

## Dış Kavite Diyot Lazeri için PID Tasarım Simülasyonu

Hatice AKMAN<sup>1</sup>, Umut TİLKI<sup>2</sup>, İsmail BAYRAKLI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Müh. Bölümü, Isparta

<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Hab. Müh. Bölümü, Isparta

<sup>3</sup> Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, Aksaray

**Özet:** Frekansları sabitlenmiş ve dar çizgi genişliğine sahip diyot lazerler, hassas atomik ve moleküler spektroskopi, lazer soğutma, kuantum hafıza, atomik saatler ve atom interferometresi gibi birçok uygulama için oldukça önemlidir. Bir lazer diyotunun hat genişliği genellikle megahertz bölgesindedir, ancak dış kavite diyot lazer konfigürasyonunun oluşturulması ile birkaç kilohertze düşürülebilir. Buna ek olarak gürültü söndürmek için PID denetleyicileri kullanılmaktadır. Çalışmamızda dış kavite diyot lazeri deneysel ortamda oluşturularak lazer elde edilmiş, oluşturulan lazer dataları MATLAB-Simulink ortamına aktararak, gürültü söndürme amaçlı PI tasarım simülasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. MATLAB-Simulink programı ile lazer frekans kararlılığının sağlanması için PID tasarımı alanında yeni bir metot geliştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dış Kavite Diyot Lazeri, PID kontroller, Gürültü Söndürme

### Simulation of PID Design for External Cavity Diode Laser

**Abstract:** Diode lasers working at constant frequencies and narrow line widths are very important for many applications such as precision atomic and molecular spectroscopy, laser cooling, quantum memory, atomic clocks and atomic interferometry. The line width of a laser diode is usually in the megahertz range, and it can also reduced to a few kilohertz with the configuration of external cavity diode lasers. In addition, noise is reduced by using PID controllers in the system. In our work, external cavity diode laser is formed experimentally and laser is realized, created laser data is adapted to MATLAB-Simulink and PI is simulated to suppress noise successfully. A new method has been developed with MATLAB-Simulink program in the field of PID design for the laser frequency stability.

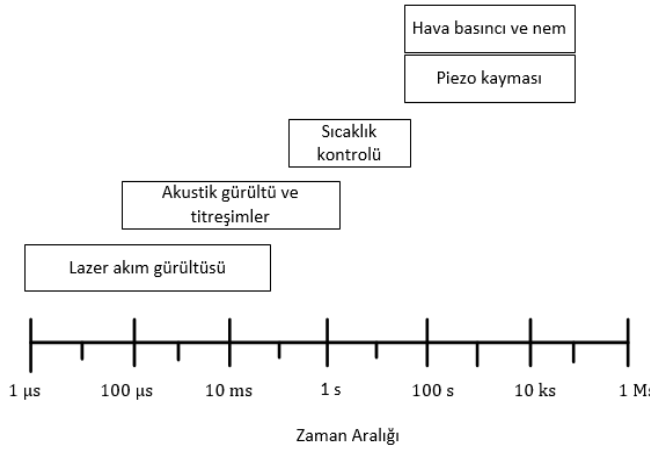
**Keywords:** External Cavity Diode Laser, PID controller, Noise Suppression

### 1. Giriş

Sinyal üzerinde görülen gürültünün, kuantum gürültüsünün mü yoksa teknik gürültünün mü baskın olduğunu belirlemek önemlidir, çünkü gerekli önlemler buna bağlı olabilir. Yüksek frekanslarda genellikle kuantum gürültüsü ve

düşük frekanslarda flicker frekans gürültüsü hakimdir. Flicker frekans gürültüsü çok kez hat genişliğinin baskın elemanıdır ve bu nedenle lazeri dış kaynaktan elde edilen bir frekans referansına sabitlemek yaygın bir uygulamadır (Träger, 2012; Turner vd., 2002).

Eğer bir lazerin çizgi genişliği ölçülürse, ölçme zamanı önemlidir. Farklı lazerlerin çizgi genişliklerinin kıyaslandığı durumda ölçüm zamanı göz önünde bulundurulmalıdır. Ölçüm zamanından daha hızlı süreçler çizgi genişliğini arttır, ama daha yavaş süreçler lazerin merkez frekansının ölçümlerin arasında sürüklenmesine neden olurlar. Lazer akım gürültüsü, akustik gürültü, mekanik titreşim, termal dalgalanmalar, piezo sürüklenme, çevresel ısı ve hava basıncı ile nem gibi diyot lazerin frekans dalgalanmalarının ana nedenleri farklı zaman aralıklarında oluşmalarıdır (Şekil 5). Deney düzeneğinde lazer sinyalinin alınması sırasında ölçüm süresi 2s'dir. Akım gürültüsü, mekanik titreşim, akustik gürültü ve ısı dalgalanmaları gibi dış düzensizlikler hızlı gürültü üretirler ve ECL'nin çizgi genişliğine katkıda bulunurlar. Ortam sıcaklığı, piezo sürüklenmeleri ve hava basıncı ve nem gibi yavaş gürültüler sürüklenmeye neden olur. Gürültü kaynaklarının frekans dalgalanmalarına neden olan gürültü kaynaklarının oluşum zamanları Şekil 1'de gösterilmiştir (Turner vd., 2002; Toptica, 2013).



Şekil 1. Diyot lazerlerin frekans dalgalanmaları için ana sebepler (Toptica, 2013)

Pratikte lazer frekansını sabitlemek ve buna bağlı olarak bir lazerin çizgi genişliğini daraltmak için, aktif frekans kararlaştırma teknikleri kullanılabilir. Uzun süreli frekans kararlaştırmaya, lazer frekansını daha kararlı bir referans seviyesine kilitleyerek ulaşılabilir. Lazer frekans değişimlerini algılamak için, lazerin frekans dalgalanmalarını gerilim dalgalanmalarına dönüştüren bir frekans

ayrıştırıcı (örn. fabry perot) gerekmektedir. Frekans ayrıştırıcılar radyo frekans ayrıştırıcı (RF) (Schilt vd., 2011) ve optik ayrıştırıcı olarak iki ana gruba ayrılmaktadırlar. Ayrıca gaz ile doldurulmuş bir hücre, optik ayrıştırıcı olarak kullanılabilir (Bartalini vd., 2010). Frekansın ayrıştırılması ile PID'ye lazer gürültü bilgisi gönderilir ve PID nin sürekli sistemi takip ederek gürültü söndürmesi sağlanır. Bu konuda çok sayıda çalışma mevcuttur (Black, 2001; Lipka vd., 2017).

Lazer frekansı kararlılaştırmak için simülasyon uygulamaları kullanılan yöntemlerdendir. Simulink programı kontrol sistemleri tasarımı için oldukça uygundur ve lazer frekansı kararlaştırmak için kullanılabilir. Çalışmalara kolaylık sunmak için simulinkte lazer blokları oluşturularak optik fiber linklerinin analizleri için toolbox oluşturulmuştur (de M, 2000), çalışma haberleşme alanı için uygundur. Yapılan bir diğer simülasyon çalışmasında, üç modlu He-Ne lazeri frekans kilitleme ve güç dengesi (power balance) metodu kullanılmış ve frekans kararlılığı artırılmıştır (Olyae ve Nejad, 2007). Lally (2006), yaptığı çalışmada infrared fiber lazerde frekans kilitleme pound drever hall tekniğinin simülasyonunu MATLAB-simulink ortamında yapmış ve tekniğin başarılı olduğu sonucunda ulaşmıştır (Lally, 2006). Labview programı da gürültü söndürmek için lazer sistemlerinde kullanılan bir programdır (Dong vd., 2005). Lazer ışığını bilgisayar ortamında simülasyon olarak oluşturulması sırasında bilinmeyen parametrelerin ayrı ayrı hesaplanması gerekir. Bu sebeple, lazerin bilgisayar ortamında simülasyon amaçlı oluşturulması zordur. Çalışmamızda yeni bir metod olarak lazer sinyali dataları deneysel olarak elde edilerek fotodedektör ile osiloskop üzerinden bilgisayar aracılığıyla alınmıştır. Alınan datalara göre sistemin transfer fonksiyonu SystemIdentification toolbox ile oluşturulmuş ve kontrol sistemi tasarlanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

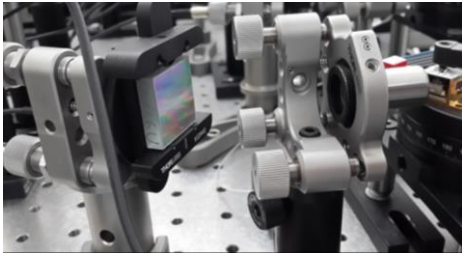
Dış kavite lazerleri (External Cavity Laser (ECL)) konfigürasyonları çok çeşitli şekilde oluşturulabilmektedir. İki adet ECL konfigürasyonu yaygın olarak kullanılmaktadır

(Duarte, 1996) (Şekil 2). ECL konfigürasyonunda kırınım ızgarası (grating) dalga boyu seçici eleman olarak kullanılır. Kırınım ızgarasının açısının değiştirilebilmesi ile seçilen dalga boyu güçlendirilir, diğer dalga boylarının saçılarak sönmülmesi sağlanır. Böylelikle istenilen dalga boyunda lazer elde edilmiş olur.



Şekil 2. a. Littrow konfigürasyonu b. Littman-Metcalf konfigürasyonu

Çalışmamızda ECL'nin deneysel kurulumu Littrow konfigürasyonunda düzenlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Dış kavite diyot lazer (ECL) düzeneği

ECL lazer sisteminde TEC soğutucu ile sıcaklık kontrolü yapılan bir kazanç çipi (Thorlabs, SAF1174S) kullanılmıştır. Kazanç çipi manuel hassas dönme ile konumu ayarlanan bir basamak (Thorlabs, PR01/M) üzerine kurulmuştur ve CW (sabit dalga boylu lazer) modunda bir lazer sürücü/TEC denetleyici (Thorlabs, ITC4005) ile çalıştırılmıştır. Kazanç çipinin açılı bir dalga kılavuzu vardır. Bağlantı yüzünün %0.005 oranında yansıma katsayısı bulunmaktadır. Kazanç çipinin fiber çıkışındaki optik izolatör çipi geri yansımalarla karşı korur ve lazerin kararlılığını artırır. Kazanç çipinden elde edilen ışının kuplajı için, AR kaplamalı, 8 mm odak uzaklığı ve NA=0.5 olan (Thorlabs, A240TM-C) asferik lens kullanılmıştır. Lens, motorlu XYZ aşamalı bir picomotor aktüatör üzerine monte edilmiştir (Newport, 9062-XYZ-PPP-M, 8763-KIT). Daha sonra elde edilen ışın yüksek kırınım verimliliğine sahip olmak için

TM polarizeden kırınım ızgarasına (Thorlabs, GR25-0613, 600 grooves/mm, 1250 nm Blaze) yönlendirilmiştir. Ağ bir bant geçiren filtre olarak kullanılarak düşük sürüklenme kinematik yuvaya (Thorlabs, POLARIS-K1) ve bir piezo çevirme katına (Thorlabs, NFL5DP20/M) kurulmuştur. Dış-kuplaj yüzeyi ve kırınım ızgarası arasındaki mesafe kabaca 10 cm'dir. Kırınım ızgarasından oluşan ışının birinci sırası optik geri besleme ile güçlendirilir. Seçilen mod, kazanç çipine geri eşleştirilir ve yükseltilir. Bir moddan diğerine çalışma kırınım ızgarasının açısının değiştirilmesi ile elde edilmiştir. Tüm deney bileşenleri paslanmaz çelik ağır taban plakası üzerine monte edilmiştir.

Kırınım derecesi ile dalga boyu arasındaki ilişki denklem (1) ile ifade edilir.

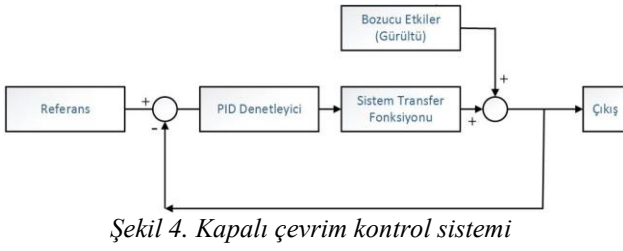
$$2 d \sin \varphi = m \lambda \quad (1)$$

(d çizgi aralığı,  $\varphi$  geliş açısı, m kırınım derecesidir ve Littrow düzeni için 1'e eşittir ve  $\lambda$  gelen ışığın dalga boyudur). Spektrum  $T=25^{\circ}C$ 'de 350 mA'lık enjeksiyon akımında alınır. Optik kavite kullanılarak ECL çizgi genişliğinin üst limiti ölçülmüş ve  $\sim 140$  kHz olarak tespit edilmiştir.

## 2.1. MATLAB – Simulink ile PID tasarımı

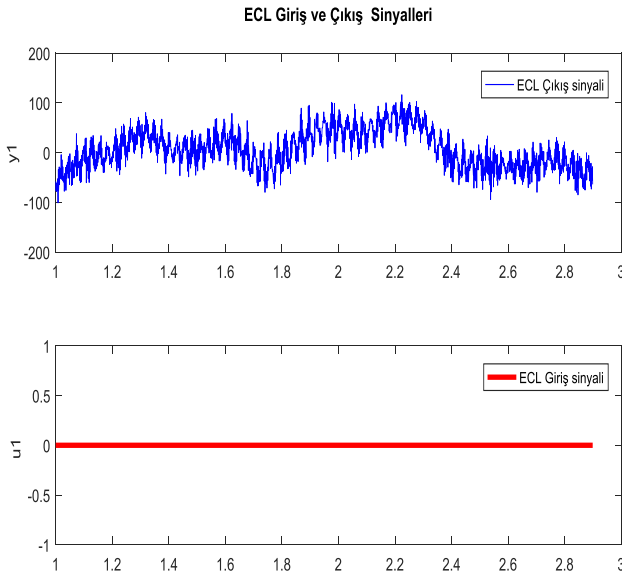
Frekans kontrol ettiğimiz mekanizmalar PID denetleyiciler ile geri beslemeli olarak kullanıldığında, gürültüden ve ortam etkisinden kaynaklı frekans sapmalarının önüne geçilebilmektedir.

PID denetleyiciler genellikle geri beslemeli sistemler olarak planlanırlar. PID denetleyici, istenilen referans bilgisi ile değişen giriş bilgisi arasındaki farkı bularak, hata değerini belirli bir süreç içinde hesaplar. Bu sistemlerin en büyük avantajı kontrol sistemlerindeki bozucu etkilere rağmen, denetleyici sistem çıkışını referans değerine yaklaştırabilmesidir. Temel bir kontrol sistemi Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Kapalı çevrim kontrol sistemi

Çalışmamızda, dış kavite lazer diyodu ile elde edilen lazer dataları osiloskop üzerinden bilgisayara aktarılarak alınmıştır. Simülasyonun gerçekleştirilmesi için ECL sistemi transfer fonksiyonu yine MATLAB SystemIdentification toolbox ile gerçekleştirilmiştir. ECL'ye verilen doğru akım (frekansı sıfır) ile çıkış sinyali Şekil 5'de verilmiştir. Deney düzeneğinden alınan veriler zaman-frekans ekseninde alınmıştır. Giriş çıkış verilerine göre systemIdentification toolbox ile elde edilen transfer fonksiyonu Denklem 2' de gösterilmiştir. Kurulan deney düzeneğinde yer alan ECL çıkış sinyalinin frekans kayması ~200 kHz olarak ölçülmüştür. Deney düzeneğinden alınan veriler simülasyonda kullanılmıştır.



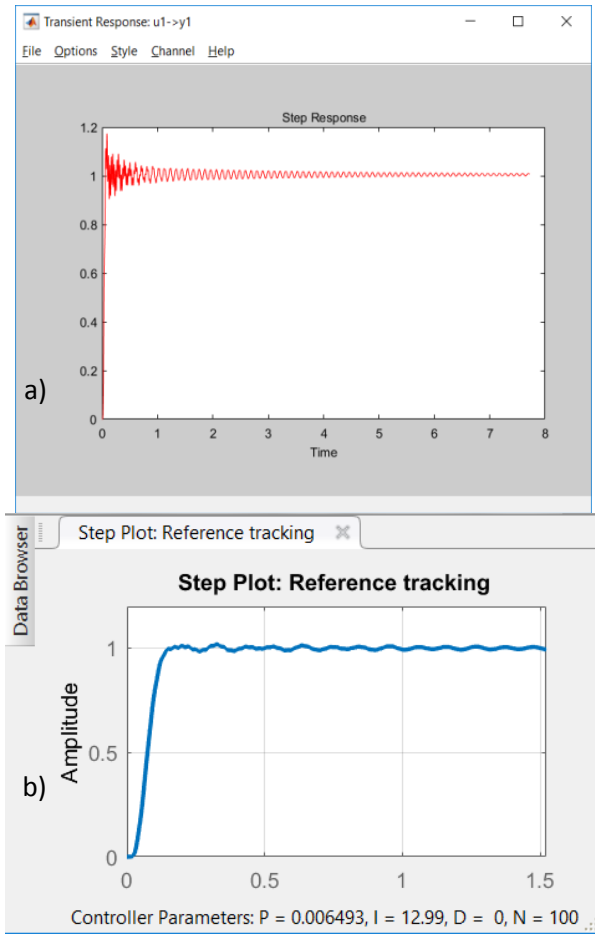
Şekil 5. ECL deney düzeneği çıkışından (y1) ve ECL deney düzeneği girişinden (u1) alınan veriler (zaman-frekans eksenleri üzerinde)

(2)

$$\frac{8.5 \times 10^{14} s^4 + 3.8 \times 10^{15} s^3 + 4.6 \times 10^{18} s^2 + 1.2 \times 10^{19} s + 5.17 \times 10^{21}}{s^{11} + 181.2 s^{10} + 1.36 \times 10^5 s^9 + 2 \times 10^7 s^8 + x \times 10^{15} s^3 + 5.45 \times 10^9 s^7 + \dots + 6.2 \times 10^{11} s^6 + 5.7 \times 10^{13} s^5 + 3.8 \times 10^{15} s^4 + 1.9 \times 10^{17} s^3 + \dots + 7.9 \times 10^{18} s^2 + 1.8 \times 10^{20} s + 1.8 \times 10^{20} s + 5.15 \times 10^{15} s^{21}}$$

Transfer fonksiyonu step fonksiyonu cevabı ve PID ile step fonksiyonu ayarlanmasının cevabı

gösterilmiştir (Şekil 6a). ECL sisteminin transfer fonksiyonunun bulunması ile sistemi kararlı hale getirilerek, PID konfigürasyonu MATLAB Pidtool ile gerçekleştirilmiştir. (Şekil 6b). MATLAB Pidtool doğrusal olmayan sistemleri çözememektedir. ECL ile elde edilen lazer gürültüden etkilenmekte ve zamanla değişebilmektedir, bu nedenle ECL den aldığımız dataların doğrusal olmadığı görülmektedir. Yalnız tasarlanan sistem doğrusal kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan sistemlerin transfer fonksiyonları MATLAB pidtool ile çözümlenememekte ve kararlılaştırılmamaktadır.



Şekil 6. a) Lazer ECL sisteminin transfer fonksiyonunun step fonksiyonu cevabı

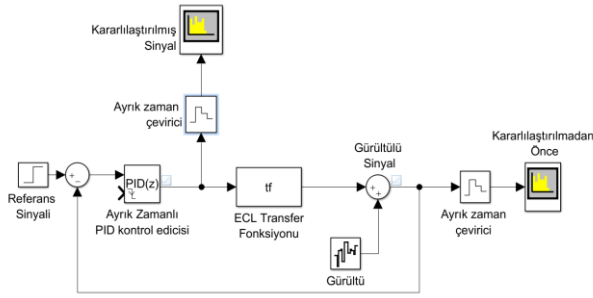
b) PID ayarlaması ile step fonksiyonu cevabı

Elde edilen PID parametreleri Çizelge 1'de gösterildiği üzere bulunmuştur.

## Çizelge 1. Elde edilen PID parametreleri

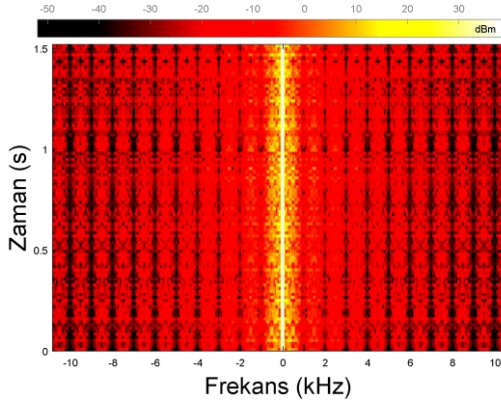
Kontrol Parametreleri	
P	0.0065
I	13
D	0
Filtre katsayısı	100

Elde edilen verilere göre MATLAB-Simulink ile tasarlanan sistem Şekil 7’ de verilmiştir.

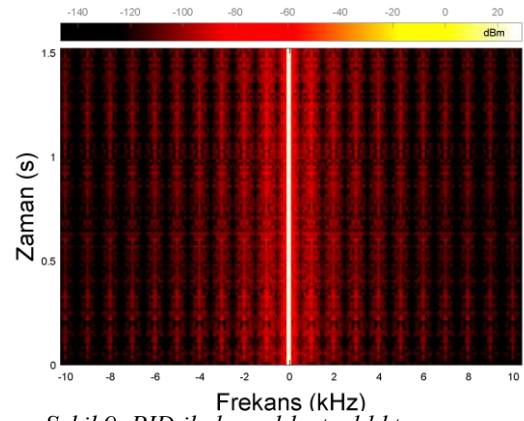


Şekil 7. Lazer kararlılığı için sistem simülasyonu, düzeneği

Sistemin frekans zaman ekseninde spektrogram ile çıktısı alındığında sistemin kararlılaştırılmadan önce zamana bağlı frekans grafiğinde gürültü band genişliğinin, kararlılaştırıldıktan sonraya göre fazla olduğu görülmektedir (Şekil 8, 9).

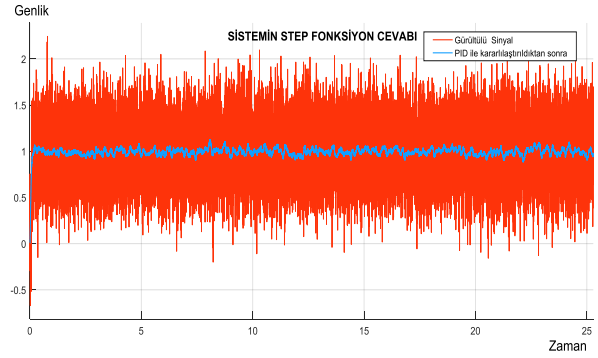


Şekil 8. Lazer sinyalinin, kararlılaştırılmadan önce



Şekil 9. PID ile kararlılaştırıldıktan sonra

Gerçeklenen kontrol sisteminde sistemin referans sinyali olarak girilen step fonksiyonunu takip ettiği ve gürültüyü söndürdüğü görülmektedir (Şekil 10).



Şekil 10. Lazer sinyalinin, kararlılaştırılmadan önce ve PID ile kararlılaştırıldıktan sonra çıkışı

#### 4. Tartma ve Sonuç

ECL ile elde edilen lazer doğrusal olmayan bir sistem olmasına karşın, belirli bir sürede elde edilen veriler (doğru akım sistemin girişi, lazer sinyali çıkışı olarak) alınmış ve sistem doğrusal kabul edilmiştir. Bu verilere göre transfer fonksiyonu systemIdentification toolbox ile bulunmuş ve PID tasarımı için kullanılmıştır. Çalışmamızda beyaz gürültü (White noise) eklenmiş ve sistemin kararlılaştırılması sağlanmıştır.

Lazer gürültüsünün bastırılması için PID cihazları kullanılabilir ve lazer frekans kararlılığını sağlamaktadır. Çalışmamızda oluşturulan lazer sinyali fotodetektör ile

osiloskop üzerinden bilgisayar datası olarak alınmış, lazerin SystemIdentification toolbox ile transfer fonksiyonu bulunmuş ve uygun PID tasarımı başarı ile gerçekleştirilmiştir. Lazerin transfer fonksiyonunun bulunmasında SystemIdentificaion toolbox'ının kullanılması literatürde yer almayan bir çalışmadır ve yeni bir metottur. Çalışma sonucunda uygun PID parametreleri bulunarak frekans başarılı bir şekilde stabilize edilmiştir.

## Kaynaklar

- A. Sutton and D. A. Shaddock, "Laser frequency stabilization by dual arm locking for LISA," *Phys. Rev. D - Part. Fields, Gravit. Cosmol.*, vol. 78, no. 8, 2008.
- C. F. de M. JR, C. A. Lima, L. D. S. de Alcantara, R. O. dos Santos, and J. C. W. A. Costa., "A simulink Toolbox for Simulation and Analysis of Optical Fiber Links," *Sixth Int. Conf. Educ. Train. Opt. Photonics*, vol. 3831, no. 2, pp. 240–251, 2000.
- E. D. Black, "An introduction to Pound–Drever–Hall laser frequency stabilization," *Am. J. Phys.*, vol. 69, no. 1, pp. 79–87, 2001.
- E. M. Lally, "A Narrow-Linewidth Laser at 1550 nm Using the Pound-Drever-Hall Stabilization Technique ," *Masters Thesis*, pp. 1–92, 2006.
- F. J. Duarte, *Tunable lasers handbook*. Academic Press, 1996.
- F. Träger, *Springer handbook of lasers and optics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- G. S. Feng et al., "Arbitrary frequency stabilization of a diode laser based on visual Labview PID VI and sound card output," *Chinese Phys. B*, vol. 24, no. 10, 2015.
- J. I. Thorpe, K. Numata, and J. Livas, "Laser frequency stabilization and control through offset sideband locking to optical cavities," *Opt. Express*, vol. 16, no. 20, p. 15980, 2008.
- L. D. Turner, K. P. Weber, C. J. Hawthorn, and R. E. Scholten, "Frequency noise characterisation of narrow linewidth diode lasers," *Opt. Commun.*, vol. 201, no. 4, pp. 391–397, 2002.
- L. Dong, W.-G. Ma, W.-B. Yin, C.-Y. Li, and S.-T. Jia, "Frequency stabilization of an external cavity diode laser based on LabVIEW," *Guangdianzi Jiguang/Journal Optoelectron. Laser*, vol. 16, no. 3, 2005.
- M. Lipka, M. Parniak, and W. Wasilewski, "Optical frequency locked loop for long-term stabilization of broad-line DFB laser frequency difference," *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 123, no. 9, 2017.
- R. W. P. Drever et al., "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator," *Appl. Phys. B*, vol. 31, no. 2, pp. 97–105, 1983.
- S. Bartalini et al., "Observing the intrinsic linewidth of a quantum-cascade laser: beyond the Schawlow-Townes limit," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 104, no. 8, p. 83904, 2010.
- S. Olyaei and S. M. Nejad, "Stabilization of laser frequency based on the combination of frequency locking and power balance methods," *J. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 24, pp. 3965–3970, 007.
- S. Schilt et al., "Frequency discriminators for the characterization of narrow-spectrum heterodyne beat signals: application to the measurement of a sub-hertz carrier-envelope-offset beat in an optical frequency comb," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 82, no. 12, p. 123116, 2011.
- T. T.-Y. Lam, B. J. J. Slagmolen, J. H. Chow, I. C. M. Littler, D. E. McClelland, and D. a. Shaddock, "Digital Laser Frequency Stabilization Using an Optical Cavity," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 46, no. 8, pp. 1178–1183, 2010.
- Toptica, "Diode Laser Locking and Linewidth Narrowing," *Company, Toptical*, pp. 1–8, 2013.