

Kırıkkale Üniversitesi



PID VE SLIDING MODE ARACILIĞIYLA FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTOR HIZ KONTROLÜ

Hazırlayan: Nelson Luis Manuel

Birim/Bölüm: FBE/Elektrik-Elektronik Müh.(YL/Tezli)

Ders: Elektrik Motorlarının Denetimi

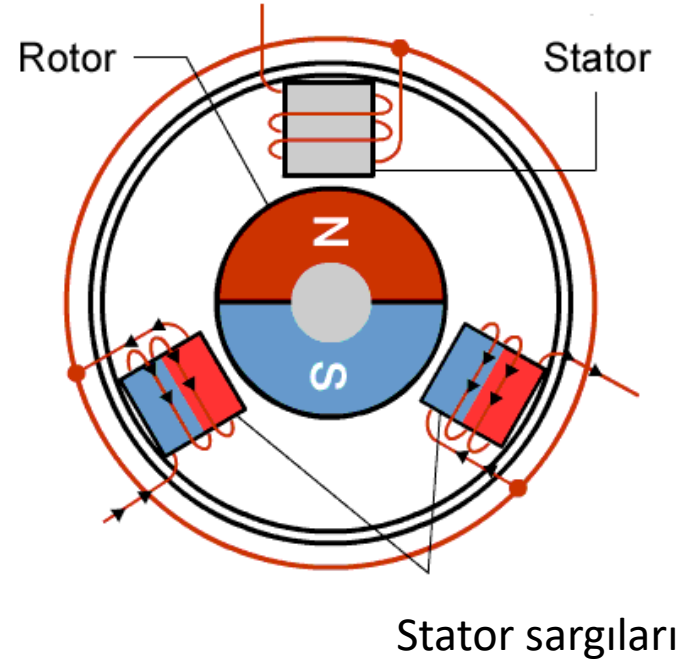
- ① **Firçasız Doğru Akım Elektrik Motoru (FDAM)**-Tanım ve matematiksel model.
- ② **PID Kontrol**-Tanım, çalışma prensibi ve Matlab'deki simülasyonların sonuçları.
- ③ **Sliding Mode Kontrol (SMC)**-Tanım ve simülasyonların sonuçları.
- ⑤ **PID vs SMC**
- ⑤ **Sonuçlar**
- ⑥ **Kaynakça**

- ① Fırçasız doğru akım elektrik motorunun matematiksel modelinin tanımı.
- ② FDAM için PID denetleyicisinin projeksiyonu ve simülasyonu.
- ③ FDAM için SMC denetleyicisinin projeksiyonu ve simülasyonu.

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM ELEKTRİK MOTORU

TANIM

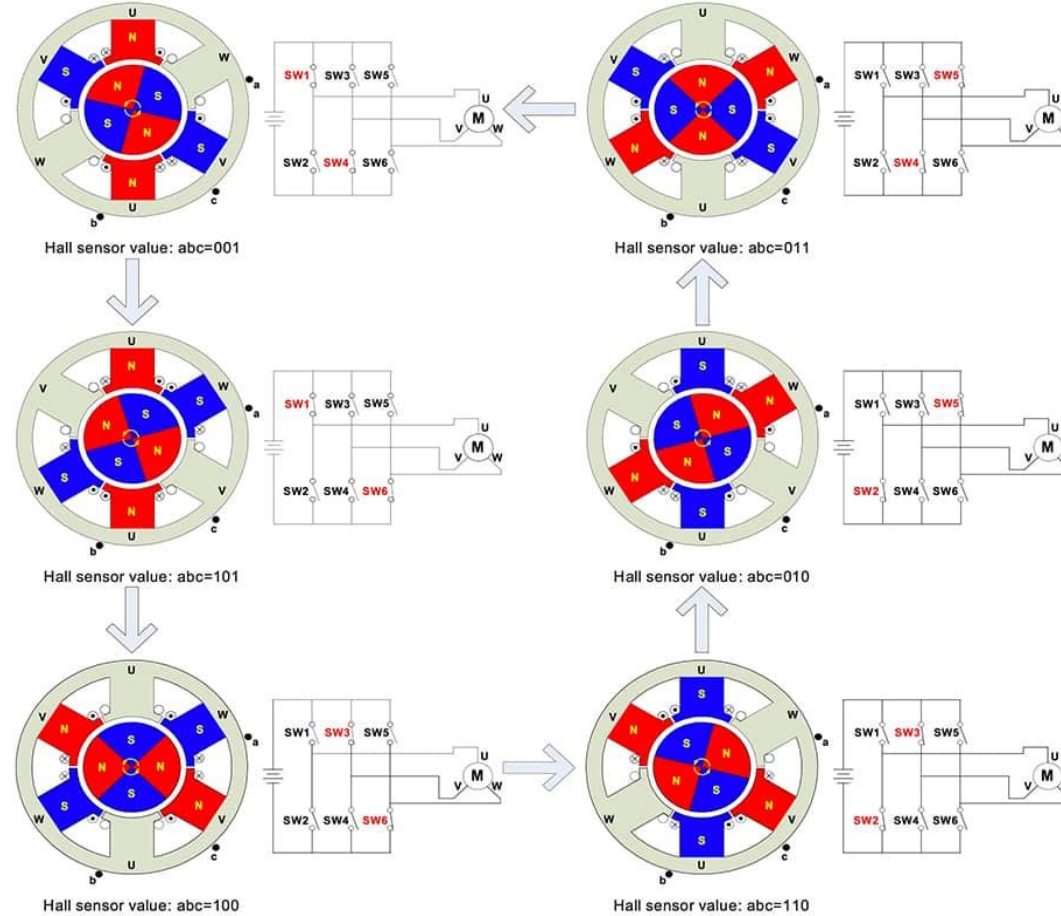
Fırçasız doğru akım motorlar(FDAM), normalde düşük voltaj olan doğru akım gücü aracılığıyla bir invertör (drive) tarafından çalıştırılan senkronize elektrik motorlarıdır.



Şekil 1: Fırçasız DC motor.

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM ELEKTRİK MOTORU

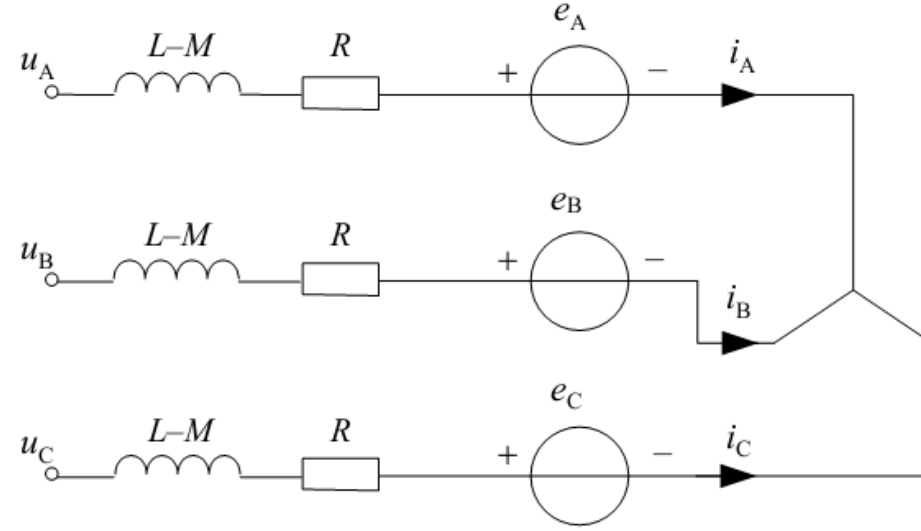
ÇALIŞMA PRENSİBİ



Şekil 2: Fırçasız DC motor çalışması.

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM ELEKTRİK MOTORU

MATEMATİKSEL MODEL



Şekil 3: FDAM'un devresi.

$$u_A = Ri_A + (L - M) \frac{di_A}{dt} + e_A \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM ELEKTRİK MOTORU

MATEMATİKSEL MODEL

Fırçasız doğru akım motorların birçok pratik uygulamasında, stator sargıları Y bağlantılıdır. Nötr noktası yoktur, böylece faz voltajlarının tespit edilmesi zor olur. Bu nedenle, faz voltajına dayalı matematiksel model bazı durumlarda uygulanamaz. Faz-faz voltajının ölçülmesi kolaydır [2].

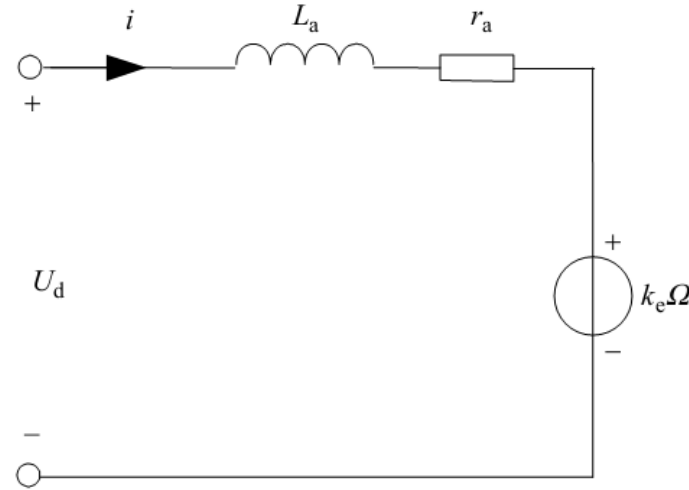
$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{BC} \\ u_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -R & 0 \\ 0 & R & -R \\ -R & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & M-L & 0 \\ 0 & L-M & M-L \\ M-L & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A - e_B \\ e_B - e_C \\ e_C - e_A \end{bmatrix} \quad (4)$$



FIRÇASIZ DOĞRU AKIM ELEKTRİK MOTORU

MATEMATİKSEL MODEL



Şekil 4: iki faz sargısı uyarılmış FADM'un devresi.

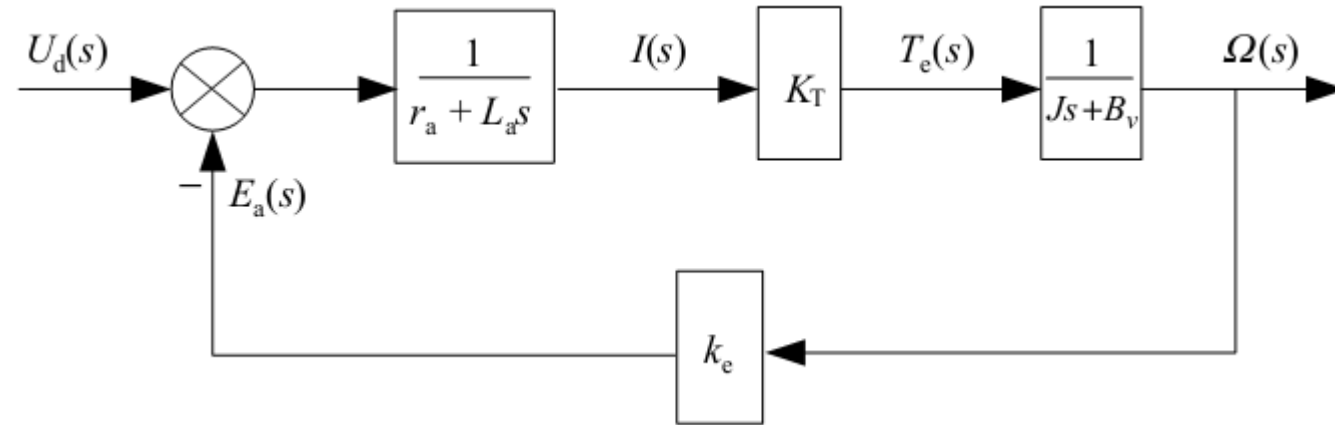
$$u_{AB} = U_d = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + 2e_A = r_a i + L_a \frac{di}{dt} + k_e \Omega \quad (5)$$

$$T_e = 2p\psi_m i_A = K_T i \quad (6)$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} + B_v \Omega \quad (7)$$

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM ELEKTRİK MOTORU

TRANSFER FONKSİYON-YÜKSÜZ

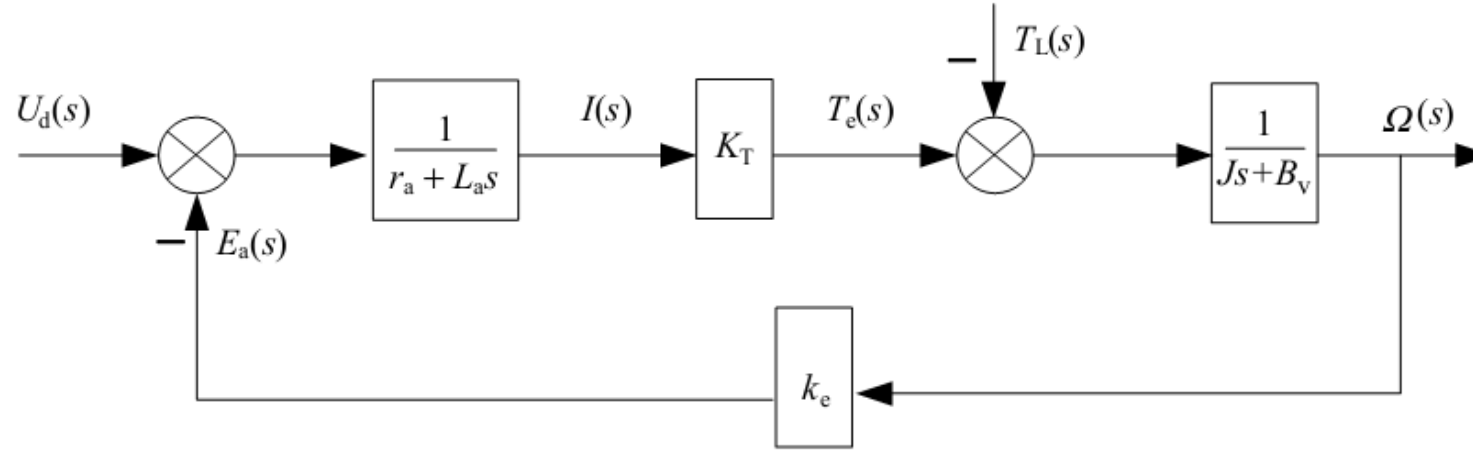


Şekil 5: FDAM kontrol sisteminin yüksüz yapısı.

$$G_u(s) = \frac{\Omega(s)}{U_d(s)} = \frac{K_T}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + k_e K_T)} \quad (8)$$

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM ELEKTRİK MOTORU

TRANSFER FONKSİYON-YÜKLÜ



Şekil 6: FDAM kontrol sisteminin yüklü yapısı.

$$\begin{aligned} G_L(s) &= \frac{\Omega(s)}{T_L(s)} = -\frac{r_a + L_a s}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + k_e K_T)} \\ \Omega(s) &= G_u(s) U_d(s) + G_L(s) T_L(s) \\ &= \frac{K_T U_d(s)}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + k_e K_T)} - \frac{(r_a + L_a s) T_L(s)}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + k_e K_T)} \end{aligned} \quad (9)$$



FIRÇASIZ DOĞRU AKIM ELEKTRİK MOTORU

SİMÜLASYONLARDA KULLANILACAK MOTORUN ÖZELLİKLERİ

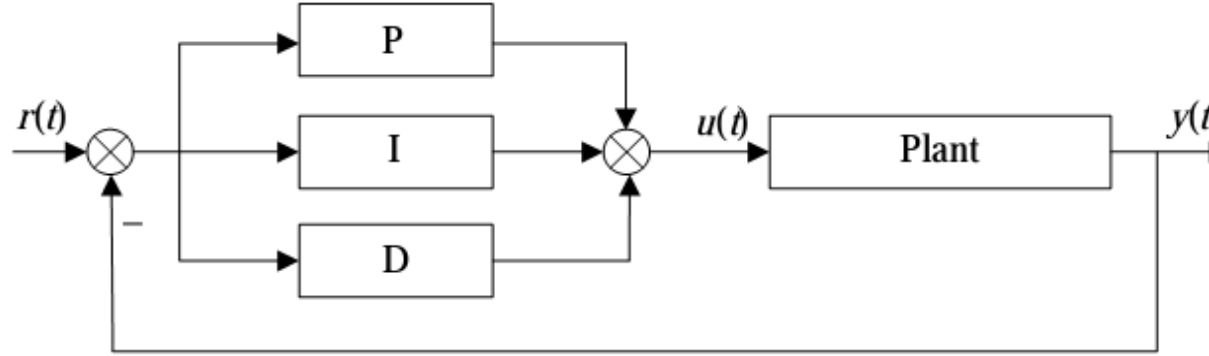
Brand Name/Model Number: OWO/OWM86BLS125			
Parameters	Symbols	Default Values	Unities
Number of poles	N	8	Number of poles
Number of phase	Nphase	3	Number of phase
Rated voltage	Vr	48	Volt
Rated speed	ws	3000	RPM
Rated torque	Te	2,1	N.m
Rated power	Pr	660	W
Peak torque	Pt	6,3	N.m
Peak current	Pc	55	A
Line to line resistance	R	0,16	Ohms
Line to line inductance	L	0,30	mH
Torque constant	Kt	0,11	Nm/A
Back E.M.F	e	11,5	Volt
Moment of inertia	J	0,012	kg.m ² /s ²
Viscous friction	B	0,003	Nms
Back E.M.F constant	Te	0,11	Vs/rad
Load Torque	TL	ND	N.m
Angular velocity	ω	314,16	rad/s

Tablo 1: Kullanılacak motorun parametreleri.



PID KONTROL

TANIM



Şekil 7: PID kontrolörünün blok diyagramı

$U(t)$ çıkış sinyali olarak tanımlayarak, PID algoritması şu şekilde tanımlanabilir:

$$u(t) = K_P \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (10)$$

$K_p \rightarrow$ Oransal kazanç

$K_i \rightarrow$ Integral kazanç

$K_d \rightarrow$ Türev Kazanç

$r(t) \rightarrow$ Ayar noktası

$Y(t) \rightarrow$ Ölçülen proses sinyali

$e(t) \rightarrow$ Hata sinyali



PID KONTROL

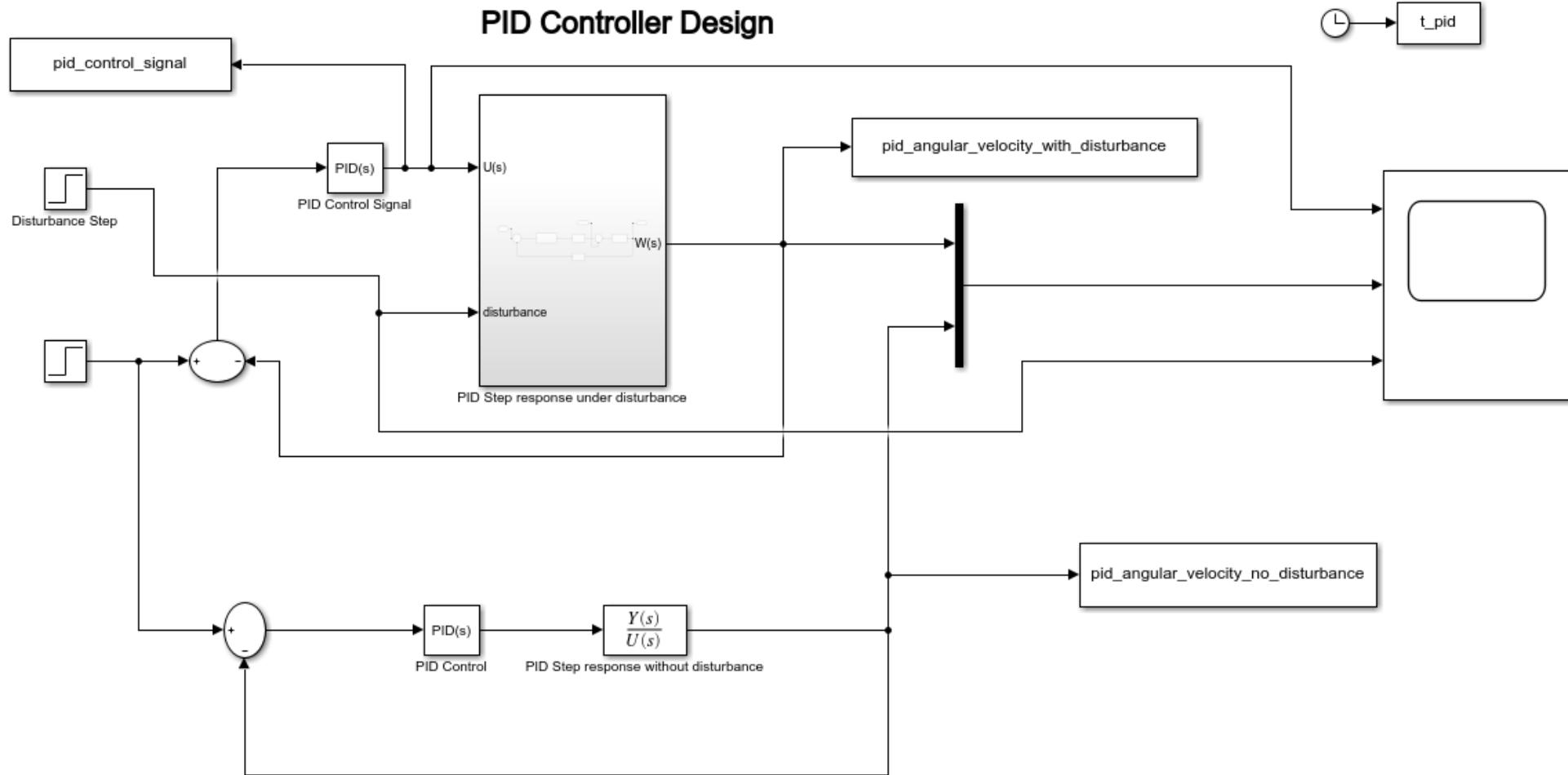
PID AYARLAMA YÖNTEMLERİ

- ① Manüel ayarlama
- ② Ziegler – Nichols
- ③ Tyreus Luyben
- ④ Yazılım araçları (Matlab Automatic Tuning Tool)
- ⑤ Cohen–Coon
- ⑥ Åström-Hägglund



PID KONTROL

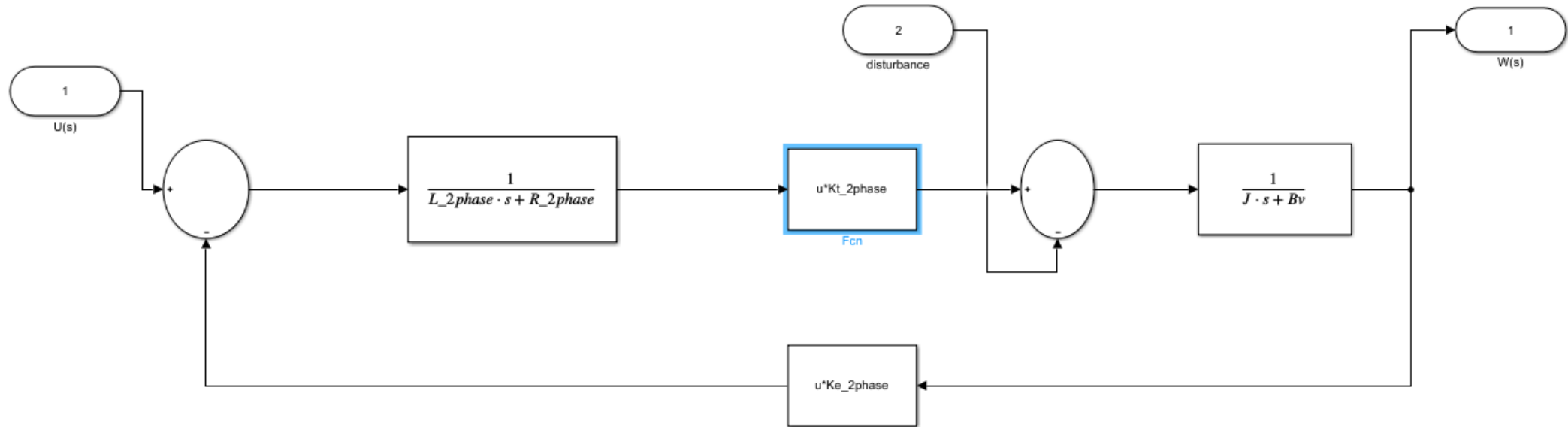
MATLAB'DA SİMÜLASYON



Şekil 8: Matlab'da yapılan PID kontrollü fırçasız DC motorun blok diyagramı

PID KONTROL

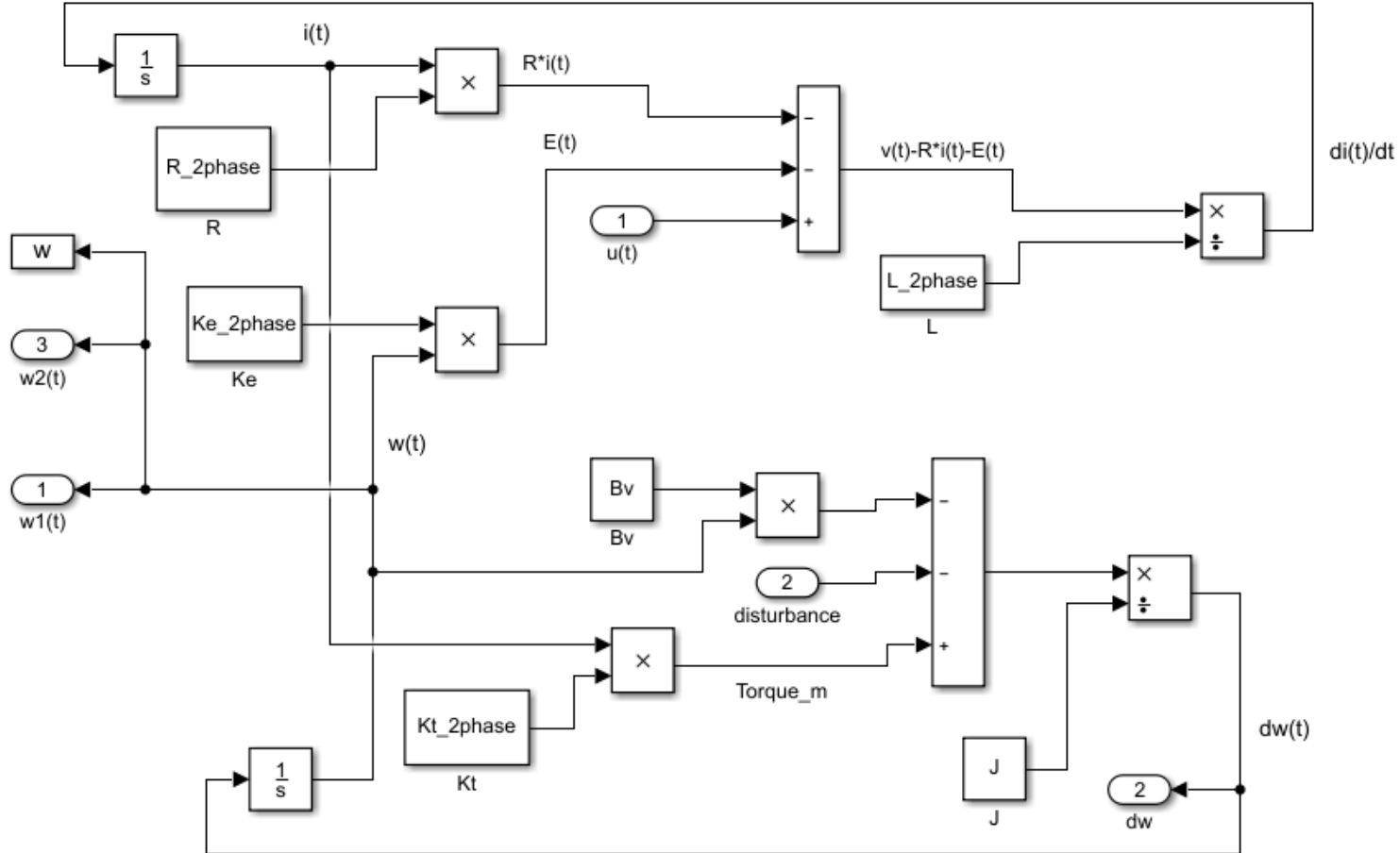
MATLAB'DA SİMÜLASYON



Şekil 9: FDAM'un blok diyagramı (frequence domain).

SLIDING MODE KONTROL

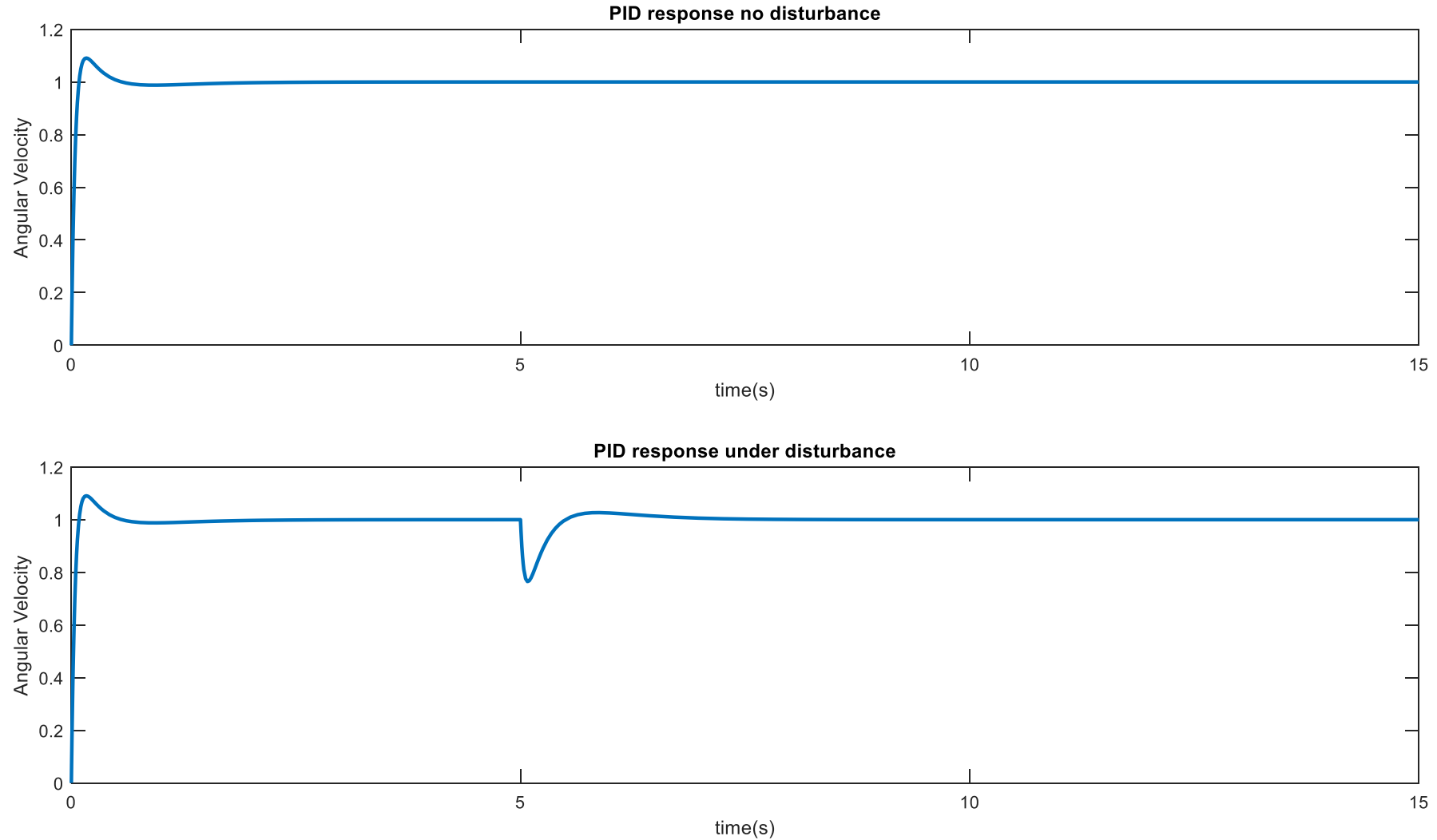
MATLAB'DA SİMÜLASYON



Şekil 10: FDAM'un blok diyagramı (time domain).

PID KONTROL

MATLAB'DA SİMÜLASYON

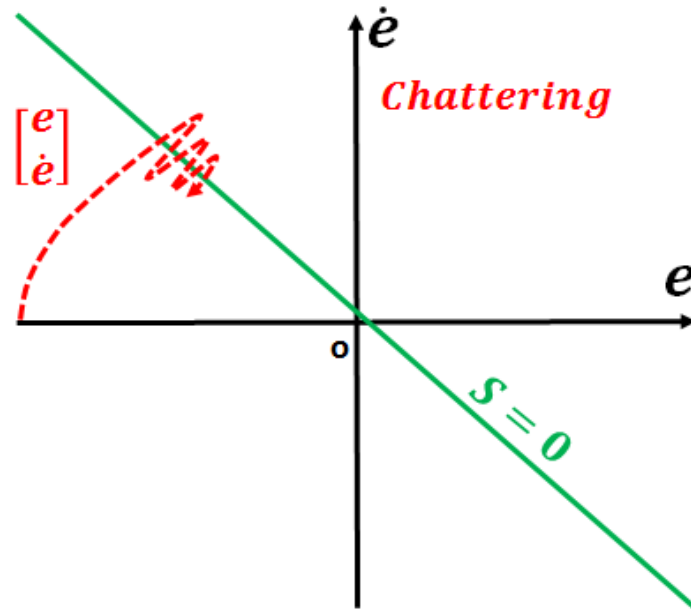


Şekil 11: MATLAB'da PID denetleyicinin performansı.

SLIDING MODE KONTROL

TANIM

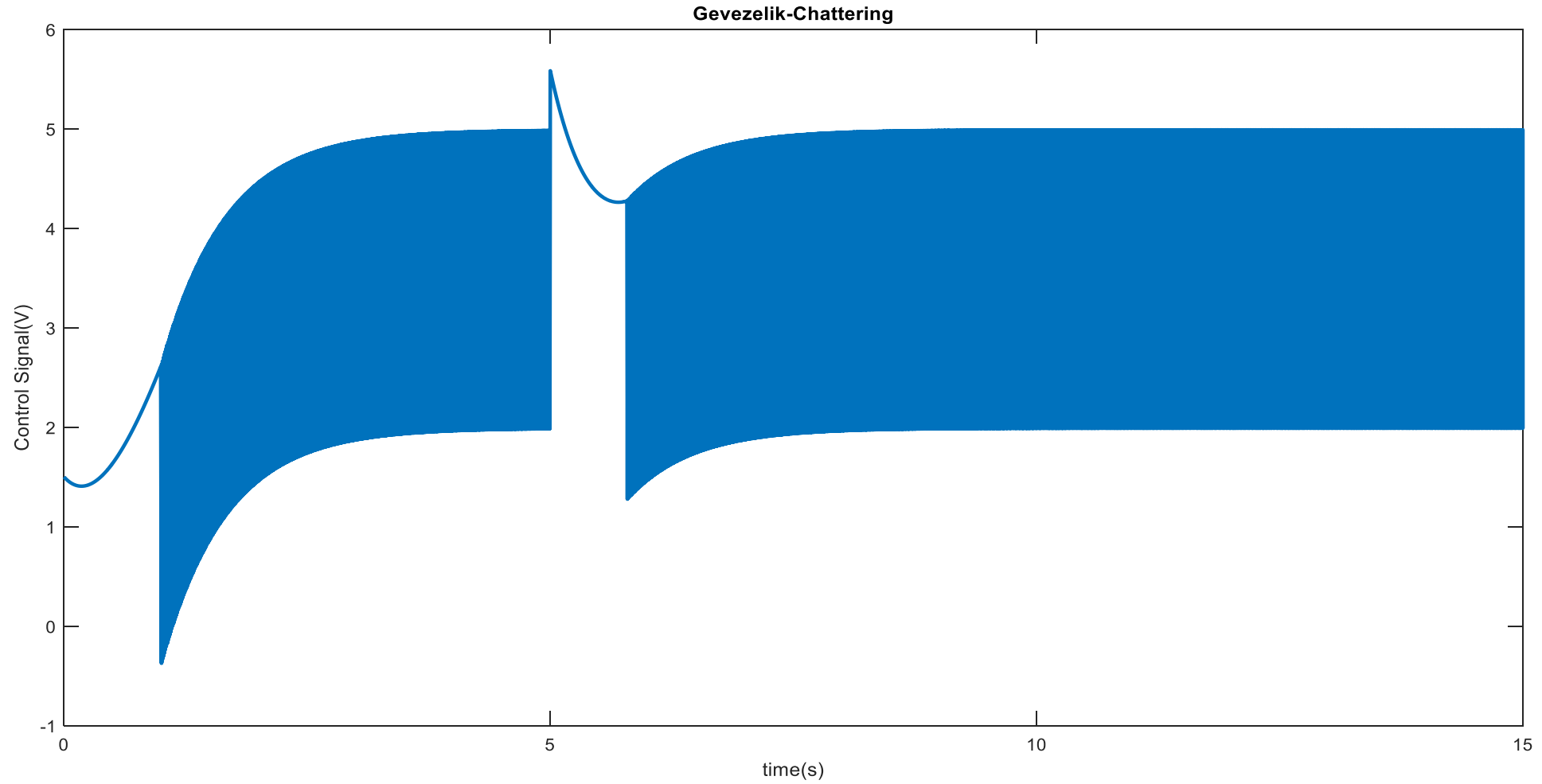
Kontrol sistemlerinde, Sliding Mode Control (SMC), sistemi "kaymaya" zorlayan bir set kontrol sinyali uygulamasıyla doğrusal olmayan bir sistemin dinamiklerini değiştiren doğrusal olmayan bir kontrol yöntemidir. Sliding mode'nin avantajlarından biri, Sliding modunun sistem bozukluğuna ve karışıklığa karşı iyi bir adaptif kabiliyete sahip olmasıdır.



Şekil 12: Sliding Mode Kontrolünün arkasındaki ana fikir.

SLIDING MODE KONTROL

GEVEZELİK-CHATTERING



Şekil 13: Gevezelik – Chattering.

SLIDING MODE KONTROL

SLIDING MODE'NİN DENKLEMLERİ

$$\left(\begin{array}{l} X_1 = \omega(t) \quad Y = X_1 = \omega(t) \\ X_2 = \dot{X}_1 = \dot{\omega}(t) \quad u = e_a(t) \\ \dot{X}_2 = \ddot{\omega}(t) \\ M_1 = \frac{K_t}{J L_a}, \quad M_2 = \frac{R_a}{L_a}, \quad M_3 = \frac{B}{J}, \quad M_4 = \frac{K_b K_t}{J L_a} \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{(r_a J + B_v L_a)}{L_a J} x_2 - \frac{(B_v r_a + k_e K_T)}{L_a J} x_1 + \frac{K_T}{L_a J} u - \frac{r_a T_L}{L_a J} \end{array} \right. \right) \quad (11)$$

$$\left(\begin{array}{l} u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \\ u_{sw}(t) = K \operatorname{sgn}(s) \\ \operatorname{sgn}(s(t)) = \begin{cases} +1, & \text{if } s(t) > 0 \\ 0, & \text{if } s(t) = 0 \\ -1, & \text{if } s(t) < 0 \end{cases} \end{array} \right) \quad (12)$$

$$\left(\begin{array}{l} s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(t) \\ s = C X_1 + X_2 \\ s = C e + \dot{e} = C(\omega_r - \omega) + \dot{\omega}_r - \dot{\omega} \\ \dot{s} = C(\dot{\omega}_r - \dot{\omega}) + \ddot{\omega}_r - \ddot{\omega} = 0 \\ \dot{s} = C(-\dot{\omega}) - \ddot{\omega} = 0 \\ \dot{s} = C(-\dot{\omega}) - \ddot{\omega} = -K \operatorname{sgn}(s) \end{array} \right) \quad (13)$$

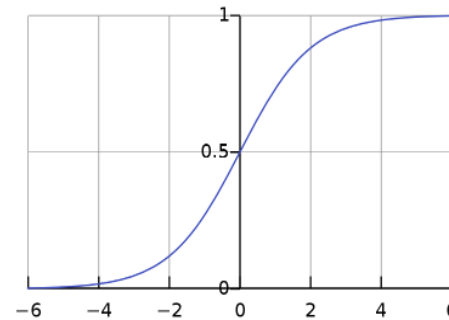
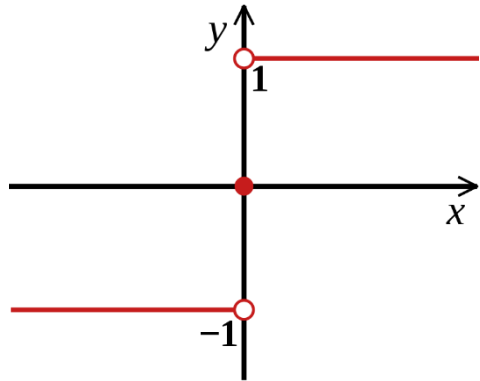
$$\left(\begin{array}{l} V = \frac{1}{2} s^2 \\ V(0) = 0 \\ s > 0 \\ V(s) > 0 \\ \dot{V} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \\ s\dot{s} \leq -\eta |s| \\ s\dot{s} \leq -\eta \operatorname{sgn}(s) s \end{array} \right) \quad (14)$$



SLIDING MODE KONTROL

FDAM İÇİN KONTROL SİNYALİ & CHATTERİNG

$$u = \frac{1}{M_1} [(M_2 + M_3 - C)\dot{\omega} + (M_2 \cdot M_3 + M_4)\omega + \ddot{\omega}_r + C \cdot \dot{\omega}_r + \underline{K s \operatorname{sgn}(s)}] \quad (15)$$



$$\theta(s) = \frac{s}{|s| + \delta}$$

$$u = \frac{1}{M_1} \left[(M_2 + M_3 - C)\dot{\omega} + (M_2 \cdot M_3 + M_4)\omega + \ddot{\omega}_r + C \cdot \dot{\omega}_r + \frac{s}{|s| + \delta} \right] \quad (16)$$

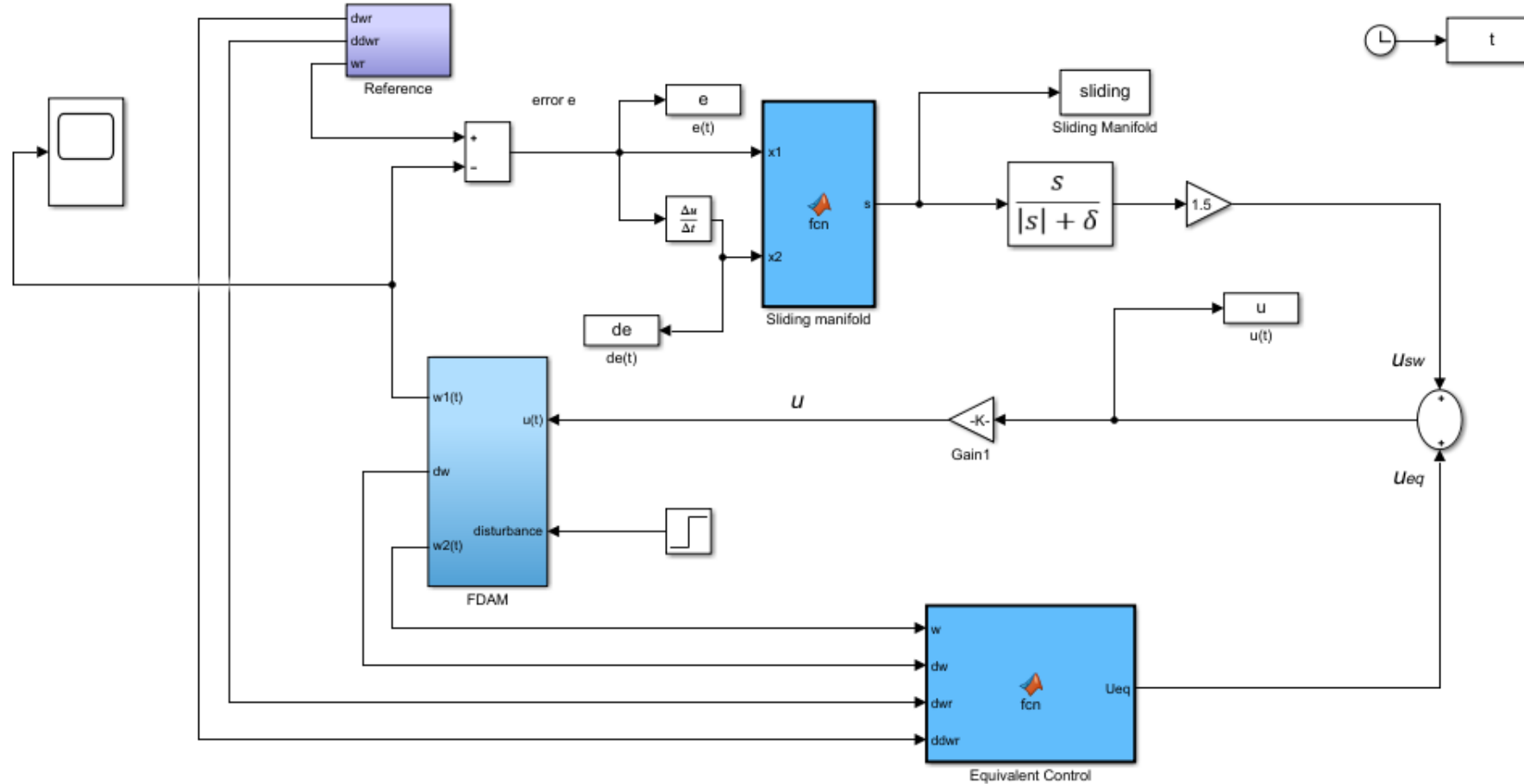
$$0 < \delta < 1$$



SLIDING MODE KONTROL

MATLAB'DA SİMÜLASYON

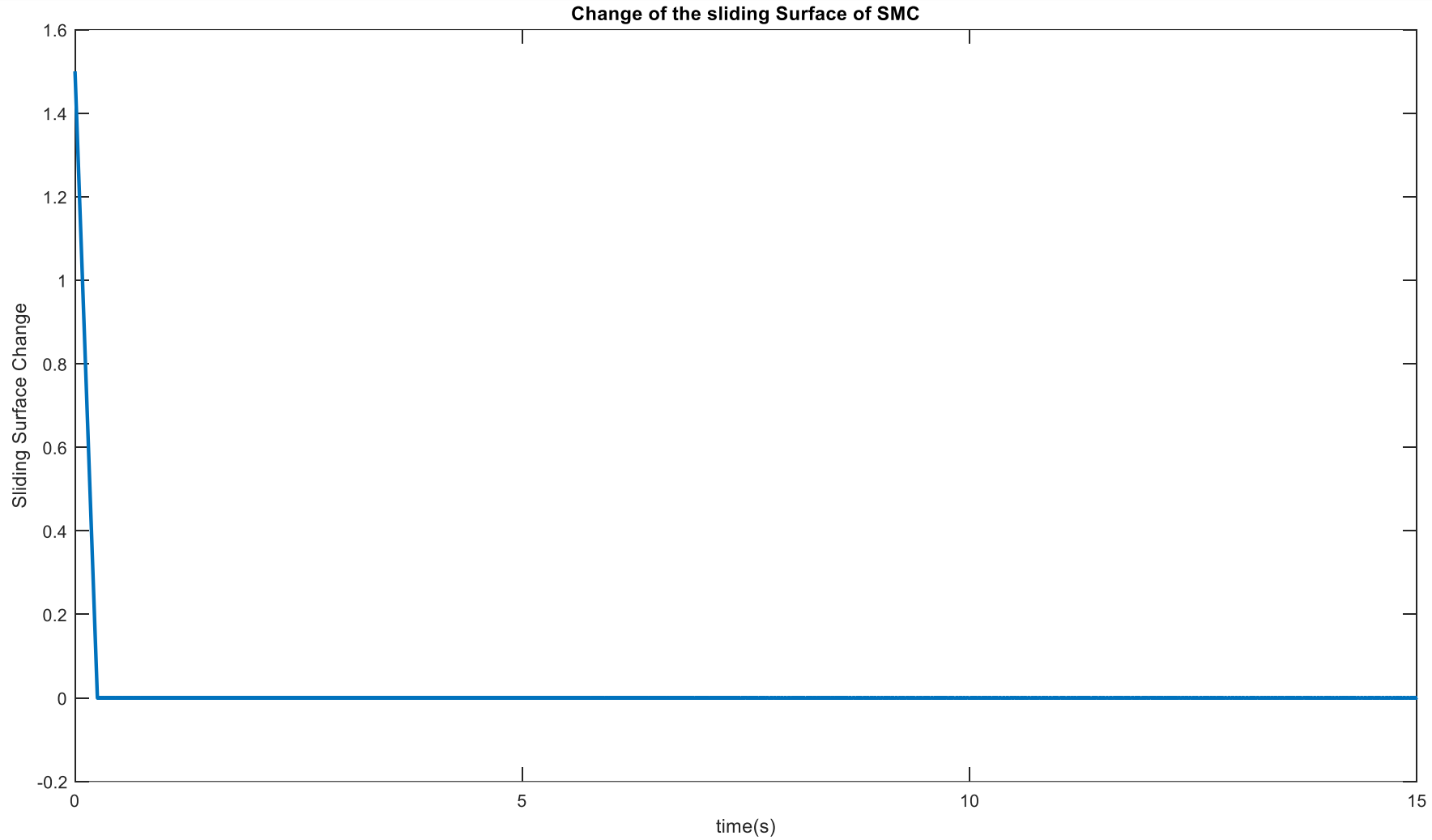
Robust Controller Design: Sliding Mode



Şekil 14: Matlab'da yapılan SMC kontrollü fırçasız DC motorun blok diyagramı.

SLIDING MODE KONTROL

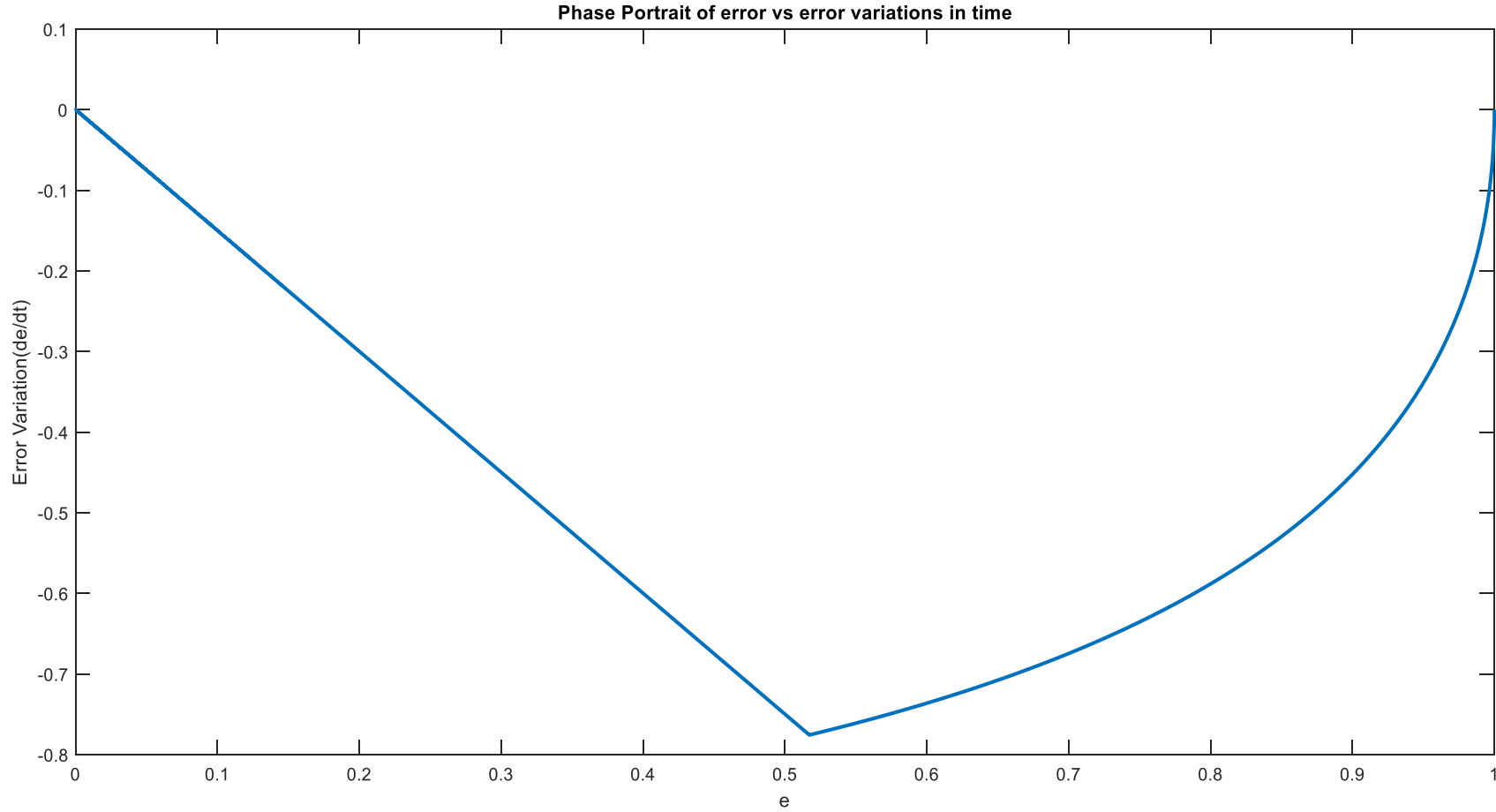
MATLAB'DA SİMÜLASYON



Şekil 15: SMC'un Sliding Surface sonucu.

SLIDING MODE KONTROL

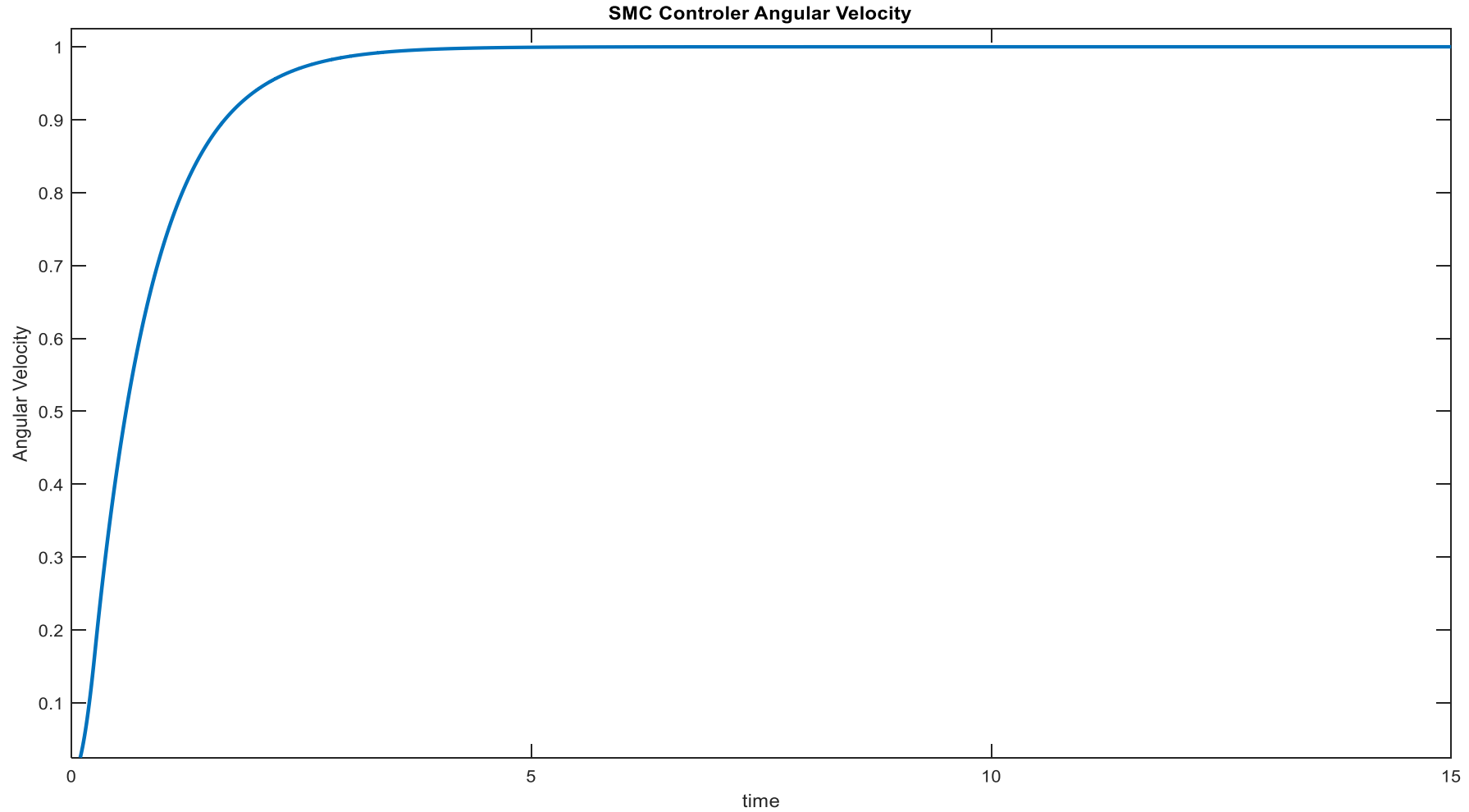
MATLAB'DA SİMÜLASYON



Şekil 16: Denge bölgesine kadar hata azaltması.

SLIDING MODE KONTROL

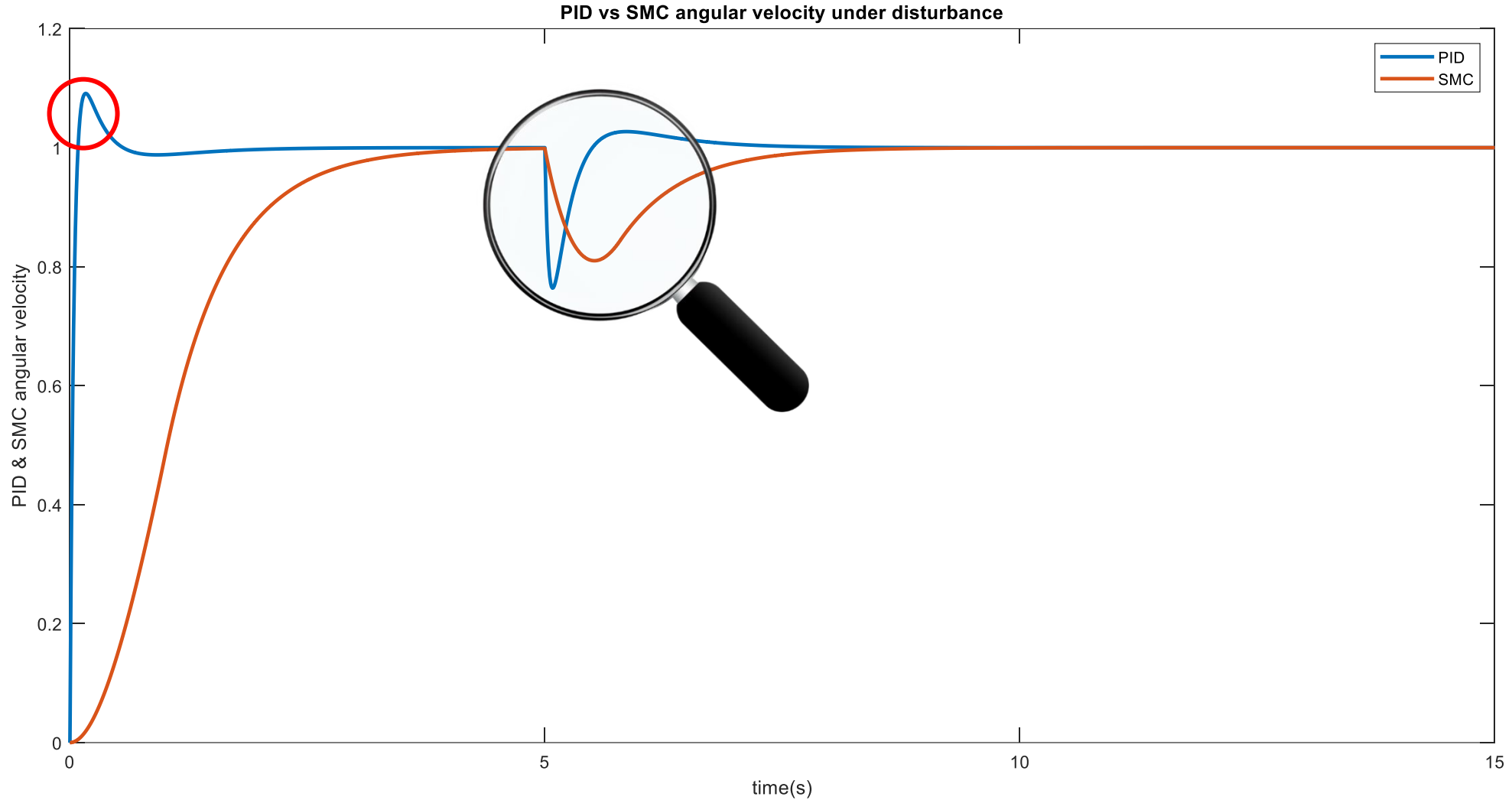
MATLAB'DA SİMÜLASYON



Şekil 17: MATLAB'da Sliding Mode denetleyicinin performansı.

PID VS SMC KONTROL

MATLAB'DA SİMÜLASYON



Şekil 18: Bozulma durumlarında PID ve SMC performansının karşılaştırılması.

SONUÇLAR

Bu sunumda, fırçasız doğru akım motorun PID ve SMC aracılığıyla hız kontrolü ele alındı.

Simülasyonlara göre, PID denetleyicisinin hızlı bir yanıt verdiği ancak aynı zamanda daha dalgalı olduğu(özellikle kalkışta ve rahatsızlıkların varlığında) fark edildi.

Bu hızlı yanıtın sonucu, Sliding Modu Kontrolüne kıyasla daha fazla overshoot ve stabilite noktasına (ayar noktası) ulaşmada gecikmeye neden olur. Buna rağmen, PID kontrolörü, basitliği ve pratikliği nedeniyle en çok kullanılanlardan biridir ve hız değişimlerinin çok önemli bir faktör olmadığı uygulamalarda ideal olabilir.

Öte yandan, SMC hem başlangıçta hem de parazitlerin varlığında daha pürüzsüzdür. Bu pürüzsüzlüğün sonucu, ayar noktasından daha büyük zirvelere sahip olmamasıdır. Bu nedenle, ani değişikliklere duyarlı ekipmanların sağlam kontrolünün ve korunmasının istendiği uygulamalarda, Sliding Modu iyi bir seçenek olduğunu kanıtlıyor.

Son olarak, burada yapılan karşılaştırmaların nihai olmadığını ve matlab'daki simülasyonlara ve bu sunumun kaynakçasında bulunan kitapların okunmasına dayanılarak yapıldığını vurgulamak isterim.



- [1] J. Liu and X. Wang, Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems. 2011.
- [2] C. L. Xia, Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls. 2012.
- [3] O. J. Oguntoyinbo, "Pid Control of Brushless Dc Motor and Robot Trajectory Planning and Simulation With," 2009.
- [4] E. H. Dursun, M. L. Levent, A. Durdu, and Ö. Aydoğdu, "Speed Control of a Variable Loaded DC Motor by Using Sliding Mode and Iterative Learning Control," Int. J. Electr. Energy, vol. 5, no. 1, pp. 22–28, 2017, doi: 10.18178/ijoe.5.1.22-28.
- [5] J. A. Farrell and M. M. Polycarpou, Adaptive Approximation Based Control: Unifying Neural, Fuzzy and Traditional Adaptive Approximation Approaches. 2006.
- [6] <https://www.digikey.be//media/Images/Article%20Library/TechZone%20Articles/2016/December/How%20to%20Power%20and%20Control%20Brushless%20DC%20Motors/article-2016december-how-to-power-and-fig3-fullsize.jpg?la=en&ts=bd18e708-bf63-4091-964e-9dffa9a41b50>



Teşekkür ederim

Nelson Luís Manuel

E-posta: 198804001@kku.edu.tr / nelsonluismanuel@gmail.com