



Mikrodenetleyici Tabanlı Esnek, Güçlü Dijital Gecikmeli Darbe Üretici Sistem Tasarımı ve Optoelektronik Uygulamaları

Microcontroller Based Flexible, Powerful Digital Delay Pulse Generator System Design and Optoelectronic Applications

Tayyar Güngör* , Ebru Güngör 

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Burdur, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: tgungor@mehmetakif.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 15.04.2022

Kabul Tarihi / Accepted: 25.08.2022

Atıf şekli/How to cite: GÜNGÖR, T., GÜNGÖR, E. (2023). Mikrodenetleyici Tabanlı Esnek, Güçlü Dijital Gecikmeli Darbe Üretici Sistem Tasarımı ve Optoelektronik Uygulamaları. DEÜ FMD 25(73), 255-262.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2023257320

Öz

Bu çalışmada, esas olarak mikrodenetleyici tabanlı çok kanallı ve kanal genişliği ayarlanabilen bir dijital gecikmeli darbe üretici (DGDÜ) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde mikrodenetleyici (PIC18F4550), kristal osilatör (8 MHz) ve 4 giriş 16 çıkışlı kodlayıcı/kodçözücü entegresi (74LS154) kullanarak 1µs-1s arasında 25 farklı genişlikte zaman-taban sinyalleri üretilmiştir. Tetikleme sinyalinden sonra seçilen zaman-taban genişliğinde ardışık olarak 32 kanallı zaman-geçiktirme dijital darbe sinyalleri elde edilmiştir. DGDÜ sistemi, ilk olarak genlik-zaman bağımlılığı bilinen referans üçgensel sinyalin bir tam periyodu içinde seçilen iki zaman pencere değerine karşı gelen sinyal genlik değerlerinin 2-kanallı örnekle-tut devresinin de bulunduğu Sinyal Analiz Birimi (SAB) ile test edilmiştir. Elde edilen sonuçların bilinen gerçek değerler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuçların uyumlu olduğu gözlenmiştir. Daha sonra ticari bir ürün olan ve ışığa duyarlı bir direnç (LDR) için oda sıcaklığında, kesikli aydınlatma ile oluşan foto-akımın zamanla matematiksel formunun belirlenmesi için kullanılmıştır. Sonuç olarak, bu yeni mikrodenetleyici tabanlı çok kanallı DGDÜ ve SAB ile hızlı, işlevsel ve esnek özellikleri olan bir otomatik veri toplama sistemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca derin seviyeli transient spektroskopisi (DLTS), foto-uyarımlı akım transiyent spektroskopisi (PICTS) gibi yarıiletken mazlemelerin karakterizasyonları için kullanımı kolay ve ticari çift-örnekleme sistemlerine göre daha ucuz olması nedeniyle tercih edilebilir bir sistemdir.

Anahtar Kelimeler: Dijital gecikmeli darbe üretici, Örnekle-tut, gated-entegratör

Abstract

In this study, a multi-channel digital delayed pulse generator (DDPG) with adjustable channel width, mainly based on microcontroller, has been designed. In this system, 25 different time-base signals were generated between 1 μ s-1s by using microcontroller (PIC18F4550), crystal oscillator (8 MHz) and 4 input 16 output encoder/decoder IC (74LS154). After the trigger signal, 32-channel time-delayed digital pulse signals are obtained sequentially at the selected time-base width. The DDPG system was first tested with the Signal Analysis Unit (SAU), which also includes a 2-channel sample-and-hold circuit of the signal amplitude values corresponding to two selected time window values within one full period of the reference triangular signal whose amplitude-time dependence is known. The obtained results were compared with the known real values. It was observed that the results were compatible. It was then used to determine the mathematical form of the photocurrent over time, which is produced by pulsed illumination at room temperature for a light-sensitive resistor (LDR), which is a commercial product. As a result, an automatic data acquisition system with fast, functional and flexible features has been realized with this new microcontroller-based multi-channel DDPG and SAU. In addition, deep-level transient spectroscopy (DLTS) is a preferable system for the characterization of semiconductor materials such as photo-excited current transient spectroscopy (PICTS) because it is easy to use and cheaper than commercial double-sampling systems.

Keywords: Digital delayed pulse generator, Sample and hold, gated integrator

1. Giriş

Zaman geciktirme devreleri, görüntü işleme sistemlerinde, lazer, dedektör ve osiloskop gibi aygıtların tetiklenmesinde kullanılır. En basit hali ile zaman gecikmesi için bir kondansatörün belirlenen seviyeye kadar dolması için geçen zamandan yararlanılabilir [1]. Buna ek olarak, programlanabilen zaman geciktirme devresi için işlemsel yükselteçli bir karşılaştırma devresi ile sayısal-analog çevirici (SAÇ) kullanımı örnek verilebilir [2]. Bu sistemde SAÇ tarafından üretilen gerilim değeri karşılaştırıcının ayar gerilim değerinden büyük olduğu anda karşılaştırıcı çıkışı mantık "1" seviyesine çekilir. Dolayısıyla SAÇ'nin tetiklenmesinden itibaren geçen süre kadar gecikme sağlanır. Bu tekniğe digital-to-time conversation denir. Başka bir teknikte ise iki durumlu devre elemanı olan flip-floplar yardımı ile tetikleme sinyali ve zaman taban sinyalinin kullanarak çalışan bir sayaç devresi kullanılır. Zaman geciktirme devrelerinde keskin frekans değerine sahip kristal osilatörler ile bobin ve kapasitörden oluşan LC devreleri de kullanılabilir. Bunlara ek olarak tek-kararlı (one-shot) multivibratör devreleri ile tetikleme sinyaline göre tek kanallı bir zaman gecikme sinyali elde edilebilir. Bu zaman geciktirme devreleri tek kanallı olabildiği gibi birden fazla aygıtı tetikleyebilmek için çok kanallı da olabilir. Bu tür devre tasarımlarına tıp, astrofizik, fizik, kimya ve elektronik alanlarında da ihtiyaç vardır [3, 5]. Bununla beraber son

yıllarda yarı iletken cihaz teknolojisinin hızlı gelişimi ile hızlı ve ucuz mikrodeneleyiciler kullanılabilir hale geldi. Özellikle mikrodeneleyici ve mikrodeneleyici tabanlı hazır platformların esnek yapıları nedeniyle bu cihazlar yarı iletken cihazların otomatik karakterizasyonunun hassas ölçümlerle yapıldığı sistem tasarımlarında kullanılmaktadır [6, 7]. Bu mikrodeneleyiciler ile gerek tek kanallı gerekse çok kanallı zaman geciktirme devreleri tasarlanabilmektedir.

Zaman geciktirme devre tasarımlarında, tetikleme sinyalinin en uygun teknikte elde edilmesinin yanında zamanla hızlı değişim gösteren sinyallerinde analiz edilebilmesi için belirlenen zaman değerindeki sinyalin genlik değerine de ihtiyaç duyulabilir. Bu tür sinyallere örnek olarak ışık pulsları veya gerilim pulsları ile bir yarıiletken malzeme içerisindeki taşıyıcıların uyarılması ve uyarım sonrasında taşıyıcıların eski hallerine geri dönerken verdikleri foto-akım ve kapasitans değişimleri örnek olarak gösterilebilir. Hızlı değişim gösteren bu sinyalleri ölçmek için hızlı ve nispeten pahalı olan osiloskoplar, faz kilitlemeli yükselteçler (lock-in Amplifier), iki veya daha fazla kanallı box-car entegratör adı verilen aygıtlar kullanılabilir [8, 9]. Bununla beraber gerek tek kılıfta gerek ise JFET'ler ile tasarlanan tepe-değer tutan veya örnekle-tut işlemi yapan entegrelerin kullanıldığı tasarımlar da kullanılabilir [10,18].

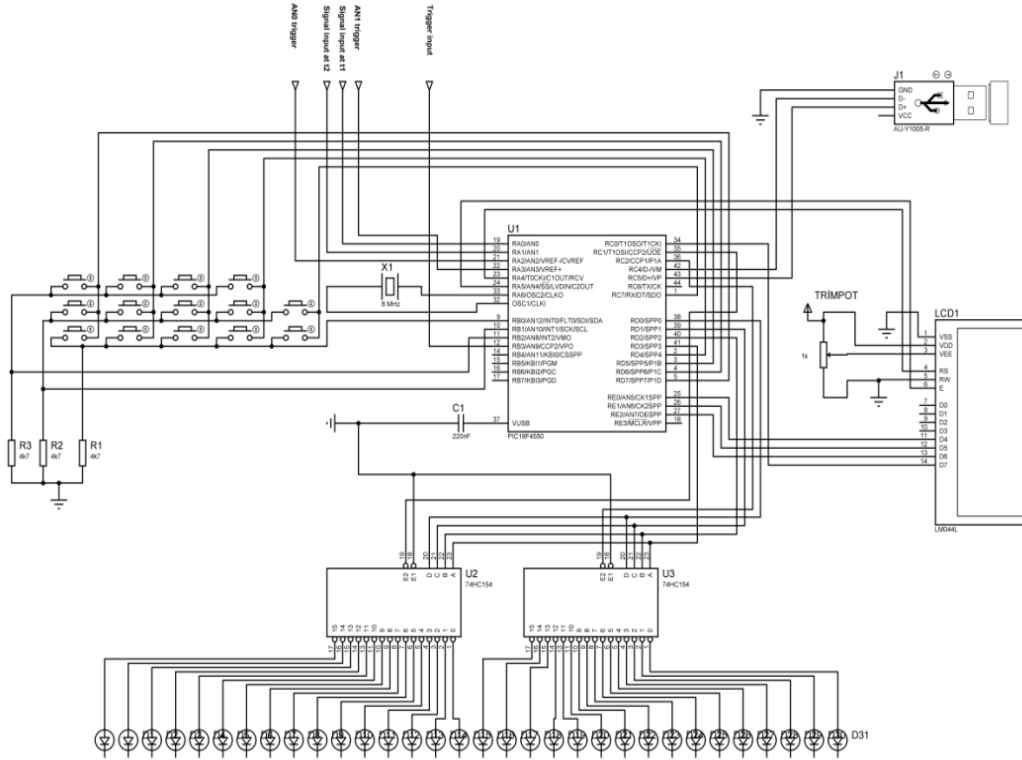
Bu çalışmada, çok kanallı ve kanal genişliği ayarlanabilen bir dijital gecikmeli darbe üretici (DGDÜ) tasarımı ve zamanla hızlı değişen sinyallerin örnekle-tut mantığı ile ölçümün gerçekleştirilebildiği Sinyal Analiz Biriminden oluşan ikili bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, iki adet 4 giriş 16 çıkış 74LS154 kodlayıcı/kodçözücü entegresi ile gecikme sinyal kanal sayısı 32'ye kadar artırılmıştır. İki adet 74LS123 tek-kararlı multivibratör ile açıklık (aperature) değeri ayarlanabilen 2 kanallı örnekle-tut entegresi (LF398) ile gated sinyal analizörü birimi tasarlanmıştır. Bu tasarım en büyük avantajları, düşük maliyetli olması ve hem zaman gecikme kanal sayısı hem de gate sinyallerinin sayısını artırılabilmesi açısından esnekliğe sahip olmasıdır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada kullanılan PIC18F4550, 32 adet Giriş/Çıkış pinleri, 10-bit çözünürlük değerine sahip 13 kanallı (AN0-AN12) Analog/Dijital

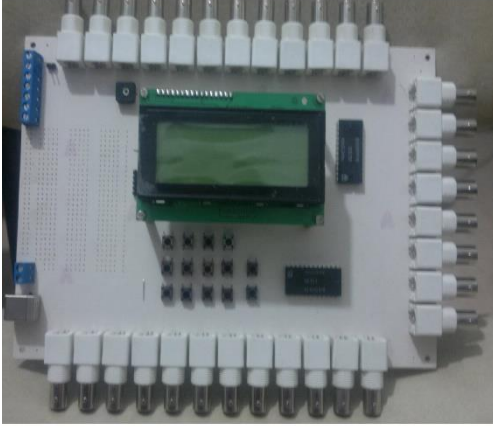
çevircisi, ICSP (In Circuit Serial Programming) özelliği sayesinde sadece iki pini kullanılarak uygulama devresi üzerinde programlanabilmesi ve farklı kristal frekansları (4, 8 ve 20 MHz) ile kullanılabilir olması özellikleri dikkate alındığında PIC18FXXXX ailesinin en güçlü mikrokontrolcülerinden birisidir. Ayrıca, 64KB'ta kadar uzanan büyük program belleğiyle ve 1K Byte'lık RAM belleğiyle çok gelişmiş uygulamalarda kullanıma uygundur. PIC18F4550, çevresel aygıtlar ve bir ana bilgisayar arasında iletişim kurmak için ortak bir protokol olan bir USB'ye (Evrensel Seri Veri Yolu) sahiptir [19].

DGDÜ sistemi esas olarak kararlı ve hassas kristal osilatör (8 MHz) ile birlikte kullanılan PIC18F4550, veri giriş birimi (3x5 tuş takımı), veri seçimlerinin görselleştirilmesi için 2x16 LCD ekran ve 2 adet 4 giriş 16 çıkışlı kodlayıcı/kodçözücü entegresinden oluşmaktadır (Şekil 1-a, b ve c).

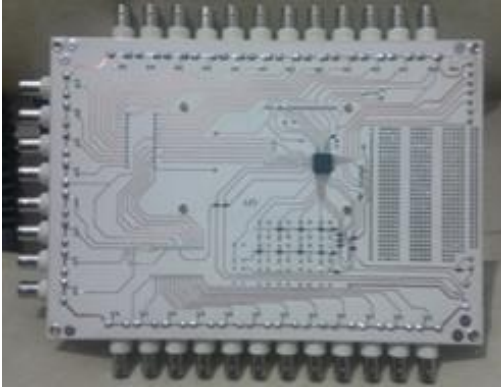


Şekil 1-a. Dijital Gecikmeli Darbe Üreteç (DGDÜ) sisteminin blok şeması

Figure 1. Explanation of the information presented in the figure lock diagram of the Digital Delayed Pulse Generator (DDPG) system



Şekil 1-b. DGDÜ sisteminin ön yüzünün fotoğrafı
Figure 1-b. Photograph of the front of the DDPG system

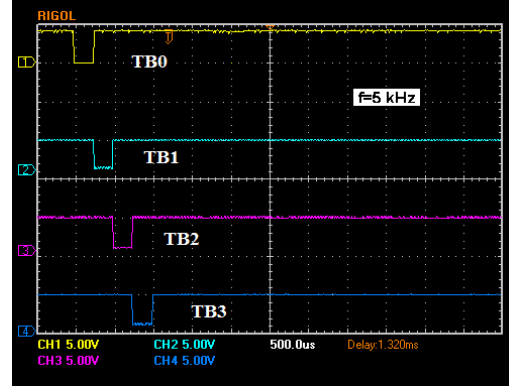


Şekil 1-c. DGDÜ sisteminin arka yüzünün fotoğrafı

Figure 1-c. Photograph of the back of the DDPG system

DGDÜ sisteminde zaman genişliği seçimi 3 satır ve 5 sütundan oluşan bir tuş takımı yardımı ile yapılır. Satır kontrolü için PIC18F4550'in port-b çıkışlarından 0, 1 ve 2 numaralı pinler, sütun kontrolü için ise port-b çıkışlarından 4 ve 7 ayrıca port-c çıkışından da 7 numaralı çıkış pinleri kullanılmıştır. Kullanıcı bu tuş takımı ile hem zaman tabanına (TB) karşı gelen değerleri (1 μ s ve 1 s gibi 1, 2, 4, 8, 10, 20, 40, 80, 100, 200, 400, 800 ve 1000 μ s ve ms) hem de tetikleme giriş sinyali türü (düşen veya yükselen kenar) seçimini yapabilir. Ayrıca, boşta kalan tuşlar ilerde ihtiyaç duyulabilecek farklı fonksiyon için kullanılabilir. Gömülü program ile 2 adet 4 giriş 16 çıkışlı kodlayıcı/kodçözücü entegresi

birlikte kullanılarak toplamda 32 adet çıkış sinyali (TB0-TB31) üretilir. Dört kanallı sayısal osiloskop (Digital Storage Oscilloscope, DSO) ile ardışık çıkış sinyalleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



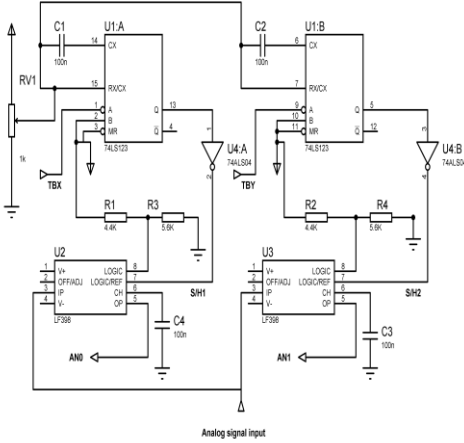
Şekil 2. DGDÜ sistemi ile elde edilen ardışık dört çıkış dalga şekillerine ait DSO ekran fotoğrafı

Figure 2. DSO screenshot of four consecutive output waveforms obtained with the DDPG system

2.1. Sinyal analiz birimi (SAB)

SAB, açıklık değeri ayarlanabilen monostable multivibrator entegresiyle (74LS123) birlikte çalışan örnekle-tut (LF398) devresinden oluşmaktadır (Şekil 3). Esas olarak sinyal analiz birimi için iki-kapı (double-gate) adı verilen yöntem göz önüne alınmıştır. Bunun nedeni, bu farklı iki zaman değerinde örneklenen ve tutulan zamanla değişen sinyale ait değerler ile sinyalin zamana bağlılığının matematiksel modeli belirlenebilir. Gerek duyulması halinde gate sayısı artırılabilir. Örnekle-tut işlemi için 32 çıkış arasından istenen iki çıkış (TBX ve TBY gibi), 74LS123'ün düşen-kenar girişlerine bağlanır. Açıklık süresi olarak tanımlanan çıkış darbe genişliği 74LS123'ün RX, RXX girişlerine bağlanan potansiyometre ve kapasitör tarafından belirlenir. Açıklık zaman genişliği TB sinyalinden daha az olmalıdır. LF398, örnekle-tut entegresi için 1 nF'lık kapasitör kullanıldığında, tutulan sinyalin değişim hızı yaklaşık olarak 20 mV/dak gibi düşük bir değerdedir. LF398 entegresi örnekleme için mantık 1 (veya mantık 0) ve tutma işlemi için mantık 0 (veya mantık 1) gibi iki farklı şekilde konfigüre edilebilir. Zaman taban genişliğine uygun olarak istenilen sayıda örnekleme yapılarak ve bir örnekleme için geçen süre dikkate alınarak söz konusu sinyalin ortalama

değeri hesaplanabilir. Bu, sistemin esnek özelliklerinden sadece birisidir. İhtiyaç duyulması halinde sinyaller (A ve B) üzerine aritmetik işlemler de uygulanabilir (A-B, A+B, A*B ve Log(A/B) vb.).



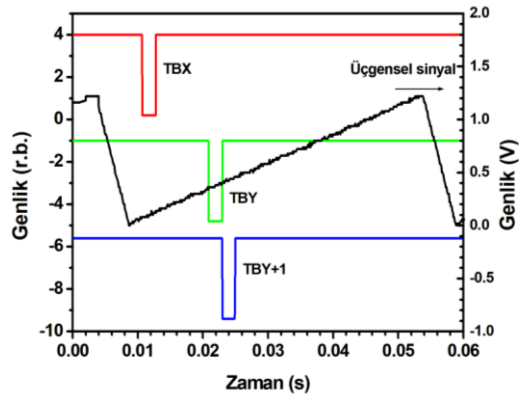
Şekil 3. Sinyal analiz birimi (SAB) devresi

Figure 3. Signal analysis unit (SAU) circuit

3. Bulgular

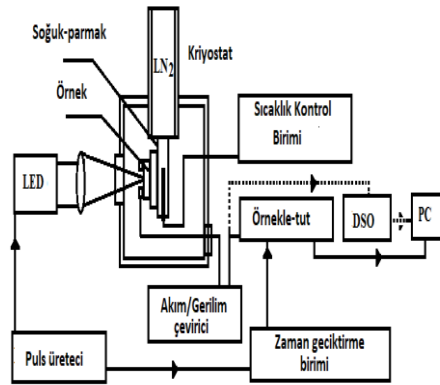
PIC tabanlı DGDÜ ve SAB'nin test edilmesi için, ilk olarak HP8116 model sinyal üretici tarafından üretilen, 1,2V genlikli, duty-cycle değeri %90 ve frekansı 20 Hz olan üçgen test sinyali kullanılmıştır. DGDÜ için 1 ms değerindeki zaman taban sinyali (TB) seçildiğinde gözlem süresi (32xTB) 32 ms'dir. Örnekle-tut işlemi için 10 µsn'lik açıklık zaman değeri için zaman iki kanallı örnekle-tut devresini tetiklemek için kullanılan TBX ve TBY değerleri TBX=TBY olarak seçildiği durumda mikrodenetleyicide bulunan 10 bit çözünürlüklü ADC (Analog to Digital Converter) kanallarından (AN0 ve AN1) okunan değerler arasındaki fark sıfıra çok yakın bir değer olarak elde edildi. Sonrasında, TBX, 4xTB ve farklı TBY değerleri için ölçümler tekrarlandı. Bu işlemler referans sinyalin farklı periyot değerleri içinde tekrarlandı. Ölçüm sonuçlarının beklenen teorik değerler ile uyum içinde olduğu gözlemlendi. PIC tabanlı DGDÜ tarafından üretilen zaman tabanlı sinyalleri (TBX ve TBY) ve analog kanallardaki gerilim değerlerini okumak için kullanılan TBY+1 sinyali ile test sinyalinin DSO ile elde edilen görüntüsü Şekil 4'te gösterilmiştir.

Bu sistem ayrıca CdS'den oluşan ışığa bağımlı direnç (LDR) gibi gerçek bir örnek için de test edilmiştir. LDR, sıvı azot ile sıcaklığı 120-400K arasında değiştirilebilen optik pencereleri bulunan bir kriyostat (soğuk kap) içindeki örnek tutucuya sabitlenmiştir (Şekil 5). LDR yüzeyi, ultra parlak beyaz LED ışık darbesiyle aydınlatılırken farklı sıcaklıklar için elde edilen foto-akımın zamanla değişimi DSO yardımı ile gözlenmiştir (Şekil 6-a).



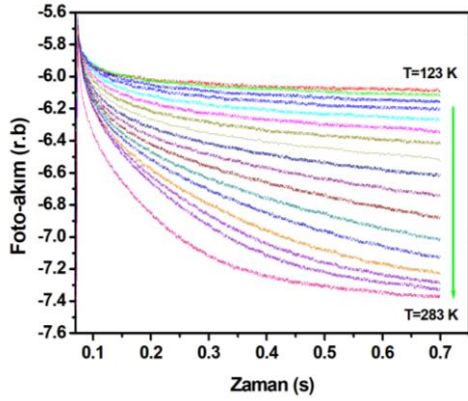
Şekil 4. Referans üçgensel sinyal ve DGDÜ tarafından üretilen test sinyalleri

Figure 4. Reference triangular signal and test signals generated by DDPG



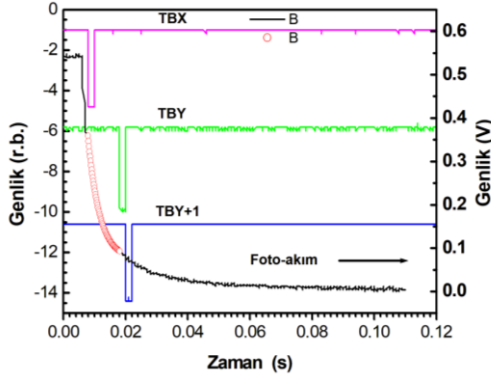
Şekil 5. Sıcaklığa bağlı foto-akım değişim gözlem sistemi

Figure 5. Temperature dependent photocurrent change observation system



Şekil 6-a. Farklı sıcaklıklar için LDR'ye ait foto-akımın zamanla değişimi

Figure 6-a. Time variation of photocurrent of LDR for different temperatures



Şekil 6-b. Oda sıcaklığındaki LDR'ye ait foto-akımın zamanla değişimi, DGDÜ tarafından üretilen kontrol sinyalleri ve Eş. (1) ile hesaplanan foto-akım zaman değişimi

Figure 6-b. Time variation of photocurrent of LDR at room temperature and control signals generated by DGS and time variation of photocurrent calculated by Eq. (1)

Sonrasında oda sıcaklığı için LDR'nin ışığa verdiği tepki ve ardışık gate sinyalleri (TBX, TBY ve TBY+1) Şekil 6-b'de gösterilmiştir. Zaman tabanı olarak 2 ms (500 Hz) seçilmiştir. 32 kanal ile 64 ms'lik (32x2 ms) gözlem süresi içinde TBX ve TBY zaman pencerelerinde zamanla değişen çıkış sinyali başarılı bir şekilde örneklenmiş ve bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elde edilen foto-akımın zamanla değişimi için Eş. (1) kullanılmıştır.

$$I(t) = I_0 + A * \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (1)$$

Foto-akım sinyalinin ilgilenilen zaman aralığı için bulunan parametreler sırasıyla $I_0=0,07384$, $A=2,3186$ ve $\tau=0,00377$ s olarak belirlenmiştir. Bu parametreler ile foto-akımın hesaplanan değişimi Şekil 6-b'de kırmızı içi boş daire sembolü ile gösterilmiştir. Bu sayede foto-akımın zamanla değişimi için sinyalin tamamını almak yerine seçilen iki zaman pencere değerlerini alarak ihtiyaç duyulan analizler yapılabilir [12, 13, 18]. İhtiyaç duyulması halinde örnekle-tut kanal sayısı 2 yerine 3, 4 veya daha fazla olacak şekilde artırılabilir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, ticari olarak mevcut elektronik parçalar kullanılarak basit, ucuz ve esnek kullanım özellikleri olan mikrodenetleyici (PIC18F4550) tabanlı dijital gecikmeli darbe üretici (DGDÜ) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tetik sinyali ile birlikte zaman-taban sinyalinin 32 kat büyüklüğünde bir gözlem çerçevesi için 32 kanallı darbe sinyalleri üretilmiştir. Zamanla hızlı değişim gösteren gerilim değişimleri, TBX ve TBY zamanlarında örnekle-tut işlemine tabi tutularak TBY+1 anında DGDÜ biriminde bulunan dahili ADC tarafından sayısallaştırılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. DGDÜ ve SAB birlikte kullanılarak iki-kapılı bileşik bir sistem, hem referans bir üçgenel sinyal üzerinde hem de ticari bir ürün olan LDR'nin kesikli aydınlatılmasıyla elde edilen zamanla değişen foto-akım ölçümlerinde kullanılmıştır. Sonuç olarak, bu yeni mikrodenetleyici tabanlı çok kanallı DGDÜ ve SAB ile hızlı, işlevsel ve esnek özellikleri olan bir otomatik veri toplama sistemi gerçekleştirilmiştir. Bu bileşik sistem tıbbi uygulamalardan, uzay uygulamalarına optoelektronik uygulamalardan dedektör uygulamalarına kadar geniş bir alanda kullanılabilir.

5. Discussion and Conclusion

In this study, microcontroller (PIC18F4550) based digital delayed pulse generator (DDPG) design was realized by using commercially available electronic components. In this way, 32-channel pulse signals were generated for an observation frame 32 times larger than the time-base signal, together with the trigger signal. Voltage changes, which change rapidly over time, were subjected to the sample-and-hold process

at TBX and TBY times, and digitized by the internal ADC in the DDPG unit at the time of TBY+1 and transferred to the computer. Using DDPG and SAU together, a two-gate composite system was used both for a reference triangular signal and for time-varying photocurrent measurements obtained by intermittent illumination of a commercial product LDR. As a result, an automatic data acquisition system with fast, functional and flexible features has been realized with this new microcontroller-based multi-channel DDPG and SAU. This composite system can be used in a wide range of applications, from medical applications to aerospace applications, from optoelectronic applications to detector applications.

6. Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”

Kaynakça

- [1] Kasri, N. F., & Piah, M. A. M. 2017. A compact and reliable pulse generator using dual 555-timer IC to produce PWM method. 2017 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON). Kuala Lumpur, Malaysia on 30-31 October, p. 100-104. DOI:10.1109/cencon.2017.8262466
- [2] Yang Zhang and C. E. Saavedra, 2004. A voltage-variable time delay element for clock waveforms, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2-5 May. (IEEE Cat. No.04CH37513), p. 551-554. DOI: 10.1109/CCECE.2004.1345096.
- [3] Karlsson, H.G., Börjesson, P.O. & Johnsson, A. 1971. An electronic delay circuit for biomedical simulations. Medical and Biological Engineering, 9, p. 721-724. DOI:10.1007/BF02474657
- [4] Cicalese, R., Aloisio, A., Branchini, P., Giordano, R., Izzo, V., & Loffredo, S. (2008). Implementation of High-Resolution Time-to-Digital Converters on two different FPGA devices. Astroparticle, Particle and Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications, p. 50-54. DOI:10.1142/9789812819093_0008
- [5] Murray, A., & Hammond, P. 1999. Delay generators for time of flight experiments. Measurement Science and Technology, 10 (3), p. 225-231. DOI:10.1088/0957-0233/10/3/019
- [6] Guvench, S., Denton, M., Rollins, M., Guvench, M. 2000. Automated Semiconductor Device/Sensor Measurement System For Temperature And Magnetic Field Characterization, 2000 Annual Conference, 18-21.06.2000, St. Louis, Missouri, p. 5.119.1-5.119.8. DOI: 10.18260/1-2--8177.
- [7] Güngör, T., Güngör E., 2022. Yarıiletken Aygıt Karakterizasyonu için Arduino UNO Tabanlı Otomatik Hall/Direnç Ölçüm Sistem Tasarımı ve Uygulaması, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 24 (70), s. 205-212. DOI:10.21205/deufmd.2022247019
- [8] Bruzzi, M., Menichelli, D., Pirollo, S., Sciortino, S. 2000. Photo-induced deep level analysis in undoped CVD diamond films, Diamond and Related Materials, 9 (3-6), p.1081-1085. DOI:10.1016/S0925-9635(00)00197-7
- [9] Hurtes, Ch., Boulou, M., Mitonneau, A., and Bois, D. 1978. Deep-level spectroscopy in high-resistivity materials, Applied Physics Letters, 32 (12), p. 821-823. DOI:10.1063/1.89929
- [10] Lang, D. V. 1974. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors, Journal of Applied Physics, 45, p. 3023-3032. DOI: 10.1063/1.1663719
- [11] Das, A., Singh, V. A., Lang, D. V. 1988. Deep-level transient spectroscopy (DLTS) analysis of defect levels in semiconductor alloys, Semiconductor Science and Technology, 3 (12), p. 1177-1183. DOI:10.1088/0268-1242/3/12/005
- [12] Rakhshani, A. E., Khan, W. I., Mathew, X. 1996. Additive double gate analysis in photoinduced current transient spectroscopy: Application to cuprous oxide, Physica Status Solidi B-basic Solid State Physics, 196, p.163-173. DOI:10.1002/pssb.2221960117
- [13] Kremer, R. E., Arikian, M. C., Abele, J. C., and Blakemore, J. S. 1987. Transient photoconductivity measurements in semi-insulating GaAs. I. An analog approach, Journal of Applied Physics, 62, p. 2424-2431. DOI: 10.1063/1.339849
- [14] Reddy, C. V., Fung, S., and Beling, C. D. 1996. A simple and inexpensive circuit for emission and capture deep level transient spectroscopy, Review of Scientific Instruments, 67, p. 257-261, (1996). DOI:10.1063/1.1147586
- [15] Collier, J. L., Goddard, B. J., Goode, D. C., Marka, S., and Telle, H. H. 1996. A low-cost gated integrator boxcar averager, Measurement Science and Technology, 7 (9), p. 1204-1211. DOI: 10.1088/0957-0233/7/9/003
- [16] Suzuki, R., Umezu, K., Takuma, H., and Shimizu, F. 1981. Multiple sampling digital boxcar integrator, an efficient signal averager, Review of Scientific Instruments, 52, p. 287-292, DOI:10.1063/1.1136589
- [17] Wahl, M., Röhlicke, T., Rahn, H. J., Erdmann, R., Kell, G., Ahlrichs, A., Kernbach, M., Schell, A. W., Benson, O. 2013. Integrated Multichannel Photon Timing Instrument with Very Short Dead Time and High Throughput, Review of Scientific Instruments, 84, p. 043102. DOI: 10.1063/1.4795828
- [18] Mathew, X. 2003. Photo-induced current transient spectroscopic study of the traps in CdTe, Solar Energy

DEÜ FMD 25(73), 255-262, 2023

Materials and Solar Cells, 76 (3), p. 225-242.
DOI:10.1016/S0927-0248(02)00276-3

[19] PIC18F4550, <https://www.microchip.com/en-us/product/PIC18F4550> (Erişim Tarihi: 14.04.2022).