisu Lipschitz neprekidne i nisu diferencijabilne.

**Teorem 3.** *Neka je  $B = (B_t, t \geq 0)$  Brownovo gibanje. Tada je funkcija  $t \mapsto B_t(\omega)$  za gotovo sve  $\omega \in \Omega$  nediferencijabilna.*

Glavni razlozi uvođenja stohastičkih integrala su neograničena varijacija i nediferencijabilnost trajektorija Brownovog gibanja. Više o tome može se pronaći u [1], poglavlje 2.1.2.



### 3 Itôv stohastički integral

U ovom poglavlju navodimo Itôv stohastički integral koji će nam trebati u nastavku. Neka je  $B = (B_t, t \in [0, T])$  Brownovo gibanje. Neka je  $C = (C_t, t \in [0, T])$  proces adaptiran na prirodnu filtraciju Brownovog gibanja  $\mathcal{F}_t = \sigma(B_s, s \leq t)$ ,  $t \in [0, T]$ . Nadalje, pretpostavimo da vrijedi  $\int_0^T E[C_t^2]dt < \infty$ . Itôv stohastički integral slučajnog procesa  $C$  je

$$I_t(C) = \int_0^t C_s dB_s, \quad t \in [0, T].$$

Itôvi stohastički integrali čine slučajni proces  $(I_t(C), t \in [0, T])$ . Za danu subdiviziju

$$\tau_n : 0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n = T$$

i  $t \in [t_{k-1}, t_k]$ , slučajna varijabla  $I_t(C)$  je "bliska" Riemann-Stieltjesovoj sumi

$$\sum_{i=1}^{k-1} C_{t_{i-1}}(B_{t_i} - B_{t_{i-1}}) + C_{t_{k-1}}(B_t - B_{t_{k-1}}).$$

Ova aproksimacija je bolja (u srednje-kvadratnom smislu) što više profinimo subdiviziju  $\tau_n$  intervala  $[0, T]$ . U nastavku ćemo u obliku teorema navesti bitna svojstva koja zadovoljava Itôv stohastički integral, a dokazi se mogu naći u [1].

**Teorem 4.** *Neka je proces  $C = (C_t, t \in [0, T])$  adaptiran na prirodnu filtraciju Brownovog gibanja  $(\mathcal{F}_t, t \in [0, T])$  za kojeg vrijedi  $\int_0^T E[C_t^2]dt < \infty$ . Tada vrijedi:*

- *Slučajni proces  $(I_t(C), t \in [0, T])$  je martingal u odnosu na prirodnu filtraciju Brownovog gibanja  $(\mathcal{F}_t, t \in [0, T])$ .*
- *Očekivanje Itôvog stohastičkog integrala je nula.*
- *Itôv stohastički integral zadovoljava svojstvo izometrije:*

$$E \left[ \int_0^t C_s dB_s \right]^2 = \int_0^t E[C_s^2] ds, \quad t \in [0, T].$$

Zanima nas stohastički analogon pravila

$$[f(g(s))] = f'(g(s))g'(s),$$

gdje su  $f$  i  $g$  diferencijabilne funkcije, odnosno u integralnom zapisu

$$f(g(t)) - f(g(0)) = \int_0^t f'(g(s))g'(s)ds = \int_0^t f'(g(s))dg(s).$$

U Itôvom računu Itôva lema (formula) je analogon pravila za derivaciju kompozicije funkcija.

**Teorem 5.** *Neka je funkcija  $f$  dva puta neprekidno diferencijabilna. Itôva lema za Brownovo gibanje je*

$$f(B_t) - f(B_s) = \int_s^t f'(B_x)dB_x + \frac{1}{2} \int_s^t f''(B_x)dx, \quad s < t.$$

U nastavku ćemo navesti općenitije verzije Itôve leme. Koristit ćemo sljedeće oznake za parcijalne derivacije funkcije  $f$ :

$$f_i(t, x) = \frac{\partial}{\partial x_i} f(x_1, x_2) \Big|_{x_1=t, x_2=x}, \quad i = 1, 2,$$

$$f_{ij}(t, x) = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial x_j} f(x_1, x_2) \Big|_{x_1=t, x_2=x}, \quad i, j = 1, 2.$$

**Teorem 6.** Neka je  $f(t, x)$  funkcija dvije varijable s neprekidnim derivacijama drugog reda po varijablama  $t$  i  $x$ . Tada vrijedi:

$$f(t, B_t) - f(s, B_s) = \int_s^t \left[ f_1(x, B_x) + \frac{1}{2} f_{22}(x, B_x) \right] dx + \int_s^t f_2(x, B_x) dB_x, \quad s < t.$$

**Definicija 3.** Za slučajni proces  $X = (X_t, t \geq 0)$  kažemo da je Itôv proces ako vrijedi

$$X_t = X_0 + \int_0^t A_s^{(1)} ds + \int_0^t A_s^{(2)} dB_s,$$

gdje su  $(A_t^{(1)}, t \geq 0)$ ,  $(A_t^{(2)}, t \geq 0)$  adaptirani na prirodnu filtraciju Brownovog gibanja i oba integrala su dobro definirana.

**Teorem 7.** Neka je  $X$  Itôv proces i  $f(t, x)$  funkcija dviju varijabli s neprekidnim derivacijama drugog reda. Tada vrijedi:

$$\begin{aligned} f(t, X_t) - f(s, X_s) &= \int_s^t \left[ f_1(y, X_y) + A_y^{(1)} f_2(y, X_y) + \frac{1}{2} (A_y^{(2)})^2 f_{22}(y, X_y) \right] dy \\ &+ \int_s^t A_y^{(2)} f_2(y, X_y) dB_y, \quad s < t. \end{aligned}$$

## 4 Stratonovichev stohastički integral

U prošlom poglavlju naveli smo da se Itôv stohastički integral može aproksimirati Riemann-Stieltjesovim sumama oblika

$$\sum_{i=1}^{k-1} C_{t_{i-1}} \Delta_i B + C_{t_{k-1}} (B_t - B_{t_{k-1}}) \quad \text{za} \quad t_{k-1} \leq t \leq t_k,$$

za subdivizije

$$\tau_n : 0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n = T$$

za koje vrijedi

$$\max_{i=1, \dots, n} (t_i - t_{i-1}) \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty.$$

U Riemann-Stieltjesovim sumama vrijednosti procesa  $C$  odabrane su u krajnjim lijevim točkama podintervala  $[t_{i-1}, t_i]$ . Neka je sada proces  $C$  dan s  $C_t = f(B_t)$ ,  $t \in [0, T]$ , gdje je funkcija  $f$  dva puta diferencijabilna na  $[0, T]$ . Može se pokazati da niz Riemann-Stieltjesovih suma  $(\widetilde{S}_n)_{n \in \mathbb{N}}$  definiran s

$$\widetilde{S}_n = \sum_{i=1}^n f(B_{y_i}) \Delta_i B, \tag{2}$$

gdje je  $y_i = \frac{t_{i-1} + t_i}{2}$ ,  $i = 1, \dots, n$ , konvergira u srednje-kvadratnom smislu ako  $\max_{i=1, \dots, n} (t_i - t_{i-1}) \rightarrow 0$ .

**Definicija 4.** Jedinostveni limes u srednje-kvadratnom smislu  $S_T(f(B))$  niza Riemann-Stieltjesovih suma (2) postoji ako vrijedi  $\int_0^T \mathbb{E}[f^2(B_t)] dt < \infty$ . Limes se zove Stratonovichev stohastički integral od  $f(B)$  i označava s

$$S_T(f(B)) = \int_0^T f(B_s) \circ dB_s.$$

Stratonovichev stohastički integral

$$S_t(f(B)) = \int_0^t f(B_s) \circ dB_s, \quad t \in [0, T]$$

je limes u srednje-kvadratnom smislu odgovarajućeg niza Riemann-Stieltjesovih suma.

**Primjer 1.** Neka za subdiviziju  $\tau_n = \{t_0, t_1, \dots, t_n\}$ ,  $0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n = T$ , segmenta  $[0, T]$  vrijedi  $\max_{i=1, \dots, n} (t_i - t_{i-1}) \rightarrow 0$ . Neka su Riemann-Stieltjesove sume oblika

$$\widetilde{S}_n = \sum_{i=1}^n B_{y_i} \Delta_i B, \quad B = (B_t, t \in [0, T]),$$

gdje je  $y_i = \frac{1}{2}(t_{i-1} + t_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ . U nastavku ćemo pokazat da niz  $(\widetilde{S}_n)_{n \in \mathbb{N}}$  konvergira u srednje-kvadratnom smislu prema  $B_T^2/2$ . Znamo da je

$$\widetilde{S}_n = \sum_{i=1}^n B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} (B_{t_i} - B_{t_{i-1}}) = \sum_{i=1}^n \left( B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} B_{t_i} - B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} B_{t_{i-1}} \right). \quad (3)$$

Uočimo da vrijedi

$$\left( B_{t_i} - B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} \right)^2 = B_{t_i}^2 - 2B_{t_i} B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} + B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}}^2,$$

odnosno

$$B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} B_{t_i} = \frac{1}{2} B_{t_i}^2 + \frac{1}{2} B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}}^2 - \frac{1}{2} \left( B_{t_i} - B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} \right)^2. \quad (4)$$

Analogno dobivamo i

$$B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} B_{t_{i-1}} = \frac{1}{2} B_{t_{i-1}}^2 + \frac{1}{2} B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}}^2 - \frac{1}{2} \left( B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} - B_{t_{i-1}} \right)^2. \quad (5)$$

Ako u (3) uvrstimo (4) i (5) dobivamo

$$\begin{aligned} \widetilde{S}_n &= \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{2} B_{t_i}^2 + \frac{1}{2} B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}}^2 - \frac{1}{2} \left( B_{t_i} - B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} \right)^2 - \frac{1}{2} B_{t_{i-1}}^2 - \frac{1}{2} B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}}^2 + \frac{1}{2} \left( B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} - B_{t_{i-1}} \right)^2 \right] \\ &= \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{2} B_{t_i}^2 - \frac{1}{2} B_{t_{i-1}}^2 - \frac{1}{2} \left( B_{t_i} - B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} - B_{t_{i-1}} \right)^2 \right] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (B_{t_i}^2 - B_{t_{i-1}}^2) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[ \left( B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} - B_{t_{i-1}} \right)^2 - \left( B_{t_i} - B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

Raspišemo prvu sumu, iskoristimo  $B_0 = 0$  i dobivamo

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (B_{t_i}^2 - B_{t_{i-1}}^2) &= \frac{1}{2} \left[ B_{t_1}^2 - B_0^2 + B_{t_2}^2 - B_{t_1}^2 + B_{t_3}^2 - B_{t_2}^2 + \dots + B_{t_{n-1}}^2 - B_{t_{n-2}}^2 + B_{t_n}^2 - B_{t_{n-1}}^2 \right] \\ &= \frac{1}{2} B_{t_n}^2 = \frac{1}{2} B_T^2. \end{aligned}$$

Označimo

$$Q_n(T) := \sum_{i=1}^n \left( B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} - B_{t_{i-1}} \right)^2 \quad i \quad W_n(T) := \sum_{i=1}^n \left( B_{t_i} - B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} \right)^2.$$

Za Brownovo gibanje vrijedi

$$\mathbb{E}[\Delta_i B \Delta_j B] = \begin{cases} 0 & , i \neq j \\ \text{Var}(\Delta_i B) = t_i - t_{i-1} = \Delta_i & , i = j. \end{cases}$$

Ako to iskoristimo dobivamo

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[Q_n(T)] &= \sum_{i=1}^n \mathbb{E} \left[ \left( B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} - B_{t_{i-1}} \right)^2 \right] = \sum_{i=1}^n \text{Var} \left( B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} - B_{t_{i-1}} \right) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{t_{i-1} + t_i}{2} - t_{i-1} \right) \\ &= \sum_{i=1}^n \left( \frac{t_i}{2} - \frac{t_{i-1}}{2} \right) = \frac{t_1}{2} - \frac{t_0}{2} + \frac{t_2}{2} - \frac{t_1}{2} + \frac{t_3}{2} - \frac{t_2}{2} + \dots + \frac{t_{n-1}}{2} - \frac{t_{n-2}}{2} + \frac{t_n}{2} - \frac{t_{n-1}}{2} \\ &= \frac{t_n}{2} = \frac{T}{2}. \end{aligned}$$

Slijedi:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[W_n(T)] &= \sum_{i=1}^n \mathbb{E} \left[ \left( B_{t_i} - B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} \right)^2 \right] = \sum_{i=1}^n \left( t_i - \frac{t_{i-1} + t_i}{2} \right) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{t_i}{2} - \frac{t_{i-1}}{2} \right) \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \Delta_i = \frac{T}{2}. \end{aligned}$$

Nadalje opet zbog nezavisnosti prirasta Brownovog gibanja vrijedi

$$\begin{aligned} \text{Var}(Q_n(T)) &= \sum_{i=1}^n \text{Var} \left( \left( B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} - B_{t_{i-1}} \right)^2 \right) \\ &= \sum_{i=1}^n \left[ \mathbb{E} \left[ \left( B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} - B_{t_{i-1}} \right)^4 \right] - \left( \frac{t_{i-1} + t_i}{2} - t_{i-1} \right)^2 \right] \\ &= \sum_{i=1}^n \left[ \mathbb{E} \left[ \left( B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} - B_{t_{i-1}} \right)^4 \right] - \frac{1}{4} \Delta_i^2 \right]. \end{aligned}$$

Znamo da vrijedi  $B_1 \sim \mathcal{N}(0, 1)$  i  $\mathbb{E}B_1^4 = 3$ . Iskoristimo li još  $B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} - B_{t_{i-1}} \stackrel{d}{=} B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2} - t_{i-1}}$  i  $\frac{1}{2}$ -sebi-sličnost Brownovog gibanja dobivamo

$$\begin{aligned} \mathbb{E} \left[ \left( B_{\frac{t_{i-1}+t_i}{2}} - B_{t_{i-1}} \right)^4 \right] &= \mathbb{E} \left[ B_{\frac{t_i}{2} - \frac{t_{i-1}}{2}}^4 \right] = \mathbb{E} \left[ \left( \sqrt{\frac{1}{2}} (t_i - t_{i-1}) B_1 \right)^4 \right] \\ &= \frac{3}{4} (t_i - t_{i-1})^2 = \frac{3}{4} \Delta_i^2. \end{aligned}$$

Odnosno, vrijedi

$$\text{Var}(Q_n(T)) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{3}{4} \Delta_i^2 - \frac{1}{4} \Delta_i^2 \right) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2.$$

Zbog  $\max_{i=1,\dots,n} \Delta_i \rightarrow 0$  slijedi

$$\text{Var}(Q_n(T)) \leq \frac{1}{2} \max_{i=1,\dots,n} \Delta_i \sum_{i=1}^n \Delta_i = \frac{T}{2} \max_{i=1,\dots,n} \Delta_i \rightarrow 0.$$

Kako je

$$\text{Var}(Q_n(T)) = \mathbb{E} \left[ \left( Q_n(T) - \frac{T}{2} \right)^2 \right]$$

pokazano je da  $Q_n(T)$  konvergira u srednje-kvadratnom smislu prema  $T/2$ . Analogno se pokaže da  $W_n(T)$  također konvergira u srednje-kvadratnom smislu prema  $T/2$ . Zaključujemo da

$$\widetilde{S}_n = \frac{1}{2} B_T^2 + \frac{1}{2} [Q_n(T) - W_n(T)]$$

konvergira u srednje-kvadratnom smislu prema

$$\frac{1}{2} \left( B_T^2 + \frac{T}{2} - \frac{T}{2} \right),$$

odnosno prema  $\frac{1}{2} B_T^2$ . To je vrijednost odgovarajućeg Stratonovichevog stohastičkog integrala, odnosno vrijedi

$$S_T(B) = \int_0^T B_s \circ dB_s = \frac{1}{2} B_T^2.$$

Riemann-Stieltjesove sume  $\sum_{i=1}^k B_{y_i} \Delta_i B$ ,  $k = 1, \dots, n$  nisu konstruirane kao martingal i slučajni proces  $(B_t^2/2, t \in [0, T])$  također nije martingal u odnosu na prirodnu filtraciju Brownovog gibanja. Neka je  $\mathcal{F}_t = \sigma(B_s, s \leq t)$  prirodna filtracija Brownovog gibanja. Tada vrijedi

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[B_t^2/2 | \mathcal{F}_s] &= \frac{1}{2} \mathbb{E}[(B_t - B_s + B_s)^2 | \mathcal{F}_s] \\ &= \frac{1}{2} [\mathbb{E}[(B_t - B_s)^2 | \mathcal{F}_s] + 2\mathbb{E}[(B_t - B_s)B_s | \mathcal{F}_s] + \mathbb{E}[B_s^2 | \mathcal{F}_s]] \\ &= \frac{1}{2} [\mathbb{E}[(B_t - B_s)^2] + 2B_s \mathbb{E}[B_t - B_s] + B_s^2] \\ &= \frac{1}{2} [(t - s) + B_s^2] = \frac{1}{2}(t - s) + \frac{1}{2} B_s^2. \end{aligned}$$

U raspisu je korišteno  $\mathbb{E}[(B_t - B_s)] = 0$  i  $(B_t - B_s)^2$  nezavisno od  $\mathcal{F}_s$  (Lema 1.).

Rezultat  $\int_0^T B_s \circ dB_s = \frac{1}{2} B_T^2$  pokazuje da vrijedi pravilo za derivaciju kompozicije funkcija. Neka je  $b(t)$  deterministička diferencijabilna funkcija takva da je  $b(0) = 0$ . Koristeći jednakost  $\frac{1}{2} \frac{db^2(s)}{ds} = b(s) \frac{db(s)}{ds}$  slijedi

$$\frac{1}{2} \int_0^T \frac{db^2(s)}{ds} ds = \frac{1}{2} b^2(T) = \int_0^T b(s) \frac{db(s)}{ds} ds = \int_0^T b(s) db(s).$$

Ako  $b(T)$  zamijenimo Brownovim gibanjem  $B_T$  dobivamo prethodno izračunat stohastički integral. Ali ovo je samo formalna zamjena, budući da je to pravilo primjenjivo na diferencijabilne funkcije. Razlog korištenja Stratonovichevog stohastičkog integrala je u tome što formalno zadovoljava pravilo za derivaciju kompozicije funkcija. Može se pokazati da vrijedi sljedeći teorem.

**Teorem 8.** *Pretpostavimo da funkcija  $f$  zadovoljava*

$$\int_0^T \mathbb{E}[f(B_t)]^2 dt < \infty \quad \text{i} \quad \int_0^T \mathbb{E}[f'(B_t)]^2 dt < \infty.$$

*Tada vrijedi formula:*

$$\int_0^T f(B_t) \circ dB_t = \int_0^T f(B_t) dB_t + \frac{1}{2} \int_0^T f'(B_t) dt.$$

*Dokaz.* Neka je Taylorov razvoj funkcije  $f$  dan s

$$f(B_{y_i}) = f(B_{t_{i-1}}) + f'(B_{t_{i-1}})(B_{y_i} - B_{t_{i-1}}) + \dots$$

Tada vrijedi

$$\begin{aligned} \widetilde{S}_n &= \sum_{i=1}^n f(B_{y_i}) \Delta_i B = \sum_{i=1}^n f(B_{t_{i-1}}) \Delta_i B + \sum_{i=1}^n f'(B_{t_{i-1}})(B_{y_i} - B_{t_{i-1}}) \Delta_i B + \dots \\ &= \sum_{i=1}^n f(B_{t_{i-1}}) \Delta_i B + \sum_{i=1}^n f'(B_{t_{i-1}})(B_{y_i} - B_{t_{i-1}})(B_{t_i} - B_{y_i} + B_{y_i} - B_{t_{i-1}}) + \dots \\ &= \sum_{i=1}^n f(B_{t_{i-1}}) \Delta_i B + \sum_{i=1}^n f'(B_{t_{i-1}})(B_{y_i} - B_{t_{i-1}})^2 \\ &\quad + \sum_{i=1}^n f'(B_{t_{i-1}})(B_{y_i} - B_{t_{i-1}})(B_{t_i} - B_{y_i}) + \dots \\ &= \widetilde{S}_n^{(1)} + \widetilde{S}_n^{(2)} + \widetilde{S}_n^{(3)} + \dots \end{aligned}$$

Prema definiciji Itôvog integrala niz suma  $\left(\widetilde{S}_n^{(1)}\right)_{n \in \mathbb{N}}$  konvergira u srednje-kvadratnom smislu prema  $\int_0^T f(B_s) dB_s$ .

U zapisu  $\widetilde{S}_n^{(2)}$  pojavljuje se  $(B_{y_i} - B_{t_{i-1}})^2$ . U Primjeru 1. pokazali smo da vrijedi

$$\mathbb{E}[(B_{y_i} - B_{t_{i-1}})^2] = \frac{1}{2}(t_i - t_{i-1}) = \frac{1}{2}\Delta_i$$

i

$$\text{Var}\left((B_{y_i} - B_{t_{i-1}})^2\right) = \frac{1}{2}\Delta_i^2.$$

Ako vrijedi  $\max_{i=1, \dots, n} \Delta_i \rightarrow 0$ , onda je

$$\text{Var}\left((B_{y_i} - B_{t_{i-1}})^2\right) \leq \frac{1}{2}\Delta_i \max_{i=1, \dots, n} \Delta_i \rightarrow 0.$$

Kako je

$$\text{Var}\left((B_{y_i} - B_{t_{i-1}})^2\right) = \mathbb{E}\left[\left((B_{y_i} - B_{t_{i-1}})^2 - \frac{1}{2}\Delta_i\right)^2\right]$$

pokazano je da  $(B_{y_i} - B_{t_{i-1}})^2$  konvergira u srednje-kvadratnom smislu prema  $\frac{1}{2}\Delta_i$ . Zbog toga  $\left(\widetilde{S}_n^{(2)}\right)_{n \in \mathbb{N}}$  konvergira u srednje-kvadratnom smislu prema  $\frac{1}{2} \int_0^T f'(B_t) dt$ . Znamo da je

$E[(B_{y_i} - B_{t_{i-1}})(B_{t_i} - B_{y_i})] = 0$  pa  $(\widetilde{S}_n^{(3)})_{n \in \mathbb{N}}$  konvergira u srednje-kvadratnom smislu prema 0. Prema Definiciji 4.  $(\widetilde{S}_n)_{n \in \mathbb{N}}$  konvergira u srednje-kvadratnom smislu prema  $\int_0^T f(B_t) \circ dB_t$ . Uzimajući u obzir te konvergenije dobivamo tvrdnju Teorema 8.  $\square$

Uzimanje specifične funkcije  $f(t) = g'(t)$  i primjena jednostavne verzije Itôve leme (Teorem 5.) daje tvrdnju Korolara 3.

$$\begin{aligned} g(B_T) - g(B_0) &= \int_0^T g'(B_s) dB_s + \frac{1}{2} \int_0^T g''(B_s) ds = \int_0^T f(B_s) dB_s + \frac{1}{2} \int_0^T f'(B_s) ds \\ &= \int_0^T g'(B_s) \circ dB_s. \end{aligned}$$

**Korolar 3.** *Za Stratonovichev stohastički integral vrijedi:*

$$g(B_T) - g(B_0) = \int_0^T g'(B_s) \circ dB_s.$$

Tvrdnja Korolara 3. ne znači da je Stratonovichev stohastički integral klasični Riemannov integral.

**Primjer 2.** *Uzmimo funkciju  $g(t) = t^2$ . Tada iz tvrdnje Korolara 3. dobivamo*

$$\int_0^T B_t \circ dB_t = \frac{1}{2} B_T^2 - \frac{1}{2} B_0^2 = \frac{1}{2} B_T^2.$$

*Ovo je u skladu s vrijednosti  $S_T(B)$  iz Primjera 1.*

**Primjer 3.** *Uzmimo funkciju  $g(t) = e^t$ . Primjenom Korolara 3. slijedi*

$$\int_0^T e^{B_t} \circ dB_t = e^{B_T} - e^{B_0} = e^{B_T} - 1.$$

*Ovo pokazuje da je funkcija  $g(B_t) = e^{B_t}$  Stratonovicheva eksponencijalna funkcija.*

Definirali smo Stratonovichev stohastički integral samo za transformaciju Brownovog gibanja, odnosno za integrande oblika  $f(B_t)$ . Sada želimo tu definiciju proširiti na integrande oblika  $f(t, x)$ . Neka je dan proces

$$C_t = f(t, X_t), \quad t \in [0, T],$$

gdje funkcija  $f(t, x)$  ima neprekidne parcijalne derivacije drugog reda. Pretpostavimo da je  $X$  Itôv proces zadan stohastičkom diferencijalnom jednačbom

$$X_t = X_0 + \int_0^t a(s, X_s) ds + \int_0^t b(s, X_s) dB_s,$$

gdje su  $a(t, x)$  i  $b(t, x)$  funkcije koje zadovoljavaju uvjete za egzistenciju i jedinstvenost jakog rješenja stohastičke diferencijalne jednačbe. Odnosno, pretpostavimo da za sve  $t \in [0, T]$  i  $x, y \in \mathbb{R}$  funkcijski koeficijenti zadovoljavaju:

- Funkcije  $a(t, x)$  i  $b(t, x)$  su neprekidne.

- Zadovoljavaju Lipschitzov uvjet po prostornoj varijabli, to jest postoji konstanta  $K_1 > 0$  takva da vrijedi:

$$|a(t, x) - a(t, y)| + |b(t, x) - b(t, y)| \leq K_1|x - y|.$$

- Zadovoljavaju uvjet linearnog rasta, to jest postoji konstanta  $K_2 > 0$  takva da vrijedi:

$$a^2(t, x) + b^2(t, x) \leq K_2^2(1 + x^2).$$

Za funkciju  $f(t, x)$  i proces  $X$  Stratonovichev stohastički integral

$$\int_0^T f(t, X_t) \circ dB_t$$

je limes u srednje-kvadratnom smislu niza Riemann-Stieltjesovih suma

$$\widetilde{S}_n = \sum_{i=1}^n f(t_{i-1}, 0.5(X_{t_{i-1}} + X_{t_i})) \Delta_i B,$$

ako vrijedi

$$\int_0^T E[f(t, X_t)]^2 dt < \infty.$$

**Teorem 9.** *Neka vrijede dane pretpostavke za funkciju  $f$  i proces  $X$ . Tada vrijedi sljedeća formula:*

$$\int_0^T f(t, X_t) \circ dB_t = \int_0^T f(t, X_t) dB_t + \frac{1}{2} \int_0^T b(t, X_t) f_2(t, X_t) dt,$$

gdje je  $f_2(t, x)$  parcijalna derivacija funkcije  $f$  po  $x$ .

Dokaz se može pronaći u [3]. U Teoremu 9. Stratonovichev stohastički integral prikazan je pomoću Itôvog stohastičkog integrala i Riemannovog integrala, odnosno to je općenitija formula od formule u Teoremu 8.

## 5 Stratonovicheva stohastička diferencijalna jednačba

U primjenama stohastičkih diferencijalnih jednačbi nije uvijek lako odrediti koji tip diferencijalne jednačbe koristiti, to jest koji tip integrala koristiti (Itôv stohastički integral ili Stratonovichev stohastički integral). Stratonovichev stohastički integral formalno zadovoljava pravilo za derivaciju kompozicije funkcija pa se ovo svojstvo koristi za rješavanje Itôvih stohastičkih diferencijalnih jednačbi, jer je to pravilo lakše koristiti kod nekih izračuna. Stratonovicheva stohastička diferencijalna jednačba je stohastička integralna jednačba oblika

$$X_t = X_0 + \int_0^t \tilde{a}(s, X_s) ds + \int_0^t \tilde{b}(s, X_s) \circ dB_s, \quad t \in [0, T],$$

za zadane funkcijske koeficijente  $\tilde{a}(t, x)$  i  $\tilde{b}(t, x)$ . Prvi integral je Riemannov integral, drugi je Stratonovichev stohastički integral, a  $B = (B_t, t \in [0, T])$  je Brownovo gibanje. Slučajni proces  $X$  naziva se rješenje jednačbe ako zadovoljava danu jednačbu. Jednačba se može napisati i u obliku

$$dX_t = \tilde{a}(t, X_t) dt + \tilde{b}(t, X_t) \circ dB_t, \quad X_0(\omega) = Y(\omega).$$



Pretpostavimo da je  $X$  rješenje Itôve stohastičke diferencijalne jednačbe

$$X_t = X_0 + \int_0^t a(s, X_s) ds + \int_0^t b(s, X_s) dB_s, \quad t \in [0, T],$$

gdje funkcijski koeficijenti  $a(t, x)$  i  $b(t, x)$  zadovoljavaju uvjete za egzistenciju i jedinstvenost jakog rješenja stohastičke diferencijalne jednačbe (navedeni na stranici 11.), a  $X_0$  je nezavisna od  $(B_t, t \in [0, T])$  i  $E[X_0^2] < \infty$ . Prema Teoremu 9. znamo da vrijedi

$$\int_0^t f(s, X_s) \circ dB_s = \int_0^t f(s, X_s) dB_s + \frac{1}{2} \int_0^t b(s, X_s) f_2(s, X_s) ds.$$

Za  $f = b$  dobivamo

$$\int_0^t b(s, X_s) dB_s = -\frac{1}{2} \int_0^t b(s, X_s) b_2(s, X_s) ds + \int_0^t b(s, X_s) \circ dB_s.$$

Uključivanjem ove relacije u Itôvu stohastičku diferencijalnu jednačbu dobivamo Stratonovichevu stohastičku diferencijalnu jednačbu

$$X_t = X_0 + \int_0^t \tilde{a}(s, X_s) ds + \int_0^t b(s, X_s) \circ dB_s,$$

gdje je  $\tilde{a}(t, x) = a(t, x) - \frac{1}{2}b(t, x)b_2(t, x)$ . Posljedica ovoga je ta da su Itôva stohastička diferencijalna jednačba i Stratonovicheva stohastička diferencijalna jednačba ekvivalentne u smislu da imaju isto jako rješenje pod uvjetom da ono postoji.

Promotrimo slučajni proces  $Y_t = u(t, X_t)$  gdje je  $X$  rješenje Itôve stohastičke diferencijalne jednačbe i neka je  $u(t, x)$  glatka funkcija. Primjenom Itove leme iz Teorema 7. na  $A_t^{(1)} = a(t, X_t)$  i  $A_t^{(2)} = b(t, X_t)$  dobivamo

$$Y_t = Y_0 + \int_0^t \left[ u_1 + au_2 + \frac{1}{2}b^2u_{22} \right] ds + \int_0^t bu_2 dB_s. \quad (6)$$

Funkcije  $a, b, u$  i njihove derivacije su funkcije od  $s$  i  $X_s$ . Primjena formule iz Teorema 9. na  $f = bu_2$  i  $f_2 = b_2u_2 + bu_{22}$  daje

$$\int_0^t bu_2 dB_s = -\frac{1}{2} \int_0^t \left[ b_2u_2 + bu_{22} \right] b ds + \int_0^t bu_2 \circ dB_s.$$

Kombinirajući ovu relaciju sa (6) dobivamo:

$$\begin{aligned} Y_t &= Y_0 + \int_0^t \left[ u_1 + au_2 + \frac{1}{2}b^2u_{22} \right] ds - \frac{1}{2} \int_0^t \left[ b_2u_2 + bu_{22} \right] b ds + \int_0^t bu_2 \circ dB_s \\ &= Y_0 + \int_0^t \left[ u_1 + \left( a - \frac{1}{2}bb_2 \right) u_2 \right] ds + \int_0^t bu_2 \circ dB_s \\ &= Y_0 + \int_0^t \left[ u_1 + \tilde{a}u_2 \right] ds + \int_0^t bu_2 \circ dB_s. \end{aligned} \quad (7)$$

Ova formula je u Stratonovichevom diferencijalnom računu analogon pravila za derivaciju kompozicije funkcija za dva puta diferencijabilnu funkciju  $u(t, x)$ .

Da bismo to pokazali, pretpostavimo da  $x(t)$  zadovoljava determinističku diferencijalnu jednadžbu

$$dx(t) = \tilde{a}(t, x(t))dt + b(t, x(t))dc(t),$$

gdje je  $c(t)$  diferencijabilna funkcija. Tada dobivamo:

$$\begin{aligned} u(t+dt, x+dx) - u(t, x) &= u_1(t, x)dt + u_2(t, x)dx \\ &= [u_1(t, x) + \tilde{a}(t, x)u_2(t, x)]dt + b(t, x)u_2(t, x)dc. \end{aligned}$$

Formalna analogija s (7) omogućuje rješavanje Stratonovichevih stohastičkih diferencijabilnih jednadžbi korištenjem pravila za derivaciju kompozicije funkcija.

U sljedećim primjerima dan je postupak rješavanja Itôve stohastičke diferencijalne jednadžbe pomoću ekvivalentne Stratonovicheve stohastičke diferencijalne jednadžbe.

**Primjer 4.** Neka je  $f$  diferencijabilna funkcija. Promotrimo Itôvu stohastičku diferencijalnu jednadžbu za koju vrijedi  $a(t, x) = \frac{1}{2}f(x)f'(x)$  i  $b(t, x) = f(x)$ , odnosno

$$X_t = X_0 + \frac{1}{2} \int_0^t f(X_s)f'(X_s)ds + \int_0^t f(X_s)dB_s.$$

Za odgovarajuću Stratonovichevu stohastičku diferencijalnu jednadžbu vrijedi  $b(t, x) = f(x)$  i

$$\begin{aligned} \tilde{a}(t, x) &= a(t, x) - \frac{1}{2}b(t, x)b_2(t, x) \\ &= \frac{1}{2}f(x)f'(x) - \frac{1}{2}f(x)f'(x) \\ &= 0. \end{aligned}$$

Stratonovicheva stohastička diferencijalna jednadžba je

$$X_t = X_0 + \int_0^t f(X_s) \circ dB_s.$$

Deterministička diferencijalna jednadžba istog tipa kao Stratonovicheva stohastička diferencijalna jednadžba je oblika  $dx(t) = f(x(t))dc(t)$ , gdje je  $c(t)$  diferencijabilna funkcija. Separacija varijabli daje

$$\int_{x(0)}^{x(t)} \frac{dx}{f(x)} = \int_0^t dc(s),$$

odnosno

$$g(x(t)) - g(x(0)) = c(t) - c(0),$$

za neku funkciju  $g(x)$ . Zamjenom  $x(t) = X_t$  i  $c(t) = B_t$  dobivamo

$$g(X_t) - g(X_0) = B_t.$$

Preostaje riješiti jednadžbu po  $X$  da bi se dobilo eksplicitno rješenje zadane Itôve stohastičke diferencijalne jednadžbe.

**Primjer 5.** Neka je dana Itôva stohastička diferencijalna jednadžba

$$X_t = X_0 + \frac{1}{2}n \int_0^t X_s^{2n-1}ds + \int_0^t X_s^n dB_s, \quad n \in \mathbb{N} \setminus \{1\}.$$

Uočimo da je  $a(t, x) = \frac{1}{2}nx^{2n-1}$ ,  $b(t, x) = x^n$ ,  $b_2(t, x) = nx^{n-1}$  i  $\tilde{a}(t, x) = 0$ . Ekvivalentna Stratonovicheva stohastička diferencijalna jednačba je

$$X_t = X_0 + \int_0^t X_s^n \circ dB_s.$$

Deterministička diferencijalna jednačba istog tipa je oblika  $dx(t) = x^n(t)dc(t)$ . Separacija varijabli daje

$$\int_{x(0)}^{x(t)} \frac{dx}{x^n} = \int_0^t dc(s).$$

Vrijedi

$$\int_{x(0)}^{x(t)} \frac{dx}{x^n} = \frac{x^{-n+1}}{1-n} \Big|_{x(0)}^{x(t)} = \frac{1}{1-n}x^{-n+1}(t) - \frac{1}{1-n}x^{-n+1}(0).$$

Zamjenom  $x(t)$  s  $X_t$  i  $c(t)$  s  $B_t$  dobivamo

$$\begin{aligned} \frac{1}{1-n}X_t^{1-n} - \frac{1}{1-n}X_0^{1-n} &= B_t \\ \frac{1}{X_t^{n-1}} &= \frac{1}{X_0^{n-1}} + (1-n)B_t \\ 1 &= X_t^{n-1}(X_0^{1-n} + (1-n)B_t) \\ X_t^{n-1} &= \frac{1}{X_0^{1-n} + (1-n)B_t} \\ X_t &= \sqrt[n-1]{\frac{1}{X_0^{1-n} + (1-n)B_t}}. \end{aligned}$$

**Primjer 6.** Neka je sada Itôva stohastička diferencijalna jednačba oblika

$$X_t - X_0 = \int_0^t \left[ qf(X_s) + \frac{1}{2}f(X_s)f'(X_s) \right] ds + \int_0^t f(X_s)dB_s,$$

gdje je  $q$  zadana konstanta i  $f$  diferencijabilna funkcija. Iz jednačbe se uočava da je  $a(t, x) = qf(x) + \frac{1}{2}f(x)f'(x)$  i  $b(t, x) = f(x)$ . Za ekvivalentnu Stratonovichevnu stohastičku diferencijalnu jednačbu vrijedi

$$\tilde{a}(t, x) = qf(x) + \frac{1}{2}f(x)f'(x) - \frac{1}{2}f(x)f'(x) = qf(x),$$

odnosno jednačba je oblika

$$X_t = X_0 + \int_0^t qf(X_s)ds + \int_0^t f(X_s) \circ dB_s.$$

Deterministička diferencijalna jednačba istog tipa kao stohastička diferencijalna jednačba je oblika  $dx(t) = qf(x(t))dt + f(x(t))dc(t)$ , gdje je  $c(t)$  diferencijabilna funkcija. Jednačba se rješava separacijom varijabli, integriranjem obje strane jednakosti te zamjenom  $x(t)$  s  $X_t$  i  $c(t)$  sa  $B_t$ . Odnosno, dobivamo

$$\int_{x(0)}^{x(t)} \frac{dx}{f(x)} = g(x(t)) - g(x(0)) = \int_0^t q ds + \int_0^t dc(s) = qt + c(t) - c(0).$$

Rješenje je

$$g(X_t) - g(X_0) = qt + B_t.$$

**Primjer 7.** Neka je dana funkcija  $f(x) = x + 1$ ,  $x \geq 0$ ,  $X_0 = 0$  i neka je  $q$  konstanta. Tada je prema Primjeru 6. Itôva stohastička diferencijalna jednačba oblika

$$X_t = \int_0^t \left[ q(X_s + 1) + \frac{1}{2}(X_s + 1) \right] ds + \int_0^t (X_s + 1) dB_s$$

Tada je  $\tilde{a}(t, x) = q(x + 1)$  i ekvivalentna Stratonovicheva stohastička diferencijalna jednačba je

$$X_t = \int_0^t \left[ q(X_s + 1) \right] ds + \int_0^t (X_s + 1) \circ dB_s.$$

Deterministička diferencijalna jednačba istog tipa je oblika  $dx(t) = q(x(t) + 1)dt + (x(t) + 1)dc(t)$ . Nakon separacije varijabli i integriranja dobivamo

$$\int_{x(0)}^{x(t)} \frac{dx}{x + 1} = \ln(x(t) + 1) - \ln(x(0) + 1) = \int_0^t q ds + \int_0^t dc(s) = qt + c(t) - c(0).$$

Zamjena  $x(t) = X_t$  i  $c(t) = B_t$  daje

$$\ln(X_t + 1) = qt + B_t.$$

Ostaje još izraziti  $X_t$  da bi se dobilo eksplicitno rješenje Stratonovicheve stohastičke diferencijalne jednačbe, a time i rješenje ekvivalentne Itôve stohastičke diferencijalne jednačbe. Rješenje je

$$X_t = e^{qt+B_t} - 1.$$

## 6 Stratonovich-Taylorov razvoj

Mnoge stohastičke diferencijalne jednačbe nemaju eksplicitno rješenje, stoga su potrebne numeričke tehnike za aproksimaciju rješenja. U nastavku ćemo za rješenje stohastičke diferencijalne jednačbe podrazumjevati jako rješenje. U ovom poglavlju izvest ćemo Stratonovich-Taylorov razvoj koji će nam trebati za numeričko rješavanje Stratonovicheve stohastičke diferencijalne jednačbe, odnosno za Milsteinovu aproksimacijsku shemu.

Prvo ćemo pokazati kako dobiti Taylorov razvoj iz integralne reprezentacije determinističke diferencijalne jednačbe. Promatramo rješenje  $X_t$  obične diferencijalne jednačbe

$$\frac{d}{dt}X_t = a(X_t),$$

s početnom vrijednosti  $X_{t_0}$ , za  $t \in [t_0, T]$  gdje je  $0 \leq t_0 < T$ . Funkcija  $a$  treba biti glatka i mora imati ograničeni linearni rast. Neka je  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  tri puta neprekidno diferencijabilna funkcija. Tada vrijedi

$$\frac{d}{dt}f(X_t) = a(X_t) \frac{\partial}{\partial x} f(X_t).$$

Ako definiramo operator  $L = a \frac{\partial}{\partial x}$  onda vrijedi

$$f(X_t) = f(X_{t_0}) + \int_{t_0}^t Lf(X_{s_1}) ds_1, \quad t \in [t_0, T].$$

Iteracija jednadžbe daje:

$$\begin{aligned}
f(X_t) &= f(X_{t_0}) + \int_{t_0}^t L \left[ f(X_{t_0}) + \int_{t_0}^{s_1} Lf(X_{s_2}) ds_2 \right] ds_1 \\
&= f(X_{t_0}) + Lf(X_{t_0}) \int_{t_0}^t ds_1 + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^{s_1} L^2 f(X_{s_2}) ds_2 ds_1 \\
&= f(X_{t_0}) + Lf(X_{t_0})(t - t_0) + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^{s_1} L^2 f(X_{s_2}) ds_2 ds_1.
\end{aligned}$$

Nadalje, zamjenom  $f(X_{s_2})$  dobivamo

$$\begin{aligned}
L^2 f(X_{s_2}) &= L^2 \left[ f(X_{t_0}) + \int_{t_0}^{s_2} Lf(X_{s_3}) ds_3 \right] \\
&= L^2 f(X_{t_0}) + L^2 \int_{t_0}^{s_2} Lf(X_{s_3}) ds_3.
\end{aligned}$$

Vrijedi

$$\begin{aligned}
\int_{t_0}^t \int_{t_0}^{s_1} L^2 f(X_{t_0}) ds_2 ds_1 &= L^2 f(X_{t_0}) \int_{t_0}^t \int_{t_0}^{s_1} ds_2 ds_1 = L^2 f(X_{t_0}) \left[ \int_{t_0}^t s_1 ds_1 - \int_{t_0}^t t_0 ds_1 \right] \\
&= L^2 f(X_{t_0}) \left[ \frac{s_1^2}{2} \Big|_{t_0}^t - t_0(t - t_0) \right] = L^2 f(X_{t_0}) \left[ \frac{t^2}{2} - \frac{t_0^2}{2} - t_0 t + t_0^2 \right] \\
&= \frac{1}{2} L^2 f(X_{t_0}) (t^2 - 2t_0 t + t_0^2) = \frac{1}{2} L^2 f(X_{t_0}) (t - t_0)^2.
\end{aligned}$$

Iskoristimo li prethodno slijedi

$$f(X_t) = f(X_{t_0}) + Lf(X_{t_0})(t - t_0) + \frac{1}{2} L^2 f(X_{t_0})(t - t_0)^2 + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^{s_1} \int_{t_0}^{s_2} L^3 f(X_{s_3}) ds_3 ds_2 ds_1.$$

Za  $r + 1$  puta neprekidno diferencijabilnu funkciju klasična Taylorova formula (razvoj) je

$$f(X_t) = f(X_{t_0}) + \sum_{l=1}^r \frac{(t - t_0)^l}{l!} L^l f(X_{t_0}) + \int_{t_0}^t \dots \int_{t_0}^{s_r} L^{r+1} f(X_{r+1}) ds_{r+1} \dots ds_1,$$

za  $t \in [t_0, T]$  i  $r = 1, 2, 3, \dots$ . Ova formula se pokazala korisnom u teorijskim istraživanjima, a posebno u numeričkoj analizi.

Sada promatramo Stratonovichev stohastičku diferencijalnu jednadžbu

$$dX_t = \tilde{a}(X_t) dt + b(X_t) \circ dB_t,$$

gdje su  $\tilde{a}$  i  $b$  glatke funkcije i zadovoljavaju svojstvo ograničenog linearnog rasta. Odnosno, u integralnom obliku

$$X_t = X_0 + \int_0^t \tilde{a}(X_s) ds + \int_0^t b(X_s) \circ dB_s, \quad t \in [0, T].$$

Neka je  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  dva puta neprekidno diferencijabilna funkcija. Iz relacije (7) za funkciju  $f(x)$  slijedi

$$f(X_t) = f(X_0) + \int_0^t \tilde{a}(X_s) \frac{\partial}{\partial x} f(X_s) ds + \int_0^t b(X_s) \frac{\partial}{\partial x} f(X_s) \circ dB_s$$

i

$$f(X_{t_0}) = f(X_0) + \int_0^{t_0} \tilde{a}(X_s) \frac{\partial}{\partial x} f(X_s) ds + \int_0^{t_0} b(X_s) \frac{\partial}{\partial x} f(X_s) \circ dB_s,$$

za  $t \in [t_0, T]$  gdje je  $0 \leq t_0 < T$ . Oduzimanjem prethodnih jednakosti slijedi

$$\begin{aligned} f(X_t) - f(X_{t_0}) &= \int_0^t \tilde{a}(X_s) \frac{\partial}{\partial x} f(X_s) ds - \int_0^{t_0} \tilde{a}(X_s) \frac{\partial}{\partial x} f(X_s) ds \\ &\quad + \int_0^t b(X_s) \frac{\partial}{\partial x} f(X_s) \circ dB_s - \int_0^{t_0} b(X_s) \frac{\partial}{\partial x} f(X_s) \circ dB_s. \end{aligned}$$

Koristeći aditivnost integrala dobivamo

$$\begin{aligned} f(X_t) &= f(X_{t_0}) + \int_{t_0}^t \tilde{a}(X_s) \frac{\partial}{\partial x} f(X_s) ds + \int_{t_0}^t b(X_s) \frac{\partial}{\partial x} f(X_s) \circ dB_s \\ &= f(X_{t_0}) + \int_{t_0}^t L^0 f(X_s) ds + \int_{t_0}^t L^1 f(X_s) \circ dB_s, \end{aligned} \tag{8}$$

za  $t \in [t_0, T]$  i operatore

$$L^0 = \tilde{a} \frac{\partial}{\partial x}$$

i

$$L^1 = b \frac{\partial}{\partial x}.$$

Promotrimo jednadžbu (8) za različite  $f(x)$ .

Ako je  $f(x) = x$  onda je  $L^0 f = \tilde{a}$  i  $L^1 f = b$  pa dobivamo Stratonovichevsku jednadžbu

$$X_t = X_{t_0} + \int_{t_0}^t \tilde{a}(X_s) ds + \int_{t_0}^t b(X_s) \circ dB_s. \tag{9}$$

Ako je  $f(x) = \tilde{a}(x)$  dobivamo

$$\tilde{a}(X_t) = \tilde{a}(X_{t_0}) + \int_{t_0}^t L^0 \tilde{a}(X_s) ds + \int_{t_0}^t L^1 \tilde{a}(X_s) \circ dB_s. \tag{10}$$

Ako je  $f(x) = b(x)$  jednadžba (8) postaje

$$b(X_t) = b(X_{t_0}) + \int_{t_0}^t L^0 b(X_s) ds + \int_{t_0}^t L^1 b(X_s) \circ dB_s. \tag{11}$$

Ako jednadžbe (10) i (11) uvrstimo u (9) dobivamo

$$\begin{aligned} X_t &= X_{t_0} + \int_{t_0}^t \left( \tilde{a}(X_{t_0}) + \int_{t_0}^s L^0 \tilde{a}(X_z) dz + \int_{t_0}^s L^1 \tilde{a}(X_z) \circ dB_z \right) ds \\ &\quad + \int_{t_0}^t \left( b(X_{t_0}) + \int_{t_0}^s L^0 b(X_z) dz + \int_{t_0}^s L^1 b(X_z) \circ dB_z \right) \circ dB_s \\ &= X_{t_0} + \tilde{a}(X_{t_0}) \int_{t_0}^t ds + b(X_{t_0}) \int_{t_0}^t \circ dB_s + R, \end{aligned} \tag{12}$$

gdje je

$$R = \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s L^0 \tilde{a}(X_z) dz ds + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s L^1 \tilde{a}(X_z) \circ dB_z ds \\ + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s L^0 b(X_z) dz \circ dB_s + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s L^1 b(X_z) \circ dB_z \circ dB_s.$$

Možemo nastaviti razvoj. Za zadnji član ostatka  $R$  vrijedi

$$\int_{t_0}^t \int_{t_0}^s L^1 b(X_z) \circ dB_z \circ dB_s \\ = \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s \left( L^1 b(X_{t_0}) + \int_{t_0}^z L^0 L^1 b(X_u) du + \int_{t_0}^z L^1 L^1 b(X_u) \circ dB_u \right) \circ dB_z \circ dB_s, \quad (13)$$

pri čemu je korištena jednadžba (8) za  $f = L^1 b$ . Uočimo da vrijedi

$$L^0 \tilde{a} = \tilde{a} \frac{\partial}{\partial x} \tilde{a} = \tilde{a} \tilde{a}' \\ L^0 b = \tilde{a} \frac{\partial}{\partial x} b = \tilde{a} b' \\ L^1 \tilde{a} = b \frac{\partial}{\partial x} \tilde{a} = b \tilde{a}' \\ L^1 b = b \frac{\partial}{\partial x} b = b b'.$$

Tada za prvi član na desnoj strani jednakosti u (13) vrijedi

$$\int_{t_0}^t \int_{t_0}^s L^1 b(X_{t_0}) \circ dB_z \circ dB_s = b(X_{t_0}) b'(X_{t_0}) \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s \circ dB_z \circ dB_s.$$

Jednadžba (12) postaje

$$X_t = X_{t_0} + \tilde{a}(X_{t_0}) \int_{t_0}^t ds + b(X_{t_0}) \int_{t_0}^t \circ dB_s + b(X_{t_0}) b'(X_{t_0}) \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s \circ dB_z \circ dB_s + \tilde{R}, \quad (14)$$

gdje je

$$\tilde{R} = \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s L^0 \tilde{a}(X_z) dz ds + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s L^1 \tilde{a}(X_z) \circ dB_z ds + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s L^0 b(X_z) dz \circ dB_s \\ + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s \int_{t_0}^z L^0 L^1 b(X_u) du \circ dB_z \circ dB_s + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^s \int_{t_0}^z L^1 L^1 b(X_u) \circ dB_u \circ dB_z \circ dB_s.$$

Jednadžba (14) je Stratonovich-Taylorov razvoj.

## 7 Milsteinova aproksimacijska shema

Numeričko rješenje stohastičke diferencijalne jednačbe je slučajni proces koji aproksimira difuziju (rješenje stohastičke diferencijalne jednačbe). Neka je  $X = (X_t, t \in [0, T])$  jako rješenje stohastičke diferencijalne jednačbe

$$dX_t = \tilde{a}(X_t)dt + b(X_t) \circ dB_t, \quad t \in [0, T]. \quad (15)$$

Numeričko rješenje  $X^{(n)} = (X_t^{(n)}, t \in [0, T])$  stohastičke diferencijalne jednačbe (15) temelji se na subdiviziji  $\tau_n$  segmenta  $[0, T]$ ,

$$\tau_n : 0 = t_0 < t_1 < \dots < t_{n-1} < t_n = T.$$

Koristimo oznaku  $\delta_n = \max_{i=1, \dots, n} (t_i - t_{i-1}) = \max_{i=1, \dots, n} \Delta_i$  za maksimalni vremenski korak. Najčešće se razmatra ekvidistantna subdivizija, odnosno vrijedi  $\delta_n = \frac{T}{n}$ . Numeričko rješenje  $X^{(n)}$  računa se samo u točkama subdivizije  $\tau_n$ , a  $X_t^{(n)}$  na intervalu  $\langle t_{i-1}, t_i \rangle$  dobiven je linearnom interpolacijom točaka  $(t_{i-1}, X_{t_{i-1}}^{(n)})$  i  $(t_i, X_{t_i}^{(n)})$ , gdje su  $(X_{t_i}^{(n)}, t_i \in \tau_n)$  vrijednosti numeričkog rješenja u točkama subdivizije. Odnosno,

$$X_t^{(n)} = X_{t_{i-1}}^{(n)} + \frac{t - t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} (X_{t_i}^{(n)} - X_{t_{i-1}}^{(n)}), \quad t \in \langle t_{i-1}, t_i \rangle.$$

Promatramo stohastičku diferencijalnu jednačbu (15) u integralnom obliku

$$X_t = X_0 + \int_0^t \tilde{a}(X_s) ds + \int_0^t b(X_s) \circ dB_s, \quad t \in [0, T].$$

Za točke particije  $t_i \in \tau_n$ ,  $i \in \{1, \dots, n\}$ , možemo promatrati priraste  $(X_{t_i} - X_{t_{i-1}})$ , odnosno:

$$X_{t_i} = X_{t_{i-1}} + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \tilde{a}(X_s) ds + \int_{t_{i-1}}^{t_i} b(X_s) \circ dB_s, \quad i = 1, \dots, n. \quad (16)$$

Milsteinova aproksimacijska shema temelji se na Stratonovich-Taylorovom razvoju jednačbe (16). Prema jednačbi (14) dobivamo:

$$\begin{aligned} X_{t_i} = X_{t_{i-1}} &+ \tilde{a}(X_{t_{i-1}}) \int_{t_{i-1}}^{t_i} ds + b(X_{t_{i-1}}) \int_{t_{i-1}}^{t_i} \circ dB_s \\ &+ b(X_{t_{i-1}}) b'(X_{t_{i-1}}) \int_{t_{i-1}}^{t_i} \int_{t_{i-1}}^s \circ dB_z \circ dB_s + \tilde{R}, \end{aligned} \quad (17)$$

gdje je  $\tilde{R}$  odgovarajući ostatak. Prva dva integrala u (17) možemo riješiti. Vrijedi

$$\int_{t_{i-1}}^{t_i} ds = t_i - t_{i-1} = \Delta_i.$$

Prema Korolaru 3. za  $g(t) = t$  i aditivnosti integrala dobivamo

$$\int_{t_{i-1}}^{t_i} \circ dB_s = \int_0^{t_i} \circ dB_s - \int_0^{t_{i-1}} \circ dB_s = B_{t_i} - B_0 - B_{t_{i-1}} + B_0 = B_{t_i} - B_{t_{i-1}} = \Delta_i B.$$



Preostaje još riješiti dvostruki integral u (17). Iz Korolara 3. i aditivnosti integrala slijedi

$$\begin{aligned}
\int_{t_{i-1}}^{t_i} \int_{t_{i-1}}^s \circ dB_z \circ dB_s &= \int_{t_{i-1}}^{t_i} \left( \int_{t_{i-1}}^s \circ dB_z \right) \circ dB_s = \int_{t_{i-1}}^{t_i} (B_s - B_{t_{i-1}}) \circ dB_s \\
&= \int_{t_{i-1}}^{t_i} B_s \circ dB_s - B_{t_{i-1}} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \circ dB_s = \frac{1}{2} B_{t_i}^2 - \frac{1}{2} B_{t_{i-1}}^2 - B_{t_{i-1}} (B_{t_i} - B_{t_{i-1}}) \\
&= \frac{1}{2} B_{t_i}^2 - \frac{1}{2} B_{t_{i-1}}^2 - B_{t_{i-1}} B_{t_i} + B_{t_{i-1}}^2 = \frac{1}{2} B_{t_i}^2 + \frac{1}{2} B_{t_{i-1}}^2 - B_{t_{i-1}} B_{t_i} \\
&= \frac{1}{2} (B_{t_i}^2 + B_{t_{i-1}}^2 - 2B_{t_{i-1}} B_{t_i}) = \frac{1}{2} (B_{t_i} - B_{t_{i-1}})^2 = \frac{1}{2} (\Delta_i B)^2.
\end{aligned}$$

Zamijena slučajnih varijabli  $X_{t_i}$  komponentama numeričkog rješenja  $X_{t_i}^{(n)}$  daje motivaciju za definiranje Milsteinove aproksimacijske sheme. Milsteinova aproksimacijska shema:

$$X_0^{(n)} = X_0 \text{ i za } i = 1, \dots, n,$$

$$X_{t_i}^{(n)} = X_{t_{i-1}}^{(n)} + \tilde{a}(X_{t_{i-1}}^{(n)}) \Delta_i + b(X_{t_{i-1}}^{(n)}) \Delta_i B + \frac{1}{2} b(X_{t_{i-1}}^{(n)}) b'(X_{t_{i-1}}^{(n)}) (\Delta_i B)^2.$$

U sljedećim primjerima iskoristit ćemo Milsteinovu aproksimacijsku shemu za simulaciju trajektorije jakog rješenja Stratonovicheve stohastičke diferencijalne jednačbe.

**Primjer 8.** *Stratonovicheva stohastička diferencijalna jednačba u Primjeru 5. je oblika*

$$X_t = X_0 + \int_0^t X_s^m \circ dB_s, \quad m \in \mathbb{N} \setminus \{1\}. \quad (18)$$

Za simulaciju rješenja ove stohatičke diferencijalne jednačbe neka je  $X_0 = 0.2$  i  $m = 2$ . Za subdiviziju  $\tau_n$  neka vrijedi:

$$\delta_n = \frac{T - t_0}{n}, \quad n = 1000, \quad t_0 = 0 \text{ i } T = 1,$$

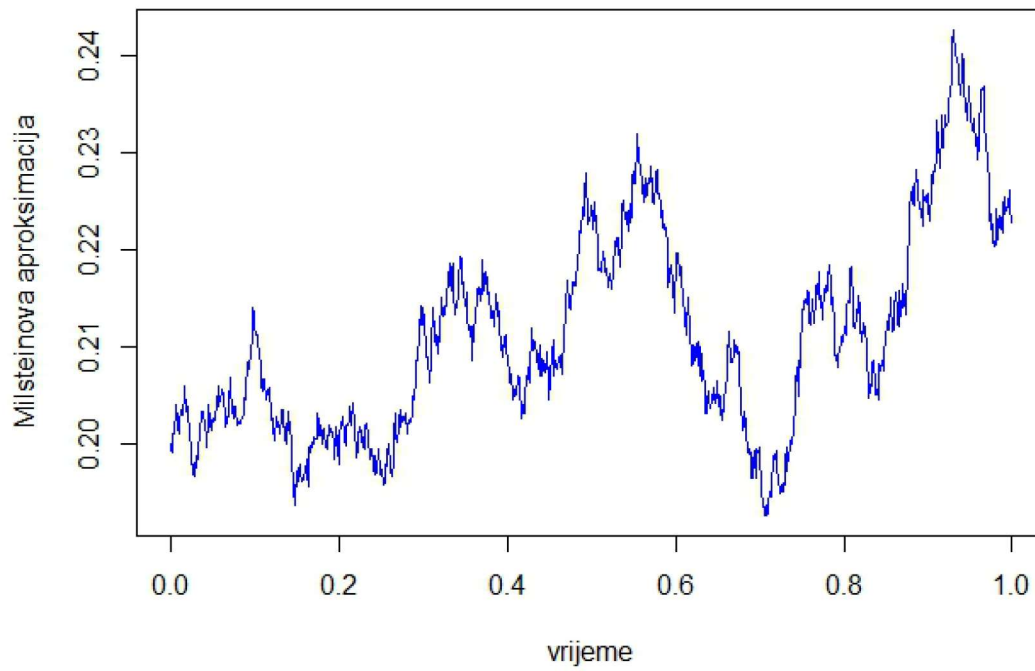
odnosno imamo ekvidistantnu subdiviziju koju promatramo na segmentu  $[0, 1]$  s vremenskim korakom  $\delta_{1000} = \frac{1}{1000}$ . Na Slici 1. prikazana je simulirana trajektorija procesa koji je rješenje ove Stratonovicheve stohastičke diferencijalne jednačbe.

**Primjer 9.** *U Primjeru 7. Stratonovicheva stohastička diferencijalna jednačba je*

$$X_t = \int_0^t \left[ q(X_s + 1) \right] ds + \int_0^t (X_s + 1) \circ dB_s, \quad (19)$$

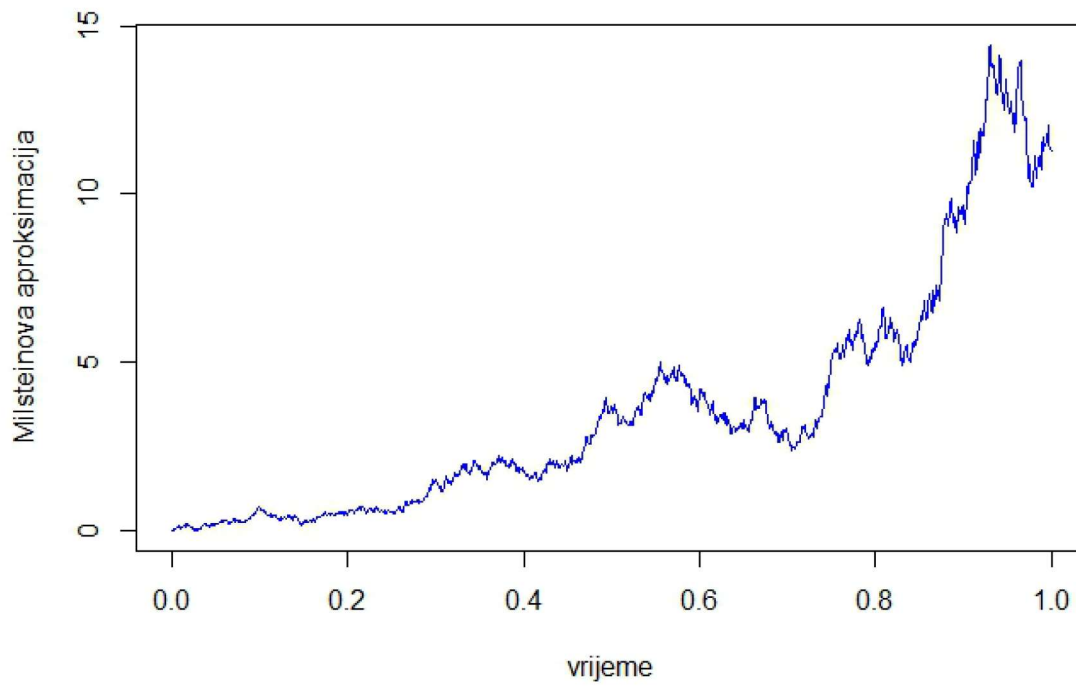
gdje je  $X_0 = 0$  i  $q$  konstanta. Na Slici 2. prikazana je simulirana trajektorija procesa koji je rješenje ove stohastičke diferencijalne jednačbe. Uzeli smo  $q = 2$  i ekvidistantnu subdiviziju  $\tau_n$  za koju vrijedi  $\delta_n = \frac{T-t_0}{n}$ ,  $n = 1000$ ,  $t_0 = 0$  i  $T = 1$ .

### Numeričko rješenje



Slika 1. Jedna trajektorija numeričkog rješenja stohastičke diferencijalne jednačbe (18)

### Numeričko rješenje



Slika 2. Jedna trajektorija numeričkog rješenja stohastičke diferencijalne jednačbe (19)

## Literatura

- [1] T. Mikosch, Elementary Stochastic Calculus With Finance in View, World Scientific, 1998.
- [2] R.L. Schilling, L. Partzsch, Brownian Motion, An Introduction to Stochastic Processes, De Gruyter, 2014.
- [3] P.E. Kloeden, E. Platen, Numerical Solution of Stochastic Differential Equations, Springer, 1992.
- [4] D. Cai, Stochastic volatility models, New York University, bilješke s predavanja

## Sažetak

U ovom diplomskom radu proučavana je Stratonovičeva stohastička diferencijalna jednačba. Najprije je definirano Brownovo gibanje koji je pogonski proces Stratonovičeve stohastičke diferencijalne jednačbe i navedena su bitna svojstva tog procesa. Definirani su Itôv i Stratonovičev stohastički integral. Pokazano je da Stratonovičev stohastički integral formalno zadovoljava pravilo za derivaciju kompozicije funkcija. Navedena je formula koja povezuje Itôv i Stratonovičev stohastički integral i služi za prelazak s Itôve stohastičke diferencijalne jednačbe na Stratonovičevu stohastičku diferencijalnu jednačbu. Navedeni su primjeri u kojima je dan postupak rješavanja Itôve stohastičke diferencijalne jednačbe pomoću ekvivalentne Stratonovičeve stohastičke diferencijalne jednačbe. Izveden je Stratonovich-Taylorov razvoj koji je temelj za Milsteinovu aproksimacijsku shemu. Na kraju su navedeni primjeri u kojima se koristi Milsteinova aproksimacijska shema za simulaciju trajektorije jakog rješenja Stratonovičeve stohastičke diferencijalne jednačbe.

## Ključne riječi

Stratonovičev stohastički integral, Stratonovičeva stohastička diferencijalna jednačba, Stratonovich-Taylorov razvoj, Milsteinova aproksimacijska shema

# Stratonovich stochastic differential equations

## Abstract

This paper studies Stratonovich stochastic differential equation. First, Brownian motion is defined, which is the driving process of Stratonovich's stochastic differential equation, and the essential properties of that process are listed. Itô's and Stratonovich's stochastic integrals are defined. It is shown that the Stratonovich stochastic integral formally satisfies the chain rule. A formula that connects Itô's and Stratonovich's stochastic integral is given and is used to transition from Itô's stochastic differential equation to Stratonovich's stochastic differential equation. Examples in which the procedure for solving Itô's stochastic differential equation using the equivalent Stratonovich stochastic differential equation are given. The Stratonovich-Taylor expansion is derived, which is the basis for the Milstein approximation scheme. Finally, examples in which the Milstein approximation scheme is used to simulate the trajectory of a strong solution of the Stratonovich stochastic differential equation are given.

## Keywords

Stratonovich stochastic integral, Stratonovich stochastic differential equation, Stratonovich-Taylor expansion, Milstein approximation scheme

## Životopis

Rođena sam 27. ožujka 1999. u Osijeku. Osnovnu školu "August Harambašić" u Donjem Miholjcu pohađala sam u razdoblju od 2006. do 2014. godine. Iste godine upisujem opću gimnaziju u srednjoj školi u Donjem Miholjcu koju završavam 2018. godine. Tijekom srednjoškolskog obrazovanja dva puta sam sudjelovala na županijskom natjecanju iz matematike. Po završetku srednje škole, 2018. godine upisujem preddiplomski studij Matematika na Odjelu za matematiku Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku. Preddiplomski studij završavam 2021. godine s temom završnog rada "Nizovi funkcija" pod mentorstvom prof. dr. sc. Dragana Jukića. Iste godine upisujem diplomski studij Financijska matematika i statistika na Odjelu za matematiku u Osijeku.