



Konferans Bildirisi

PWM Tabanlı İki Pinli LED Sürücü Tasarımı ile Downlighter Tipi Otomotiv Aydınlatması

Barış İspir^{1*}, Barbaros Kurt²

¹ Al-Kor Makina., Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0006-1710-0675>, E-mail: baris.ispir@al-kor.com.tr,

² Al-Kor Makina., Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0009-6579-4175>, E-mail: barbaros.kurt@al-kor.com.tr,

* Sorumlu Yazar: baris.ispir@al-kor.com.tr

5th International Conference on Access to Recent Advances in Engineering and Digitalization
June 19 - 20, 2025

Received: 12 April 2025

Revised: 02 June 2025

Accepted: 09 June 2025

Published: 30 June 2025

This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Reference: spir, B., & Kurt, B. (2024). Downlighter type automotive lighting with PWM based two pin LED driver design. Orclever Proceedings of Research and Development, 6(1), 33-44.

Özet

Otomotiv sektöründe dış aydınlatma sistemleri araçların güvenliğini artırmak ve estetik görünürlüğü iyileştirmek açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, özellikle ticari araçların arka tarafında konumlandırılan Downlighter tipi LED aydınlatma sistemlerinin PWM kaynağı ile beslenmesinin sunduğu avantajlar ele alınmaktadır. Modern araç tasarımlarında dış aydınlatma sistemleri hem güvenlik hem de estetik açısından önemli bir bileşen haline gelmiştir. Özellikle ticari araçlar için, arka kapı bölgesinde gerçekleştirilen yükleme ve boşaltma işlemleri sırasında yeterli aydınlatma sağlanması, operasyonel güvenliği doğrudan etkilemektedir. Arka kısımda homojen bir ışık dağılımı sunan Downlighter tipi LED sistemleri, kullanıcıya estetik bir görünüm kazandırırken, aynı zamanda çevresel fark edilebilirliği artırarak güvenlik açısından da katkı sunmaktadır. LED teknolojisinin sunduğu yüksek enerji verimliliği, uzun ömür ve daha düşük enerji tüketimiyle yüksek performans elde edilmesini sağlamaktadır. Bunun yanında, bu sistemlerin "dim edilebilirlik" özelliği sayesinde ışık şiddeti kullanım senaryolarına göre ayarlanabilmekte; böylece enerji tasarrufu sağlanmakta ve kullanıcıya esnek bir aydınlatma çözümü sunulmaktadır. Downlighter tipi LED aydınlatma sistemleri, otomotiv sektöründe hem



güvenlik hem de maliyet etkinliği açısından önemli bir çözüm sunmaktadır. Özellikle ticari araçlarda sağladığı aydınlatma desteğiyle gece operasyonlarının güvenliğini artırırken, enerji verimliliği ve ayarlanabilir ışık seviyesi gibi özellikleriyle de modern otomotiv tasarımlarının ihtiyaçlarını karşılamaktadır.

Bu çalışmada, araç dışı aydınlatma sistemlerinde kullanılmak üzere tasarlanmış PWM (Pulse Width Modulation – Darbe Genişlik Modülasyonu) tabanlı bir LED sürücü uygulaması ele alınmaktadır. Sistem, özellikle ticari araçların arka kısmında konumlandırılan Downlighter tipi LED aydınlatma çözümleri için geliştirilmiştir. Tasarım, ışık şiddetinin hassas kontrolünü sağlamanın yanı sıra enerji verimliliği ve maliyet etkinliği açısından da avantajlar sunmaktadır. Otomotiv sektöründe dış aydınlatma sistemleri, güvenliğin artırılması ve gece operasyonlarının daha emniyetli hale getirilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Özellikle arka tarafta yükleme ve boşaltma işlemlerinin gerçekleştirildiği ticari araçlarda homojen ışık dağılımı sağlayan Downlighter tipi LED sistemleri kritik rol oynar. Bu bağlamda, ışık şiddetinin etkin şekilde kontrol edilebildiği enerji verimli sistemlere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Tasarımı yapılan PWM tabanlı LED sürücü, darbe genişliğini değiştirerek LED’lerin ışık şiddetini hassas biçimde kontrol edebilmektedir. Bu kontrol tekniği sayesinde, düşük enerji tüketimiyle yüksek aydınlatma performansı elde edilmektedir. Sistem, "dim edilebilirlik" özelliğiyle kullanım senaryolarına göre ışık düzeyini esnek şekilde ayarlamaya olanak tanırken, enerji tasarrufu da sağlamaktadır. Ayrıca, klasik 3 pinli devre topolojinin yerine 2 pinli tasarım tercih edilmiş, devrede kullanılan giriş filtre kondansatörlerinin boyutları optimize edilerek hem PCB alanından tasarruf sağlanmış hem de maliyetler azaltılmıştır. Bu iyileştirmeler, yüksek hacimli otomotiv üretimlerinde ekonomik açıdan önemli katkılar sunmaktadır. PWM kontrollü LED sürücü tasarımı, Downlighter tipi otomotiv dış aydınlatma sistemleri için hem teknik hem ekonomik olarak uygun bir çözümdür. Işık şiddetinin hassas biçimde ayarlanabilmesi, enerji verimliliğinin yüksek ve sistem maliyetlerinin düşük olması, ürünün hem OEM hem de son kullanıcı tarafından tercih edilirliliğini artırmaktadır.

Anahtar: Otomotiv aydınlatması, LED teknolojisi, Downlighter, enerji verimliliği, güvenlik, ticari araçlar, PWM, 2 kablolu dim edilebilirlik, LED sürücü, maliyet optimizasyonu



Downlighter Type Automotive Lighting with PWM Based Two Pin LED Driver Design

Abstract

In the automotive industry, exterior lighting systems play a critical role in enhancing vehicle safety and improving aesthetic visibility. This study focuses on the advantages offered by powering Downlighter-type LED lighting systems—specifically positioned at the rear of commercial vehicles—using a PWM (Pulse Width Modulation) source. In modern vehicle design, exterior lighting systems have become a key component both for safety and aesthetic purposes. Especially for commercial vehicles, providing adequate lighting during loading and unloading operations at the rear door area directly impacts operational safety.

Downlighter-type LED systems, which offer homogeneous light distribution at the rear, enhance environmental visibility and contribute to safety, while also providing an aesthetically pleasing appearance. The high energy efficiency, long lifespan, and lower power consumption offered by LED technology ensure high performance. Additionally, thanks to their dimmable feature, these systems allow light intensity to be adjusted according to different usage scenarios, resulting in energy savings and offering a flexible lighting solution to the user.

Downlighter-type LED lighting systems present a significant solution in the automotive industry in terms of both safety and cost-effectiveness. In particular, they enhance the safety of night-time operations in commercial vehicles by providing lighting support, while their energy efficiency and adjustable brightness meet the needs of modern automotive designs.

This study discusses a PWM (Pulse Width Modulation)-based LED driver application designed for use in vehicle exterior lighting systems. The system is specifically developed for Downlighter-type LED lighting solutions located at the rear of commercial vehicles. The design offers advantages not only in terms of precise light intensity control but also in terms of energy efficiency and cost-effectiveness.

Exterior lighting systems in the automotive industry are of great importance for increasing safety and ensuring safer night-time operations. In commercial vehicles where loading and unloading operations are performed at the rear, Downlighter-type LED systems that provide uniform light distribution play a critical role. In this context, there is an increasing need for energy-efficient systems with effective light intensity control.



The designed PWM-based LED driver can precisely control LED brightness by adjusting the pulse width. This control technique enables high lighting performance with low energy consumption. With its dimmable feature, the system allows flexible adjustment of light levels based on usage scenarios while also saving energy.

Moreover, instead of the conventional 3-pin circuit topology, a 2-pin design was preferred, and the sizes of the input filter capacitors used in the circuit were optimized, resulting in PCB space savings and cost reduction. These improvements provide significant economic benefits in high-volume automotive production.

The PWM-controlled LED driver design is a technically and economically suitable solution for Downlighter-type automotive exterior lighting systems. The ability to precisely adjust light intensity, high energy efficiency, and low system cost increase the product's appeal for both OEMs and end users.

Keywords: Automotive lighting, LED technology, Downlighter, energy efficiency, safety, commercial vehicles, PWM, 2-wire dimmability, LED driver, cost optimization



1. Giriş

Bu çalışma, otomotiv sektöründe kullanılan Downlighter tipi dış aydınlatma sistemleri için geliştirilen “PWM (Pulse Width Modulation)” tabanlı bir LED sürücü tasarımını sunmaktadır. Tasarım, geleneksel üç pinli LED sürücü sistemlerinden farklı olarak yalnızca iki pin (POWER ve GND) kullanarak hem devre sadeleşmesini hem de maliyet avantajını mümkün kılmaktadır. Bu yöntem sayesinde montaj kolaylığı sağlanmakta, kablo sayısı azaltılmakta ve toplam sistem maliyeti düşürülmektedir. Ayrıca, PWM sinyalinin darbe genişliği üzerinden ışık şiddetinin hassas kontrolü mümkün hale getirilmekte, giriş filtre kondansatörlerinin boyutları küçültülerek hem enerji verimliliği hem de ekonomik kazanım elde edilmektedir.

Otomotiv dış aydınlatma sistemleri, özellikle ticari araçların operasyonel güvenliğini ve estetik görünümünü artırmak amacıyla kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, yükleme ve boşaltma işlemlerinin sıklıkla gerçekleştirildiği araç arka bölgelerinde homojen ışık dağılımı sağlayan Downlighter tipi LED sistemleri tercih edilmektedir. Ancak bu sistemlerde hem enerji verimliliği hem de üretim maliyetleri önemli tasarım kriterleri arasında yer almaktadır. Çalışmada sunulan yeni LED sürücü çözümü, bu ihtiyaçlara karşılık verecek şekilde optimize edilmiştir.

Tasarımın en önemli yeniliklerinden biri, geleneksel LED sürücü mimarisinde yer alan CTRL pininin kullanım dışı bırakılmasıdır. Konvansiyonel sistemlerde POWER, CTRL ve GND olmak üzere üç pin üzerinden çalışan yapılar tercih edilirken, bu çalışmada yalnızca POWER (PWM) ve GND pinleri kullanılmaktadır. Bu sadeleştirme, devre karmaşıklığını azaltmakta ve montaj süresini kısaltmaktadır. Kablo sayısındaki azalma, özellikle büyük ölçekli üretimlerde hem işçilik hem de kablo maliyetleri açısından önemli bir tasarruf sağlamaktadır. PWM sinyali, yüksek kapasiteli bir giriş filtre kondansatörü aracılığıyla DC bileşene dönüştürülmekte, ardından aktif bir filtre devresi ile stabilize edilmektedir. Bu sayede LED'lere sabit bir besleme gerilimi sağlanmakta ve ışık şiddeti PWM darbe genişliğiyle hassas biçimde kontrol edilebilmektedir. Geleneksel sistemlerde PWM kontrol aralığı %0–100 arasında değişmekteyken, bu tasarımda %60–100 aralığı tercih edilmiştir. Bu sayede hem daha kararlı bir ışık şiddeti kontrolü elde edilmekte hem de daha küçük kapasitörlerle aynı performans sağlanarak maliyet azaltılmaktadır.

PWM sinyali doğrudan LED'lere uygulanamayacak kadar yüksek frekanslı ve değişken karakterli olduğundan, öncelikle bir doğrultucu ve filtre devresinden geçirilerek sabit DC gerilim elde edilmiştir. Diyotlar ve kondansatörler yardımıyla oluşturulan bu yapı, PWM sinyalinin pozitif yarı dalgalarını düzgün bir DC forma çevirirken, filtre kondansatörleri ise dalgalanmaları azaltarak LED'lere pürüzsüz bir güç iletimi sağlar. Böylece, LED'lerin uzun ömürlü ve yüksek performanslı çalışması garanti altına alınmaktadır.



Ayrıca kondansatörlerin küçültülmesiyle devre boyutu optimize edilmiş, bu da özellikle dar alanlı otomotiv uygulamaları için avantaj sağlamıştır. Üretim süresinin kısılması ve daha az bileşen gereksinimi ile hem parça hem de işçilik maliyetleri azaltılmıştır. Sonuç olarak, sistemin toplam sahip olma maliyeti önemli ölçüde düşürülmüştür.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. DIMMING Yöntemi

2.1.1. Dijital Dimleme Yöntemi Olarak PWM (Pulse Width Modulation)

Dijital dimleme işlemi, LED aydınlatma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup, genellikle PWM (Pulse Width Modulation - Darbe Genişlik Modülasyonu) tekniği ile gerçekleştirilir. Bu yöntemde, LED'e uygulanan besleme gerilimi sürekli bir DC sinyal yerine, belirli bir frekansta üretilen kesikli bir kare dalga formunda sunulur. PWM sinyali, belirli zaman aralıklarında tekrarlanan kısa darbe sinyallerinden oluşur ve bu sinyalin duty cycle (görev döngüsü) oranı, LED'in parlaklık seviyesini doğrudan belirler.

Duty cycle oranı, bir PWM periyodundaki darbe süresinin toplam periyoda oranıdır. Örneğin, %50 duty cycle değeri, sinyalin süresinin yarısında aktif (yüksek), diğer yarısında ise pasif (düşük) olduğu anlamına gelir. Bu durumda LED, toplam sürenin yarısında enerji alarak yaklaşık yarı parlaklıkta çalışır. Görev döngüsü arttıkça, LED'lerin iletimde kaldığı süre uzar ve ışık şiddeti artar; azaldıkça ise ışık seviyesi düşer. Bu sayede, LED'lerin parlaklığı yüksek doğrulukla ve lineer olmayan karakteristiği göz önünde bulundurularak hassas bir şekilde kontrol edilebilir.

PWM dimming yönteminin en önemli avantajlarından biri, yüksek enerji verimliliği sunmasıdır. LED'lere uygulanan voltaj doğrudan kesilmediği, sadece zaman periyoduna yayılmış şekilde aktarıldığı için, güç kayıpları oldukça düşüktür. Bu da özellikle batarya ile çalışan sistemlerde veya enerji tasarrufunun öncelikli olduğu otomotiv uygulamalarında büyük önem taşır.

Bununla birlikte, PWM tabanlı dimleme sistemlerinde flicker (gözle algılanabilir titreme) gibi olumsuz etkiler görülebilir. Flicker, özellikle düşük PWM frekanslarında veya hızlı kamera hareketlerinde fark edilebilir hale gelir. Bu durumun önüne geçilebilmesi için PWM frekansının yeterince yüksek seçilmesi ya da hibrit dimming tekniklerinin kullanılması önerilmektedir.

2.1.2. Analog Dimleme Yöntemi

Bu çalışmada kullanılan aydınlatma tasarımında, ışık şiddetinin kontrolü için analog dimming yöntemi tercih edilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, dijital dimleme



yöntemlerinin aksine, LED'lere uygulanan çıkış gerilimi kesintisiz bir biçimde korunmuş ve sürekli bir ışık çıkışı elde edilmiştir.

Analog dimming, LED'lerin parlaklık seviyesini kontrol etmek amacıyla uygulanan sabit DC gerilim veya akımın seviyesini doğrudan değiştirme esasına dayanır. Gerilim veya akım artırıldığında LED'lerin ışık şiddeti artar; azaltıldığında ise ışık şiddeti azalır. Bu yöntemle, LED'lerin ışık çıkışı lineer ve sürekli bir şekilde ayarlanabildiğinden, daha doğal, göz yormayan ve homojen bir dimleme profili elde edilmektedir. Özellikle ışık kaynağının renk sıcaklığının sabit kalması gereken uygulamalarda, analog dimming yöntemi daha stabil bir renk üretimi sağlar; bu da görsel konfor açısından önemli bir avantaj sunar.

Ancak, analog dimming yönteminin bazı sınırlamaları da mevcuttur. Gerilim veya akım düzeyinde yapılan değişiklikler sırasında sistemde enerji kayıpları meydana gelebilir. Bu durum, PWM tabanlı dijital dimming yöntemlerine kıyasla daha düşük enerji verimliliği ile sonuçlanabilir. Ayrıca, analog dimming sistemleri genellikle daha karmaşık analog devre tasarımları, hassas bileşenler ve ek termal yönetim önlemleri gerektirir. Bu nedenle, sistem maliyeti ve tasarım karmaşıklığı dijital çözümlere göre daha yüksek olabilir. Sonuç olarak, analog dimming yöntemi; renk stabilitesi, ışık akısında süreklilik ve flicker oluşumunun minimize edilmesi açısından öne çıkan bir çözüm olmakla birlikte, enerji verimliliği ve sistem karmaşıklığı gibi parametreler göz önünde bulundurularak uygulama bazında değerlendirilmelidir.

2.1.3. Tasarlanan Devre

Bu çalışmada geliştirilen LED sürücü devresi, otomotiv standartlarına uygun, yüksek verimli ve güvenilir bir çözüm sunan IC entegresi temel alınarak tasarlanmıştır. IC, LED aydınlatma uygulamaları için özel olarak geliştirilmiş, entegre DC-DC buck dönüştürücü mimarisine sahip bir LED sürücü entegresidir. IC, entegre analog dimming fonksiyonu sayesinde, LED'lerin ışık şiddetini sabit DC gerilim ile lineer ve kesintisiz olarak ayarlayabilmektedir. Bu analog dimleme özelliği, ışık geçişlerinde gözle algılanabilir titreme veya ani değişimler olmadan, doğal ve konforlu bir aydınlatma deneyimi sağlar. PWM sinyallerinden kaynaklanabilen flicker etkisini ortadan kaldırarak hem sürüş güvenliği hem de görsel konfor açısından avantaj sunar.

LED sürücü, yüksek verimlilikle çalışan bir buck dönüştürücü olarak, giriş voltajını LED'lerin ihtiyaç duyduğu seviyeye düşürerek minimum güç kaybı ile çalışır. %90'ın üzerinde verimlilik oranlarına ulaşabilen bu yapı, ısı yayılımını azaltmakta, bu sayede termal yönetim ihtiyacını düşürmekte ve sistemin uzun süre kararlı çalışmasına olanak



tanınmaktadır. Geniş giriş voltajı aralığı (4.5V – 60V), entegrenin farklı araç platformlarında ve uygulama senaryolarında rahatlıkla kullanılabilmesini sağlar.

LED sürücünün sahip olduğu yüksek güç faktörü ve düşük toplam harmonik distorsiyon (THD) değerleri, elektromanyetik uyumluluk (EMC) açısından sistemin otomotiv ve endüstriyel standartlara uygunluğunu sağlar. Bu durum, parazit ve gürültü kaynaklı sorunların azaltılmasına katkı sunar. Ayrıca, entegre; aşırı akım koruması, termal kapanma, kısa devre koruması gibi çok katmanlı güvenlik önlemleriyle donatılmıştır. Bu koruma özellikleri, sistemin uzun ömürlü ve güvenilir çalışmasını garanti altına almaktadır.

Kullanılan LED sürücü, çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilecek esneklikte tasarlanmıştır. Özellikle otomotiv aydınlatma sistemlerinde — arka farlar, iç mekân aydınlatmaları ve sinyal lambaları gibi — yaygın olarak kullanılmakta, güvenli sürüş koşullarını desteklemektedir. Bunun yanı sıra, endüstriyel aydınlatma, dış mekân güvenlik aydınlatması, sokak lambaları ve konut içi enerji tasarruflu aydınlatma sistemlerinde de yaygın biçimde uygulanabilir.

Devre tasarım sürecinde, yalnızca teknik performans değil, aynı zamanda maliyet etkinliği de temel tasarım kriteri olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda, ekonomik bir çözüm geliştirilmiş, aynı zamanda sistemin gelecekteki gereksinimlere cevap verebilmesi amacıyla modüler ve genişletilebilir bir yapı benimsenmiştir. Geliştirilen platform, gelecekte CAN-Bus veya LIN-Bus gibi iletişim protokolleri ile entegre edilerek işlevselliği artırılabilir ve kullanıcı deneyimi daha da zenginleştirilebilir.

Geliştirilen buck converter tabanlı LED sürücü devresi, yüksek verimlilik, güvenilirlik, elektromanyetik uyumluluk ve maliyet avantajları ile otomotiv sektörünün güncel beklentilerine cevap veren bütüncül ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Özellikle kapasitif dokunmatik tabanlı kontrol sistemleriyle entegrasyonu sayesinde, araç içi ve dışı aydınlatma sistemlerinde yenilikçi ve güvenli uygulamaların önünü açmaktadır.

2.1.4. Elektronik Kart Tasarımı

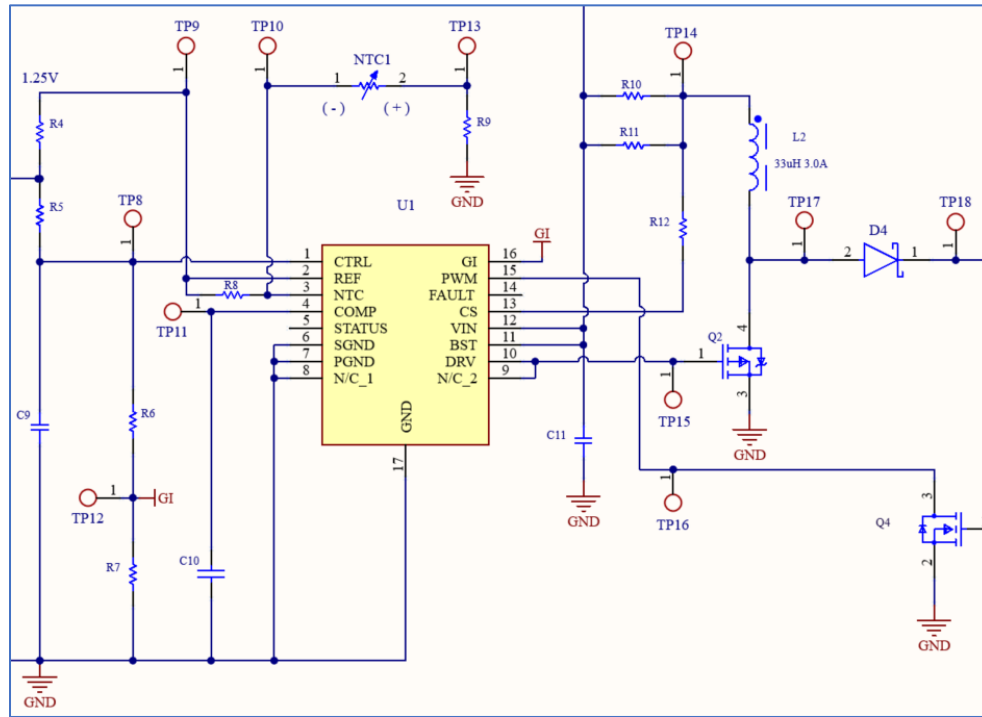
Geliştirilen LED sürücü kartı, yüksek verimlilik, güvenilirlik ve termal dayanıklılık ilkeleri doğrultusunda tasarlanmış olup, üç ana işlevsel bloktan oluşmaktadır:

- Giriş filtre ve koruma devresi
- Tek kanallı LED sürücü entegresi (AL8871Q)
- Aktif kontrol sinyali filtresi
- 4 adet yüksek parlaklık LED çıkışı

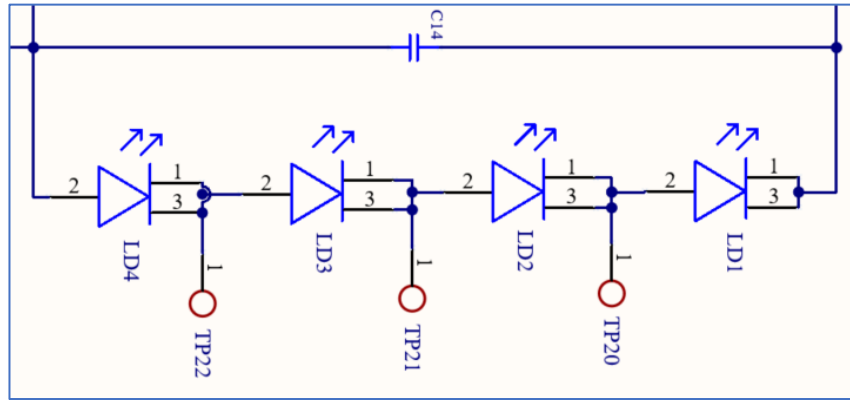
Kart tasarımı, her bir LED için 850 mA sabit akım sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Bu akım değeri, hem yeterli ışık çıkışı sağlamakta hem de LED'lerin termal sınırlarını aşmadan uzun ömürlü çalışmasına imkân tanımaktadır.

Sistemin sürekli kararlı çalışmasını sağlamak ve sıcaklık kaynaklı performans düşüşlerini önlemek amacıyla gelişmiş bir termal yönetim yaklaşımı uygulanmıştır. PCB, tek yüzöl ve 2 oz (70 mikron) kalınlığında bakır kaplamaya sahip olarak tasarlanmıştır. Bu sayede ısı dağılımı hem üst hem de alt katmanlar üzerinden gerçekleştirilmiş, iletkenlik artırılmıştır.

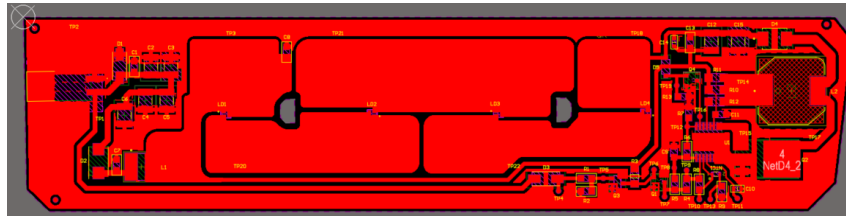
Ek olarak, LED sürücü entegresinin alt yüzeyine alüminyum tabanlı bir soğutucu entegre edilerek, oluşan ısının hızlı bir şekilde sistem dışına aktarılması sağlanmıştır. Bu yapı, termal direnç değerlerini düşürerek komponent sıcaklıklarının güvenli sınırlar içerisinde kalmasına katkıda bulunmakta ve kartın güvenilirliğini ve ömrünü önemli ölçüde artırmaktadır.



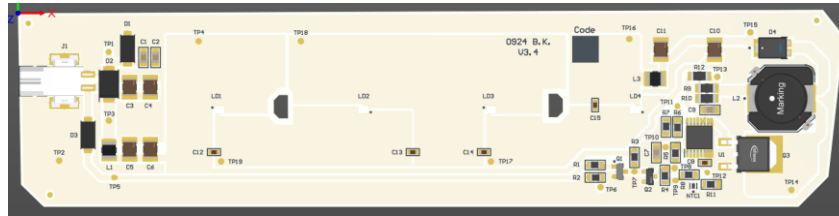
Şekil 1: LED Sürücü ve Çevre Bileşenleri



Şekil 2: LED dizileri



Şekil 3: PCB'nin katmanları



Şekil 4: PCB'nin 3D görüntüsü

2.1.5. Elektronik Kartın Güç Tüketimi ve Termal Gereksinimleri

Geliştirilen LED sürücü kartının güç tüketimi, LED'lerin forward gerilimi ve sürülen akım değerleri temel alınarak hesaplanmıştır. Tasarımda kullanılan DOWNLIGHTER tipi LED'ler, seri bağlı dört LED'den oluşan tek bir kanal üzerinden sürülmektedir. Her bir LED'e uygulanan sabit sürücü akımı 850 mA olarak belirlenmiştir. LED başına düşen forward voltaj değeri yaklaşık 3.0 V olup, sistemin toplam güç tüketimi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

Bu doğrultuda, LED başına harcanan ortalama güç 2.55 W seviyesindedir. Söz konusu güç değeri, yüksek ışık çıkışı sağlayan LED uygulamalarında olağan bir seviyede olup, sistemin termal performansını optimize etme ihtiyacını doğurmaktadır.



10.2 W'lık toplam güç tüketimi, sistemin çalışması sırasında önemli miktarda ısı üretimine yol açmaktadır. Bu nedenle, ısının etkili bir şekilde dağıtılması ve ortam sıcaklığından bağımsız olarak sistemin termal dengede kalması kritik öneme sahiptir.

Bu amaçla, kart üzerinde 2 oz (70 mikron) kalınlığında bakır yüzey kullanılmış, ısı iletim yolları optimize edilmiştir. Ayrıca LED entegresinin alt yüzeyine temas eden yüksek ısı iletkenliğine sahip alüminyum soğutucu aracılığıyla, termal dağılım daha verimli hâle getirilmiştir.

Bu termal yapı sayesinde sıcaklık kaynaklı performans düşüşleri önlenmekte, komponentlerin güvenli çalışma aralığında kalması sağlanmakta ve ürünün uzun süreli kararlı çalışması garanti altına alınmaktadır.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada, PWM beslemeli LED sürücü sistemleri temel alınarak geliştirilen bir LED sürücü devresi ayrıntılı şekilde incelenmiştir. PWM teknolojisinin sağladığı enerji verimliliği, hassas ışık kontrolü ve maliyet etkinliği gibi avantajlar; özellikle otomotiv ve endüstriyel aydınlatma sistemleri gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda önemli katkılar sunmaktadır.

Tasarımda tercih edilen analog dimming yaklaşımı, ışık şiddetinin sabit gerilim seviyesi üzerinden lineer bir şekilde kontrol edilmesini mümkün kılmış; bu sayede gözle algılanan titreme (flicker) gibi olumsuz etkiler ortadan kaldırılmış, daha doğal ve homojen bir ışık geçişi sağlanmıştır. Analog dimming'in sağladığı bu pürüzsüz kontrol, özellikle görsel konforun ön planda olduğu otomotiv iç ve dış aydınlatmalarında önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

Kullanılan LED sürücü entegresi, geniş giriş gerilimi aralığı (4.5V - 60V), yüksek verimlilik (> %90), düşük toplam harmonik distorsiyon (THD) ve gelişmiş koruma mekanizmaları (aşırı akım, aşırı sıcaklık, kısa devre koruması) ile güvenilirlik, performans ve enerji verimliliğini bir arada sunmaktadır. Bu özellikler sayesinde entegre, zorlu çevresel koşullarda dahi kararlı ve uzun ömürlü bir çalışma performansı sergilemektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında geliştirilen elektronik devre, otomotiv aydınlatma sistemleri başta olmak üzere endüstriyel ve konut tipi LED uygulamaları için de ölçeklenebilir, güvenli ve enerji tasarruflu bir çözüm sunmaktadır. LED sürücünün sağladığı teknik üstünlükler, onu güncel ve gelecekteki LED tabanlı aydınlatma sistemlerinde önemli bir alternatif hâline getirmektedir. Sistem, aynı zamanda CAN-Bus veya LIN-Bus gibi haberleşme protokollerine açık mimarisi ile ileride yapılacak



geliştirmelere de uygundur. Bu yönüyle çalışma, sürdürülebilir, ekonomik ve teknik açıdan optimize edilmiş bir LED sürücü çözümünün temelini oluşturmaktadır.

Referanslar

- [1] <https://www.diodes.com/applications/automotive-applications/comfort-style-and-safety/lighting-automotive/automotive-exterior-front-lighting/>
- [2] <https://www.ti.com/video/5780115707001#:~:text=PWM%20dimming%20modulates%20the%20regulated,in%20the%20LED%20light%20output>
- [3] [https://www.ti.com/lit/an/snva768/snva768.pdf?ts=1748331562129&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F#:~:text=Analog%20PWM%20dimming%20takes%20the,in%20a%20regulated%20current%20sink\)](https://www.ti.com/lit/an/snva768/snva768.pdf?ts=1748331562129&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F#:~:text=Analog%20PWM%20dimming%20takes%20the,in%20a%20regulated%20current%20sink))