



**DARBELİ YÜKSEK AKIMLARDA
LED'İN ANAHTARLAMA SÜRELERİNİN İNCELENMESİ**

*(THE INVESTIGATION OF LED'S SWITCHING TIMES
AT PULSED HIGH CURRENTS)*

Erdem ÖZÜTÜRK*

ÖZET / ABSTRACT

Darbeli akımda darbe süresi ve darbe süresi / boşluk süresi Oranı uygun olduğunda LED'den nominal doğru akımının çok üzerinde genliğe sahip darbeleri akıtılabilir. LED akımı arttıkça LED'in anahtarlama süreleri düşük akım değerlerine nazaran farklı olacaktır. Bu çalışmada LED'in büyük genlikli akım değerlerine karşı gösterdiği nonlineer davranışı ele alınarak yüksek akım değerlerinde anahtarlama sürelerinin değişimi incelenmiştir. SPICE programı kullanılarak ve matematiksel olarak yapılan incelemede akım darbelerinin genliği arttıkça anahtarlama sürelerinin azaldığı gösterilmiştir.

If pulse duration and pulse duration / period ratio are chosen suitable in pulsed operation high currents can be passed through the LED. LED's switching times will be different at higher currents pulses. In this study according to the nonlinear behavior of LED at pulsed high currents the changes of switching times has been investigated and using SPICE program and mathematically decreasing of switching times as current increasing is showed.

ANAHTAR KELİMELER / KEYWORDS

LED, Darbeleri yüksek akım, Anahtarlama süreleri.
LED, Pulsed high current, Switching times.

1. GİRİŞ

LED'in verdiği ışığın şiddeti LED akımı arttıkça artmaktadır. Darbeli akımda LED'in ısınmadığı darbe süresi ve darbe süresi / boşluk süresi oranlarında LED'den nominal akımına nazaran çok daha yüksek akımlar akıtılabilmektedir (Davidov, 1967; Bhattacharya, 1997; Watson, 1988; Wilson ve Hawkes, 2000). Birçok uygulamada daha yüksek ışık şiddeti elde etmek için LED'den akan akım darbesinin genliği artırılmaktadır. Bu nedenle LED'in darbeli yüksek akımlardaki davranışının bilinmesi önem kazanmaktadır. LED'in darbeli yüksek akımlarda önemli davranışlarından biri de akım darbesinin genliği arttıkça LED'in anahtarlama sürelerinin değişiminde ortaya çıkmaktadır.

Uygulamalarda çoğu zaman LED'in ışığını dedekte etmek üzere frekans dedektör devresi kullanılmaktadır (Özütürk, 2000; Özütürk ve Karlık, 1998). Eğer kullanılan frekans dedektör kullanılan LED'den daha yavaş ise akım darbesinin seçilebilecek en küçük darbe süresi, akım darbesinin meydana getirdiği ışık darbesini dedekte edecek olan frekans dedektör devresinin anahtarlama sürelerine bağlıdır. Aksi durumda, yani kullanılan LED'in frekans dedektörden daha yavaş olması durumunda frekans dedektör devresinden ışığa karşılık alınan elektriksel büyüklük olan gerilim darbesindeki anahtarlama süreleri büyük ölçüde LED tarafından belirlenmiş olacaktır.

Düşük akım değerlerinde genel amaçlı olarak kullanılan LED'lerin anahtarlama süreleri $1 \mu s$ ' den küçük olmaktadır. Bu nedenle diğer etkilerin (örneğin LED'in ısısının yükselmesi) belirlediği süreler yanında LED'in anahtarlama süreleri ihmal edilebilir değerde küçük olmaktadır. LED'in anahtarlama süreleri kadar kısa sürelerde LED ısınıp ışık şiddeti azalmadığından LED'in ışık şiddetinin içinden akan akımla doğru orantılı olduğu kabul edilebilir. Bu durumda yükselme ve gecikme süreleri dahilinde LED'in ışık şiddetinin zamanla değişimi LED akımının zamanla değişimine benzeyecektir.

Bu çalışmada, LED'in iletme geçme, kesime gitme, gecikme gibi anahtar olarak çalışmaya etkili olan ve dinamik davranışlar olarak nitelendirilen özelliklerinin akım darbelerinin yüksek genlikli değerlerinde değişimi ele alınacaktır. LED'de diyot gibi bir pn junction olduğundan yarıiletken diyotun elektriksel davranışı hakkında bilinenler LED için de geçerli olacaktır.

LED'in anahtarlama sürelerinin değişimi iki yöntemle incelenmektedir. Bunlardan biri SPICE programıyla yapılan incelemedir. SPICE programı ile yapılan incelemenin daha iyi anlaşılabilmesi için ilk olarak SPICE diyot modelinin kısaca açıklanmasına gerek duyulmuştur. Daha sonra yükselme ve gecikme sürelerinin darbeli yüksek akımlardaki değişimi matematiksel olarak incelenmiştir. Matematiksel incelemede, büyük ölçüde diyotların yüksek akım darbelerinde anahtarlama sürelerindeki değişimlerinin incelenmiş olduğu Sidov isimli kaynaktan yararlanılmıştır (Sidov, 1975).

2. MATERYAL VE YÖNTEM

LED'den akıtılan akım darbesinin genliği büyük değerde olduğunda LED'in elektriksel davranışını karakterize etmek için kullanılacak model nonlineer bir model olacaktır. LED de yarıiletken bir diyot olduğundan burada yapılan nümerik incelemede LED'in elektriksel modeli olarak SPICE diyot modeli kullanılmıştır (Hodges vd., 1988; Kuntman, 1992; Kuntman vd., 1996).

2.1. SPICE Diyot Modeli

Günümüzde yaygın olarak kullanılan SPICE simülasyon programında yer alan diyot modeli hem jonksiyonlu diyotlara, hem de Schottky diyotlarına uygulanabilir. SPICE diyot modeli Şekil 1’de görülmektedir.

Bu modelde ohmik gövde dirençleri r_D lineer direnci ile temsil edilmektedir. Diyotun doğru akım karakteristikleri lineer olmayan I_D akım kaynağı tarafından belirlenir. I_D akım kaynağının akımı

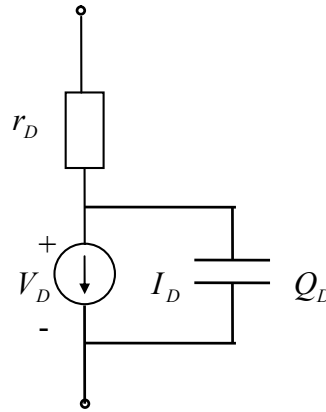
$$I_D = I_S \cdot [\exp(V_D / n \cdot V_T) - 1] \quad (1)$$

eşitliğiyle ifade edilmiştir. Modelle ilişkin I_S , r_D ve n parametreleri, diyotun ileri yönde kutuplama karakteristiklerinden hareketle belirlenebilir. I_S doğru akımı, elde edilen doğru akımın $V_D = 0$ noktasına uzatılması ile bulunabilir. I_S doğru akımının deneysel olarak bulunabilmesi için, ideal çalışma bölgesinde (orta akımlar bölgesi) çeşitli $I_D - V_D$ değerlerinin ölçümüyle saptanması gerekir. n emisyon katsayısı, ideal bölgede diyot karakteristiğinin eğiminden yararlanılarak bulunabilir. Çoğu durumda emisyon katsayısı 1’den fazladır.

Yüksek kutuplama seviyelerinde Ohmik dirençlerin etkisi nedeniyle ideal değişime göre sapmalar ortaya çıkar. Bunun yanısıra, $1/2V_T$ ile orantılı bir değişimle karşılaşılır. SPICE diyot modelinde, yüksek seviyeli enjeksiyon durumu temsil edilmemiştir. Bu iki olay, sadece, r_D lineer direncinin etkisi ile modellenmektedir. r_D gövde direncinin değeri, belirli bir akım değerinde diyot geriliminin ideal üstel karakteristiktan ne kadar saptığı belirlenerek bulunabilir. Pratikte, r_D ’nin değeri I_D akımının çeşitli değerlerinde belirlenir. Bunun nedeni, r_D değerlerinin diyot akımına bağımlılık göstermesidir. Bu değerlerin ortalaması alınarak r_D saptanır. Fiziksel diyot yapısı üzerindeki gerilim düşümü V_D' ile gösterilirse

$$V_D' = r_D \cdot I_D + V_D \quad (2)$$

elde edilir.



Şekil 1. SPICE diyot modeli.

Eşdeğer devredeki Q_D yükü, diyotaki yük birikimi olaylarını temsil etmektedir. Q_D yük elemanı ile SPICE’de iki ayrı yük birikimi olayı modellenmektedir. Jonksiyonun fakirleşmiş bölgesindeki yük birikimi C_{j0} , ϕ_0 ve m parametreleri ile temsil edilmektedir. Difüzyon kapasitesi ise τ_t geçiş süresi ile belirlenmektedir.

2.2. SPICE Programıyla Bir LED'in Anahtarlama Sürelerinin İncelenmesi

Ölçme yoluyla bir LED'in darbeleri yüksek akımlarda anahtarlama sürelerinde ne gibi değişikliklerin ortaya çıktığını bulmak için ölçülen anahtarlama sürelerinde ölçme devresinde yer alan LED dışındaki diğer elemanların ne ölçüde bir etki meydana getirdiğinin bilinmesi gerekir. Ölçme devresinde yer alan darbe osilatörünün ve darbe osilatörünün ürettiği darbelerle açılıp kapanarak LED'den darbeleri akım akmasını sağlayan anahtar devre elemanının anahtarlama sürelerinde etkisi olacaktır. Ölçme devresinde bulunan LED dışındaki devre elemanlarının LED'den daha yavaş olması durumunda ölçme hataları artacaktır. Ayrıca eğer LED'in verdiği ışık darbesindeki anahtarlama süreleri ölçülmek isteniyorsa bu takdirde ışık ölçmede kullanılan fotodedektör devresinin hızı ve hızının ışık darbesinin genliğiyle değişimi ölçülen sürelerde etkili olacaktır.

Her ne kadar SPICE diyot modelinde yüksek seviyeli enjeksiyon durumu tam olarak temsil edilmemişse de, darbeleri yüksek akımlarda anahtarlama sürelerinde yaklaşık olarak ne mertebede bir değişikliğin ortaya çıkabileceği SPICE programı kullanılarak görülebilir. Ayrıca SPICE simülasyon programının kullanılmasıyla ideal ölçme şartları oluşturulabilir.

Şekil 2'de SPICE ile oluşturulan ölçme devresi görülmektedir. Şekil 2b'den görüldüğü gibi LED'in RS direnci sıfır olarak kabul edilmiştir. Böylece LED uçlarından ölçülen gerilim gerilim-akım ilişkisi Eşitlik 1 ile verilmiş olan akım kaynağı uçlarındaki gerilim olmaktadır. RS direncinin etkisi, RS direnci değerindeki bir direncin (R1) devreye bağlanmasıyla temsil edilmiştir (Boylestad ve Nashelsky, 1992). pn jonksiyonunda ışık oluşturan olay taşıyıcı birleşmeleri olduğu için değişimi ilgilenilen büyüklük SPICE diyot modelinde yer almakta olan gerilime bağımlı akım kaynağının akımı I_D 'dir. SPICE programı, devreye uygulanan darbe süresi 60ns olan ve v genliği ayarlanabilir Ig1 darbeleri akım kaynağına göre diyodun bağlı olduğu uçlardaki gerilimin değişimini çizmektedir. Bu değişimin ölçülen tepe değeri V_M ise I_M akımının değeri:

$$I_M = I_S \left[\exp(V_M / 2.V_T) - 1 \right] \quad (3)$$

olacaktır. Bu akımın 0.9 katını oluşturan gerilime V_2 denilirse bu gerilim:

$$I_S \left[\exp(V_2 / 2.V_T) - 1 \right] = 0.9 I_S \left[\exp(V_M / 2.V_T) - 1 \right] \quad (4)$$

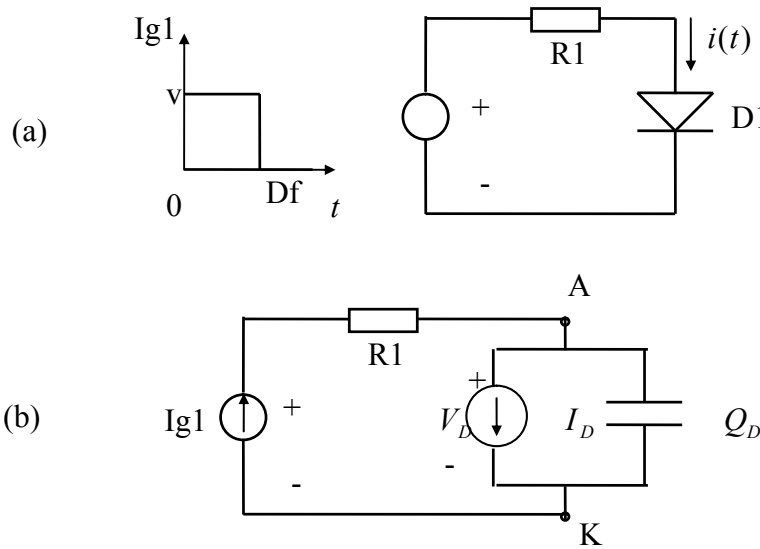
$$V_2 \cong 2.V_T \ln(0.9) + V_M = 0.050 \ln(0.9) + V_M \quad (5)$$

olarak bulunur. Aynı şekilde I_M akımının 0.1 katını oluşturan gerilim (V_1) ve 0.5 katını oluşturan gerilim (V_3), Eşitlik 5'te yer alan 0.9 sayısının yerine sırayla 0.1 ve 0.5 yazılarak hesaplanabilir. LED uçlarında V_2 geriliminin olduğu an $t_{r,2}$, V_1 geriliminin olduğu an $t_{r,1}$ olarak kabul edilirse, yükselme süresi $t_r = t_{r,2} - t_{r,1}$ olacaktır. Gecikme süresi yükselen kenarın V_3 gerilimi değerini aldığı an ($t_{r,3}$) olacaktır. Düşme süresi, inen kenarın V_2 gerilimi değerini aldığı an ile V_1 gerilimi değerini aldığı an arasındaki süredir. Düşme gecikmesi ise inen kenarın V_3 gerilimini aldığı andan akım kaynağının darbe süresi çıkarılarak bulunabilir. Yukarıda açıklanan devreyi tanımlayan SPICE programı Çizelge 1'de belirtilmektedir:

Çizelge 1.SPICE programı

D 1	an:2	ca:0	Mo=1N1
.MODEL	1N1 D	(IS=1.0e-14 N=2 RS=0 CJO=80.0e-12 TT=1.0e-10 VJ=1.0 M=0.5 EG=2.26)	
I g1	-out:0	+out:1	v=70m Ex=Pulse Fr=1 Df=60n
R 1	p1:1	p2:2	v=1

LED modelini oluşturan parametrelerden IS doyma akımını (I_S), N emisyon katsayısını (n), RS gövde direncini (r_D), CJO sıfır kutuplama jonksiyon kapasitesini (C_{j0}), TT geçiş süresini (τ_t), VJ potansiyel seddini (ϕ_0), M gradyan faktörünü (m), EG LED'in yapıldığı malzemenin bant boşluğu enerjisi değerini göstermektedir. Bu parametrelerin değerleri, tipik değerler ve yüksek enjeksiyon durumunda geçerli olan değerler gözönünde bulundurularak örnek bir LED için belirlenmiş olan değerlerdir.

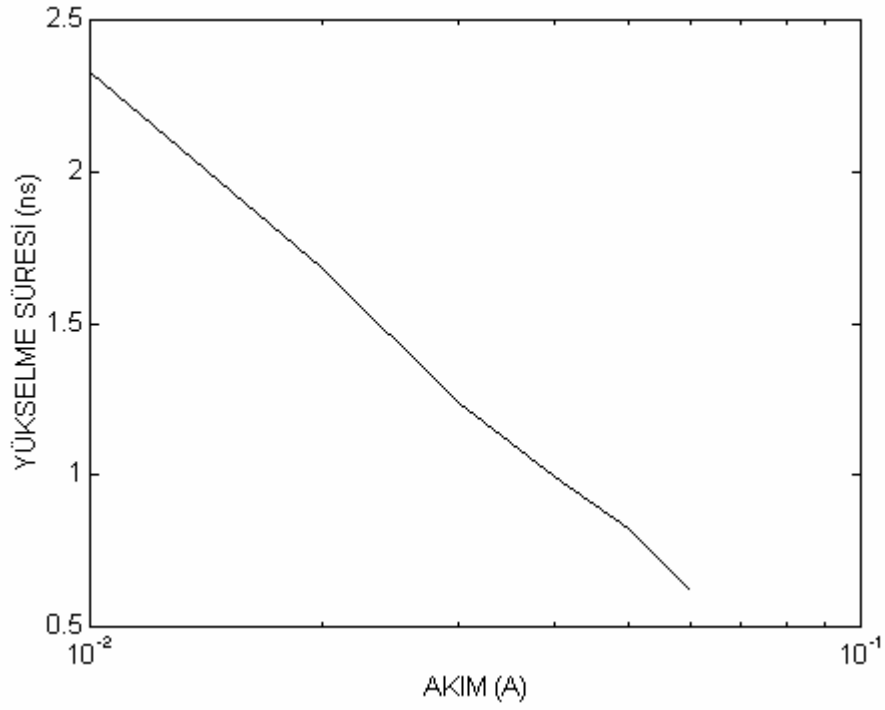


Şekil 2. (a) SPICE ile oluşturulan ölçme devresi, (b) Ölçme devresinin eşdeğer devresi

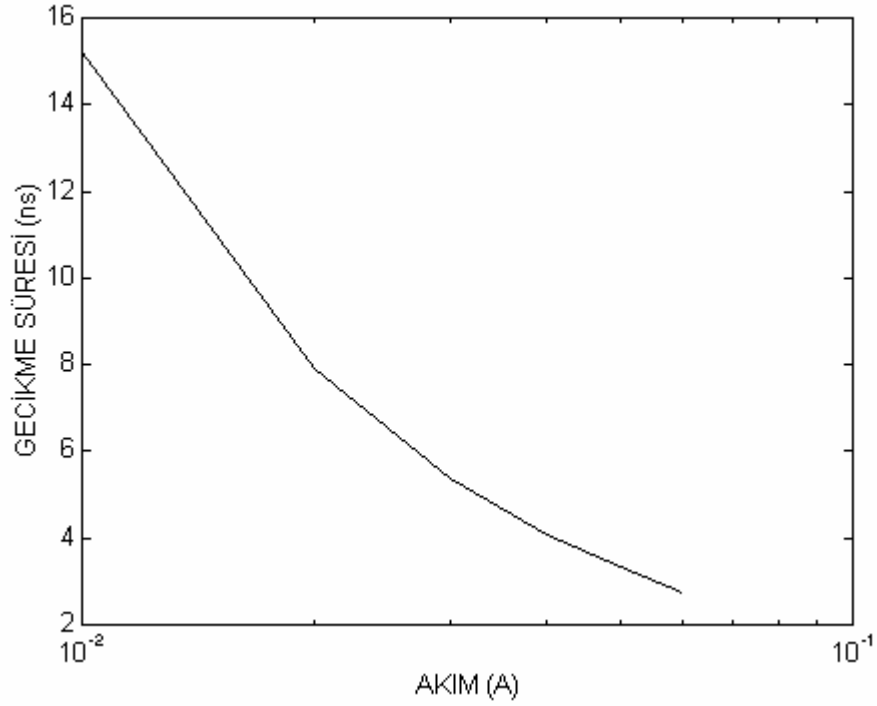
Yukarıda belirtilen değerlere göre, akım kaynağının değişik genlikleri için anahtarlama süreleri SPICE programıyla çizdirilmiş olan grafikler üzerinden ölçülmüş bulunmaktadır. Bu değerlere göre MATLAB programıyla çizilmiş olan değişimler, Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da görülmektedir. Çok yüksek sayılarda program hata yaptığı için sözkonusu şekillerde daha yüksek akımlardaki değişimler gösterilmemiştir.

2.3. LED'in Darbeli Akımda Yüksek Akım Değerlerinde Anahtarlama Sürelerinin Değişiminin Matematiksel Olarak İncelenmesi

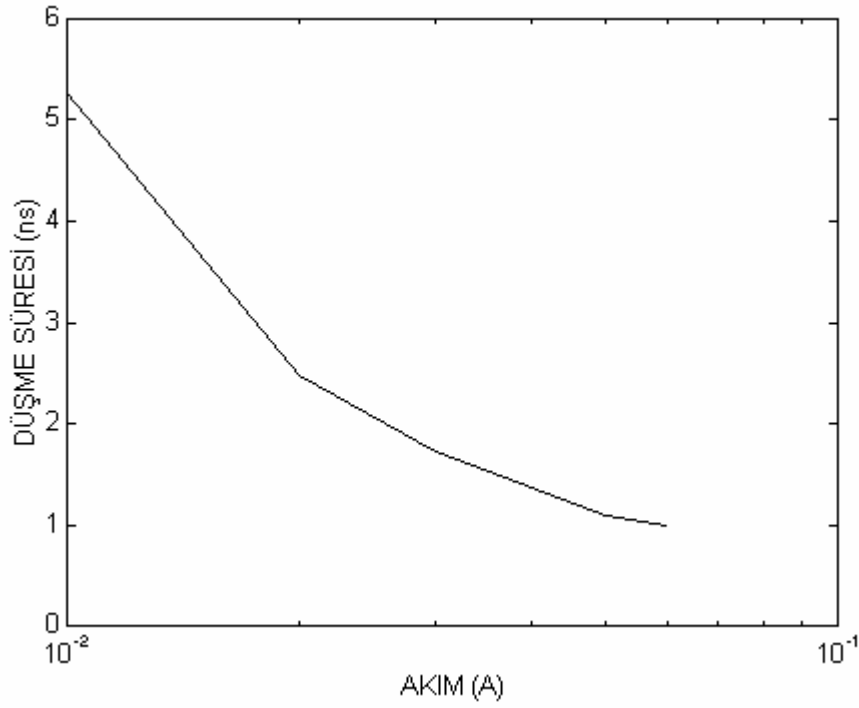
LED'in dinamik davranışı incelenirken büyük genlikli işaretlerde devre analizini basitleştirmek için aslında akım ve gerilime bağlı olarak değişmekte olan kapasitenin yerine ortalama bir kapasite tanımlanabilmektedir (Hodges vd, 1988). Jonksiyon ve difüzyon kapasitelerinin ortalamalarının toplamından oluşan bir tek sabit kapasite değeri belirlendikten sonra bir diyodun yüksek akımlarda yükselme ve gecikme sürelerinin değişimleri matematiksel olarak bulunabilir. Şekil 7'de LED, büyük genlikli akım darbesine karşı davranışını belirlemek üzere kendisine paralel bir kondansatör bağlanarak modellenmiştir (Sidorov, 1975). LED'e paralel bağlı kapasite LED'in iç kapasitesi ve dış bağlantıların kapasitesini göstermektedir.



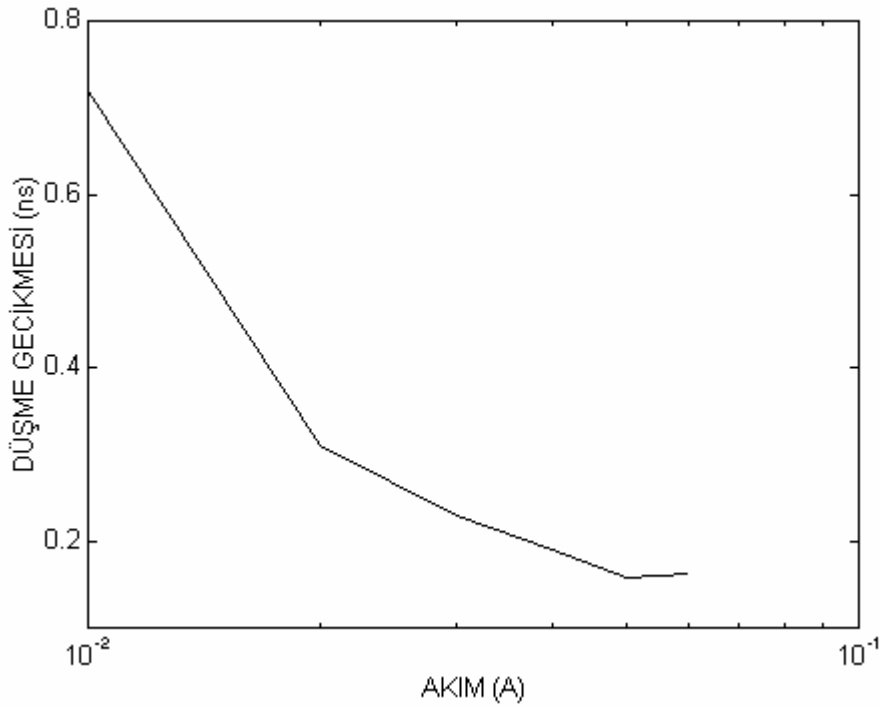
Şekil 3. Yükselme süresinin yüksek akımlarda değişimi.



Şekil 4. Gecikme süresinin yüksek akımlarda değişimi.



Şekil 5. Düşme süresinin yüksek akımlarda değişimi.



Şekil 6. Düşme gecikmesinin yüksek akımlarda değişimi.

Yapılacak olan incelemede LED'e uygulanan akım darbesinin zamanla aşağıda tanımlandığı gibi değiştiği kabul edilmektedir:

$$i_r(t) = \begin{cases} 0 & , t \leq t_0 \\ i_r(t - t_0) & , t > t_0 \end{cases} \quad (6)$$

Yukarıdaki akım ifadesinde akım darbesinin başlangıç anının $t = t_0$ olduğu, yani akım darbesinin t_0 anında uygulandığı görülmektedir. $t = t_0$ anında akmakta olan akımın değeri ise

$I_{t=t_0} = i_{t_0}$ 'dır. Ayrıca pn jonksiyonunun anahtarlama süresi içinde değişiklik göstermediği kabul edilecektir.

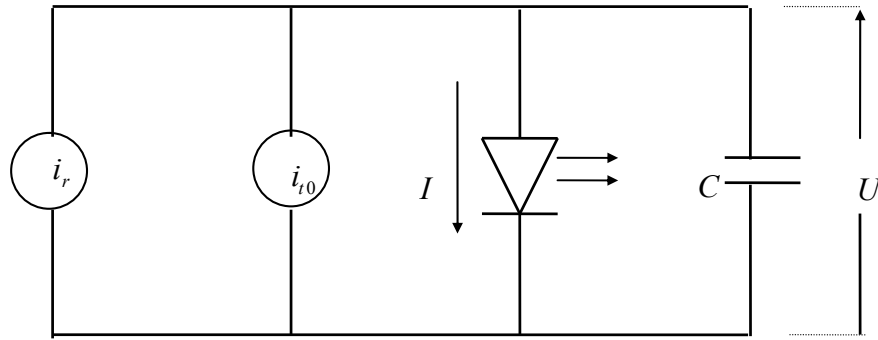
Şekil 7'deki devrede akım ve gerilimler arasında aşağıdaki diferansiyel denklem geçerli olacaktır:

$$C \frac{dU}{dt} + I(U) = I_{t=t_0} + i_r(t) \quad (7)$$

LED'in akım ve gerilim eşitlikleri ise aşağıdaki gibidir.

$$I(U) = I_0 [\exp(U / U_0) - 1] \quad (8)$$

$$U(I) = U_0 \ln[(I + I_0) / I_0] \quad (9)$$



Şekil 7. Büyük genlikli işaretler için LED'in eşdeğer devresi

Bu eşitliklerde I_0 , ısııl doyma akımıdır ve $U_0 = nV_T$ şeklinde ısııl gerilim ile emisyon katsayısının çarpımına eşit bir katsayıdır. LED akımının aşağıdaki gibi türevi alınırsa Eşitlik 10 elde edilir.

$$dI = \frac{I_0}{U_0} \exp(U / U_0) dU$$

$$dU = \frac{U_0}{(I + I_0)} dI \quad (10)$$

Elde edilen son eşitliğin Eşitlik 7'deki diferansiyel denklemde yerine konulmasıyla LED'in anahtarlama olayı aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

$$\frac{CU_0}{I + I_0} \frac{dI}{dt} + I = I_{t=t_0} + i_r(t) \quad (11)$$

Yukarıdaki denklemi çözebilmek için, denklemin bilinen bir diferansiyel denklem biçimine getirilmesi gereklidir. Bu amaçla, eşitliğin her iki tarafına I_0 terimi eklendikten sonra her iki taraf $(I + I_0)$ ile çarpılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$CU_0 \frac{dI}{dt} + (I + I_0)^2 = I_{t=t_0} (I + I_0) + i_r(t) (I + I_0) + I_0 (I + I_0) \quad (12)$$

Son eşitliğin her iki tarafı $(I_{t=t_0} + I_0)^2$ ile bölünürse Eşitlik 13 elde edilir.

$$\frac{CU_0}{(I_{t=t_0} + I_0)^2} \frac{dI}{dt} + \left(\frac{I + I_0}{I_{t=t_0} + I_0} \right)^2 = \frac{(I_{t=t_0})(I + I_0)}{(I_{t=t_0} + I_0)^2} + (i_r(t) + I_0) \frac{(I + I_0)}{(I_{t=t_0} + I_0)^2} \quad (13)$$

Eşitlik 13'ün sağ tarafı aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\varphi(\xi)y \quad (14)$$

Yukarıdaki eşitlikte

$$y = \frac{(I + I_0)}{(I_{t=t_0} + I_0)} \quad (15)$$

$$\varphi(\xi) = 1 + \left[\frac{i_r(t)}{(I_{t=t_0} + I_0)} \right] \quad (16)$$

$$\xi = \frac{(t - t_0)}{\left[\frac{CU_0}{I_{t=t_0} + I_0} \right]} \quad (17)$$

dir. Yukarıda yapılan son işlemlerden sonra Eşitlik 11 aşağıdaki şekle dönüşür.

$$\frac{dy}{d\xi} + y^2 = \varphi(\xi)y \quad (18)$$

Yukarıdaki denklemde $z = 1/y$ alınırsa

$$dz = d(y^{-1}) = -y^{-2} dy$$

$$\frac{dy}{y^2} = -\frac{dz}{y}$$

olur. Eşitlik 18'in her iki yanını y^2 ile bölünürse

$$\frac{1}{y^2} \frac{dy}{d\xi} - \varphi(\xi) \frac{1}{y} = -1$$

$$\frac{dz}{d\xi} + \varphi(\xi)z = 1 \quad (19)$$

diferansiyel denklemi elde edilmiş olur. Eşitlik 19'da verilen diferansiyel denkleminin çözümü

$$z(\xi) = \exp[-F(\xi)] \left[1 + \int_0^\xi \exp F(\xi) d\xi \right] \quad (20)$$

dir. Burada

$$F(\xi) = \int_0^{\xi} \varphi(\xi) d\xi \quad (21)$$

dir.

$$y = 1/z \quad , \quad y = \frac{I + I_0}{I_{t=t_0} + I}$$

olduğunu gözönüne alarak ve Eşitlik 20'den yararlanarak Eşitlik 22a elde edilir.

$$\frac{I + I_0}{I_{t=t_0} + I_0} = \frac{\exp F(\xi)}{1 + \int_0^{\xi} \exp F(\xi) d\xi} \quad (22a)$$

Son eşitliğin iki tarafının logaritması alınırsa LED'in gerilimini veren Eşitlik 22b bulunur.

$$\frac{(U - U_{t=t_0})}{U_0} = F(\xi) - \ln \left[1 + \int_0^{\xi} \exp F(\xi) d\xi \right] \quad (22b)$$

Elde edilen son iki denklem ile LED'e uygulanan akımın değişimi bilindiğinde LED'in içinden akan I akımının ve üzerinde oluşan U geriliminin değişimi bulunabilir. LED'in anahtarlama süreleri ile ilgilenildiğinden, burada LED'e bir akım darbesinin uygulandığı durum ele alınacaktır.

LED'e uygulanan akım $\varphi(\xi) = 1 + \Delta r$ şeklinde zamandan bağımsız basamak şeklinde olduğunda LED'den akacak olan $y = (I + I_0)/(I_{t=t_0} + I_0)$ akımı aşağıdaki şekilde bulunur.

$$y = \frac{\exp F(\xi)}{1 + \int_0^{\xi} \exp F(\xi) d\xi} = \frac{\exp[\xi(1 + \Delta r)]}{\Delta r + \exp[(1 + \Delta r)\xi]} \cdot \frac{1 + \Delta r}{1 + \Delta r}$$

Son ifadenin pay ve paydası $\exp - [\xi(1 + \Delta r)]$ ile çarpılırsa Eşitlik 23 elde edilir.

$$y = \frac{1 + \Delta r}{1 + \Delta r [\exp - [\xi(1 + \Delta r)]]} \quad (23)$$

Son ifadede $\Delta r = -1$ olması durumunda oluşacak olan belirsizlikte y 'nin aldığı değer $\varphi(\xi) = 0$ ve $F(\xi) = 0$ olduğundan;

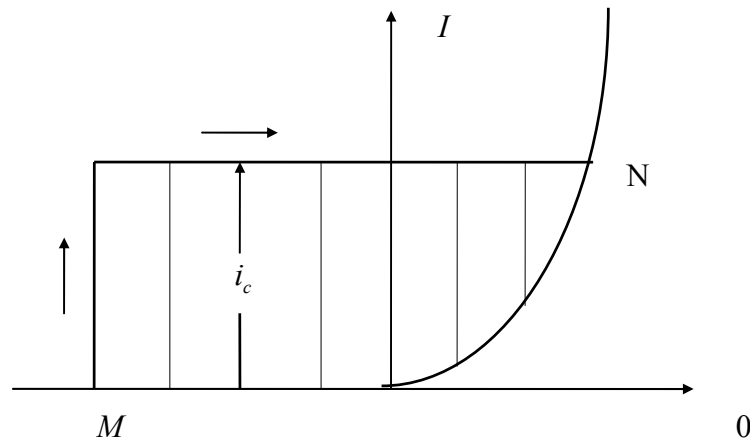
$$y = \frac{\exp 0}{1 + \int_0^{\xi} \exp 0 d\xi} = \frac{1}{1 + \xi}$$

olacaktır.

Aşağıda buraya kadar elde edilmiş olan ifadelerden yararlanarak yüksek akım değerlerinde bazı anahtarlama sürelerinin akıma bağlı ifadeleri elde edilecektir. Bu amaçla LED'e aşağıdaki şekilde tanımlanan bir akım darbesi uygulanmıştır.

$$i_r(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0, \\ I_r & t > 0 \end{cases} \quad (24)$$

Bu akım Şekil 7'deki gibi paralel bağlı LED ve kondansatör arasında bölünecektir. Daha önce de belirtildiği gibi C kondansatörü LED'in iç kapasitelerini göstermektedir. Şekil 8' de LED karakteristiği ve bu karakteristik üzerine de LED'e uygulanmış olan akım darbesi birlikte çizilmiştir. Başlangıçta LED karakteristiği üzerinde M noktasında bulunmaktadır. Bu noktadan itibaren LED'e I_r genlikli akım darbesi uygulanmaktadır. M başlangıç noktasında LED'den I_M akımı akmakta iken kondansatörden I_r akımı akmaktadır. Anahtarlama olayının sonunda N noktasına gelinmektedir. Bu anda kondansatör dolmuş olduğundan kondansatörden artık akım akmayacak ve tüm akım LED'den akıyor olacaktır. Bu akım LED'den akan akımın aldığı en büyük değerdir ve $I_N = I_M + I_r$ değerindedir. LED'den herhangi bir t anında akan akımın değeri $I(t)$ ise kondansatörden aynı anda akan akımın değeri $I_N - I(t)$ olacaktır. Şekil 8'deki düşey çizgilerin genliği kondansatörden akan akımların genliğini göstermektedir.



Şekil 8. Darbe akımında LED'in akım ve gerilimleri

LED'in N ve M noktalarındaki akım ve gerilimi

$$U_N(I_N) = U_0 \ln[(I_N + I_0) / I_0]$$

$$U_M(I_M) = U_0 \ln[(I_M + I_0) / I_0]$$

dir. Yukarıdaki iki gerilimin farkı;

$$U_N - U_M = U_0 \ln\{1 + [I_r / (I_M + I_0)]\} \quad (25)$$

dir. LED'den I_N akımı akarken LED ve kondansatör uçlarındaki gerilimin değeri

$$U_N = U_M + U_0 \ln[1 + I_r / (I_M + I_0)] \quad (26)$$

dir. Aşağıda akımın yükselme süresini elde etmekte yararlanılacak olan $I = I(t)$, LED akımı eşitliği bulunacaktır.

$$y = \frac{I + I_0}{I_M + I_0} = \frac{1 + \Delta r}{1 + \Delta r \exp[-(1 + \Delta r)\xi]}$$

olarak önceden elde edilmiş bulunmaktadır. Buradan

$$I + I_0 = \frac{(I_M + I_0)(1 + \Delta r)}{1 + \Delta r \exp[-(1 + \Delta r)\xi]}$$

$$I(t) = \frac{I_M + I_0 + \Delta r I_M + \Delta r I_0 - I_0 - I_0 \Delta r \exp[-(1 + \Delta r)\xi]}{1 + \Delta r \exp[-(1 + \Delta r)\xi]} \quad (27)$$

Eşitlik 27'de yer alan $(1 + \Delta r)\xi$

$$(1 + \Delta r)\xi = \left[1 + \frac{I_r}{I_M + I_0} \right] \left[\frac{(t - t_0)(I_M + I_0)}{CU_0} \right]$$

dır. $t_0 = 0$ alındığında (başlangıç anı)

$$(1 + \Delta r)\xi = \frac{t(I_M + I_0)}{CU_0} + \frac{t(I_r)}{CU_0}$$

olur. $I_N = I_M + I_r$ olduğundan

$$(1 + \Delta r)\xi = t \left[\frac{(I_N + I_0)}{CU_0} \right]$$

eşitliği yazılabilir.

$$\tau_N = (CU_0) / (I_N + I_0) = Cr_N \quad (28)$$

tanımı yapılırsa Eşitlik 27 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I(t) = \frac{I_M + I_r - \frac{(I_r I_0)}{(I_M + I_0)} \exp(-t/\tau_N)}{1 + \frac{I_r}{(I_M + I_0)} \exp(-t/\tau_N)} \quad (29)$$

olur. Buradan

$$I(t) - I_M = \frac{I_r [1 - \exp(-t/\tau_N)]}{1 + \frac{I_r}{I_M + I_0} \exp(-t/\tau_N)} \quad (30)$$

bulunur. Normalize akım ifadesi ise

$$\frac{I(t) - I_M}{I_r} = \frac{1 - \exp(-t/\tau_N)}{1 + \Delta r_m \exp(-t/\tau_N)} \quad (31)$$

olur. Burada

$$\Delta r_m = \frac{I_r}{(I_M + I_0)} \quad (32)$$

dır. ($\Delta r_m \ll 1$), yani LED'e uygulanan akım darbesinin genliği çok küçükse LED akımı değişimi Eşitlik 31'den

$$I(t) = I_M + I_r [1 - \exp(-t/\tau_N)] \quad (33)$$

olarak elde edilir. Aşağıda LED'den büyük genlikli ($\Delta r_m \gg 1$) bir akım akıtılması durumunda LED'den akan akımın ifadesi elde edilecektir.

Eşitlik 31 ($1/\Delta r_m$) çarpanına ayrılır ve pay ve payda $\exp(t/\tau_N)$ ile çarpılırsa

$$\frac{I(t) - I_M}{I_r} = \frac{(1/\Delta r_m) \exp(t/\tau_N) - (1/\Delta r_m)}{(1/\Delta r_m) \exp(t/\tau_N) + 1}$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte pay kısmında yer alan ikinci terim olan $(1/\Delta r_m)$ terimi sıfır kabul edilirse ve bundan sonra pay ve payda $\exp(-t/\tau_N)$ ile çarpılırsa ifade

$$\frac{I(t) - I_M}{I_r} = \frac{1}{1 + \Delta r_m \exp(-t/\tau_N)} \text{ olur. } \Delta r_m = \exp(\ln \Delta r_m) \text{ şeklinde yazılırsa}$$

$$\frac{I(t) - I_M}{I_r} = \frac{1}{1 + \exp[(\ln \Delta r_m) - (t/\tau_N)]} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{t_* - t}{\tau_N}\right)} \quad (34)$$

olur. Buna göre LED akımı

$$I(t) = I_M + \frac{I_r}{\left[1 + \exp\left(\frac{t_* - t}{\tau_N}\right)\right]} \quad (35)$$

olur. Eşitlik 34'ten Eşitlik 36 yazılabilir.

$$\frac{t_* - t}{\tau_N} = \frac{-t + \tau_N \ln \Delta r_m}{\tau_N} \quad (36)$$

Eşitlik 36, Eşitlik 32 ve Eşitlik 28 eşitliklerinden yararlanarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$t_* = \tau_N \ln \Delta r_m = \frac{CU_0}{(I_N + I_0)} \ln \frac{I_r}{(I_M + I_0)} \quad (37)$$

Buradan aşağıdaki eşitlik yazılabilir ($I_N = I_M + I_r$);

$$t_* = \frac{CU_0}{I_r} \frac{I_r}{(I_r + I_M + I_0)} \ln \left(\frac{I_r}{I_M + I_0} \right) \quad \Delta r_m \gg 1 \text{ olduğundan eşitlik}$$

$$t_* = \frac{CU_0}{I_r} \ln \left(\frac{I_r}{I_M + I_0} + 1 \right) \quad (38)$$

şeklinde yazılabilir (Burada $\Delta r_m \cong \Delta r_m + 1$ ve $1 = I_r / (I_r + I_M + I_0)$ olarak kabul edilmiştir). Eşitlik 38 ve Eşitlik 25'ten yararlanarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

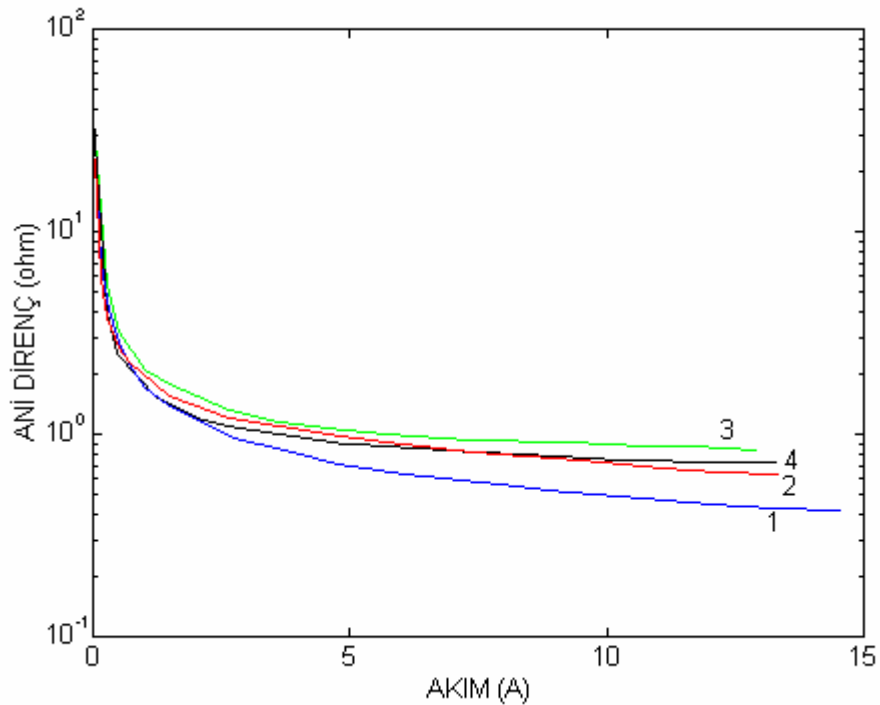
$$t_* = C \frac{(U_N - U_M)}{I_r} \quad (39)$$

t_* , bir zaman gecikmesidir. Son ifadeye göre LED akımındaki bu gecikme Şekil 8'deki M ve N noktalarını birleştiren doğrunun eğiminden bulunacak direnç ile C kapasitesinin çarpımına eşittir. LED'in I akımı, U gerilimine göre eksponansiyel şekilde arttığından LED'e uygulanan akımın I_r genliği arttıkça sözkonusu gecikmenin azalacağı görülmektedir (U_N , I_r 'nin arttığı oranda artmamaktadır). U_M değeri çok küçük kabul edildiğinde gecikme süresinde yer alan direncin değeri U_N/I_r olur. $I_M \cong 0$ alındığında direnç U/I şeklinde LED geriliminin LED akımına oranı şeklinde elde edilir.

LED'in yüksek akımlarda elektriksel karakteristikleri incelendiğinde LED direncinin belli bir akım değerine kadar akım arttıkça azaldığı ancak LED'in gövde ve bağlantı direnciyle belirlenen bir sınır değerden sonra direncin hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir. Bu sınır değer çok kullanılan LED'ler için birkaç amper değerinde olmaktadır. Sözkonusu bu akımdan sonra LED karakteristiğinin artık eksponansiyel bir değişim değil yaklaşık olarak bir direnç karakteristiği gösterdiği söylenebilir.

Şekil 9'da, dört farklı kızılötesi ışık veren LED'in gerilim tepe değerlerinin akım darbelerinin tepe değerlerine oranı alınarak bulunan ani direncin akıma göre değişimleri görülmektedir. LED'lerin kimlikleri: 1 nolu LED LD 271 (Siemens), 2 nolu LED SLR 932 A (Sany), 3 ve 4 nolu LED'ler TLHRS 101 (TFK (ITT)) şeklindedir. Ölçülen akım ve gerilimlerin tepe değerleri darbe süresince sabit olduğundan bu değerler başka şekilde değişen bir akım veya gerilim işaretinin herhangi bir anda aldığı değer şeklinde düşünülebileceği için bu değişime ani direnç değişimi adı da verilebilir.

Düşük akım değerlerinde LED akımı LED gerilimiyle üssel olarak değiştiğinden LED'in ani direnci LED akımı arttıkça azalacaktır. Şekil 9'dan görülebileceği gibi ani direncin en küçük bir sınır değeri vardır. Bu en küçük direnç değeri büyük ölçüde gövde ve kontak dirençlerinden meydana gelmektedir. Şekil 9'daki değişimlerden bu direncin değeri 5A'den sonra belirlenebilmektedir. Burada yapılmakta olan matematiksel incelemede LED'in sözkonusu gövde ve kontak dirençlerinin etkisi görülmemektedir.



Şekil 9. Dört farklı LED'in ani dirençlerinin akımla değişimi.

Aşağıda Eşitlik 31 ile verilen normalize akım ifadesinden hareket edilerek akımın yükselme süresi bulunacaktır. Bunun için önce Eşitlik 31'de ara işlemler yapıldığında t süresi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$t = \tau_N \ln \frac{I_r + \Delta r_m I(t) - \Delta r_m I_M}{I_r - I(t) + I_M} \quad (40)$$

Eşitlik 31'e göre t süresi sonsuza giderse akımın aldığı en büyük değer Eşitlik 41'de gösterildiği kadar olacaktır.

$$I(t) = I_M + I_r \quad (41)$$

Yükselme süresinin tanımına göre, yükselme süresi Eşitlik 41 ile verilen akım değerinin onda biri ile onda dokuzu değerlerini aldığı süreler arasındaki fark alınarak bulunabilir. $I(t_2) = 0.9(I_M + I_r)$ yapan t_2 değeri

$$\frac{t_2}{\tau_N} = \ln \frac{I_r + 0.9\Delta r_m (I_M + I_r) - \Delta r_m I_M}{0.1(I_M + I_r)}$$

olarak ve akımı $I(t_1) = 0.1(I_M + I_r)$ yapan t_1 değeri

$$\frac{t_1}{\tau_N} = \ln \frac{I_r + 0.1\Delta r_m (I_M + I_r) - \Delta r_m I_M}{0.9(I_M + I_r)}$$

olarak bulunur. Yukarıda bulunan iki sürenin aşağıdaki şekilde farkı alınarak yükselme süresi bulunabilir.

$$\frac{t_2 - t_1}{\tau_N} = \ln 9 + \ln \frac{0.9\Delta r_m + \Delta r_m I_0 / (I_M + I_r)}{0.1\Delta r_m + \Delta r_m I_0 / (I_M + I_r)}$$

Son ifadede $\Delta r_m I_0 / (I_M + I_r)$ yaklaşık olarak 1'e eşit alınırsa

$$\frac{t_2 - t_1}{\tau_N} = 2.2 + \ln \frac{1 + 0.9\Delta r_m}{1 + 0.1\Delta r_m} \quad (42)$$

olur. $\Delta r_m \gg 1$ durumunda t_r yükselme süresi

$$t_r = t_2 - t_1 = 4.4\tau_N \quad (43)$$

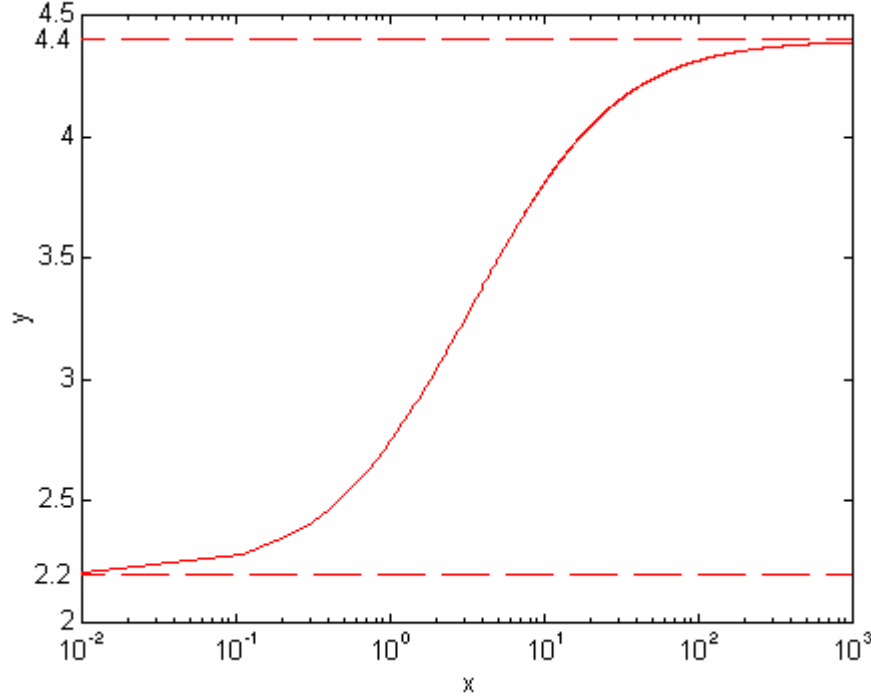
olur. Δr_m 'nin sıfıra gitmesi durumunda ise yükselme süresi

$$t_r = 2.2\tau_N \quad (44)$$

olur. Şekil 10'da t_r / τ_N oranının Δr_m ile değişimi görülmektedir. t_r / τ_N oranının aldığı 2.2 ve 4.4 değerleri değişimin asimptotlarıdır. Şekilden görüldüğü gibi Δr_m 'nin birkaç 10 değerinden sonra sözkonusu oran 4.4 değerini almaktadır. $\Delta r_m = I_r / (I_M + I_0)$ olduğu ve I_M 'in çok küçük olduğu, ayrıca I_0 tıkama yönü doyma akımı değerinin, tıkama yönü gerilimi değerine bağlı olmakla beraber $100\mu A$ kadar olduğu gözönüne alınırsa amperler mertebesindeki yüksek akım değerleri için Eşitlik 43 geçerli olacaktır. Eşitlik 43'te τ_N 'in değeri yerine yazılırsa yüksek akım değerlerinde yükselme süresi

$$t_r = 4.4\tau_N = 4.4C \left(\frac{U_0}{I_N + I_0} \right) = 4.4C \frac{U_0}{I_r} \quad (45)$$

olur. Son eşitlikten görüldüğü gibi LED'e uygulanan akım darbesinin genliği arttıkça yükselme süresi azalacaktır.



Şekil 10. $y = t_r / \tau_N$ 'in $x = \Delta r_m$ ile değişimi.

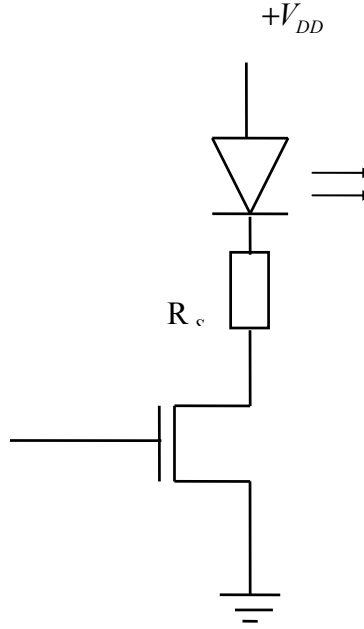
Şekil 11'de bir MOSFET'in anahtar elemanı olarak kullanılmasıyla LED'in sürülmesi gösterilmiştir. Devredeki R_S direnci akım sınırlayıcı dirençtir. LED'den akan akım darbesinin genliği arttıkça veya V_{DD} besleme gerilimi değeri düştükçe R_S direncinin değeri azalacaktır. R_S direncinin değerinin küçük olması, R_S direnci ile anahtar elemanının doyma durumunda gösterdiği dirençlerin toplamı LED'e paralel geldiği için paralel eşdeğer direncin değerini azaltacaktır. Bu durumda eşdeğer paralel dirençler ile eşdeğer kapasitenin belirledikleri zaman sabitinin değeri küçülecektir. Bunun sonucu olarak yükselme süresi azalacaktır. Yukarıda yapılan son açıklamadan sözkonusu LED sürücü devresinin ölçme devresi olarak kullanılması durumunda akım darbesinin genliğini değiştirmek üzere devrede LED'e seri olarak gelen direncin değerinin değiştirilmesinin anahtarlama sürelerine etkisi olacağı ve ölçme hatasını arttıracığı görülmektedir.

3. SONUÇ

Yapılan nümerik ve analitik incelemelerden LED'in yüksek genlikli akım darbeleriyle sürülmesi durumunda akım darbesinin genliği arttıkça anahtarlama sürelerinin azaldığı gösterilmiştir. LED'in cevap sürelerinin kısa olmasının gerektiği uygulamalarda mümkünse akım darbesinin genliği artırılarak anahtarlama süreleri azaltılabilir.

SPICE programı ile yapılan inceleme sonucu elde edilen grafiklere bakıldığında, anahtarlama sürelerinin akım ile değişimlerinin sürekli olduğu görülmektedir. Bu durum,

LED'in anahtarlama sürelerinin akımla değişimlerinin sürekli biçimde değişen matematiksel fonksiyonlarının olması gerektiği düşüncesini akla getirmektedir.



Şekil 11. LED'in sürülmesi.

SPICE diyot modelinde yüksek enjeksiyon durumu tam temsil edilmemiştir ve bu nedenle SPICE ile yapılan inceleme ile elde edilen sonuçlar yaklaşık sonuçlardır. Böyle olmakla beraber SPICE programı ile yapılan incelemelerden önemli sonuçlar elde edilmiştir. SPICE modelinde bulunan söz konusu yaklaşıklıklar olmadan, LED'in gerçek durumda tam olarak nasıl davrandığının deneysel olarak bulunması istendiğinde, bu sefer ölçme hataları önemli olacaktır. LED'in anahtarlama sürelerinin kısa olması nedeniyle, ölçme devresini oluşturan darbe üretici, anahtarlama devresi ve fotodedektör devresinden kaynaklanan ölçme hataları yeterince küçük olmalıdır. Bu amaçla uygun ölçme yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Oysa, SPICE programında kullanılan diyot modelinde her ne kadar bazı olaylar temsil edilmemişse de ideal ölçme koşulları meydana getirilebilmektedir. SPICE programıyla bir LED'in analizi yapıldığında LED'in davranışını karakterize eden model parametrelerinin değerlerinin belirtilmesi gerekmektedir. Bir LED'in model parametrelerinin ölçme yoluyla nasıl bulunabileceği çeşitli kaynaklarda açıklanmaktadır.

Yapılan matematiksel incelemede LED'in gecikme ve yükselme sürelerinin akımla değişiminin ifadesi elde edilmiştir. Bu sürekli değişim, anahtarlama olayı esnasında pn jonksiyonunda bir değişiklik olmadığı kabul edilerek bulunmuştur. Bu incelemede, aslında LED'in akımı ve gerilimiyle değişen iç kapasitesinin değişmediği kabul edilmiş ve bu kapasitenin değeri için ortalama bir sabit kapasite değeri kullanılmıştır.

LED akımı çok arttırıldığında belli bir akımdan sonra LED'in yavaş değişimlerde bilinen üssel karakteristiği ihmal edilebilecek değerde bir etki göstermektedir. Çok yüksek akımlarda, LED'in değeri gövde ve kontak dirençleriyle belirlenen bir direnç gibi davrandığı gösterilmiştir. LED'in bir direnç gibi davranmaya başladığı bu akımın değeri çok kullanılan genel amaçlı LED'ler için 5A olarak ölçülmüştür. Çok yüksek akımlar söz konusu olduğunda LED'in anahtarlama süreleri bulunurken 5A'den sonra ortaya çıkan bu özellik de dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- Bhattacharya P. (1997): “Semiconductor Optoelectronic Devices”, USA, Prentice-Hall, p. 206-230.
- Boylestad R., Nashelsky L. (1992): “Electronic Devices and Circuit Theory”, USA, Prentice-Hall, p.1-99.
- Davidov P.D. (1967): “Yarıiletken Elemanların Isıl Prensiplerinin Analizi ve Hesaplanması”, Moskova, Energiya, s. 5-140.
- Hodges D., Jackson H.G. (1988): “Analysis and Design of Digital Integrated Circuits”, USA, McGraw-Hill, p.113-150.
- Kuntman H.H. (1992): “Analog Tümdevre Tasarımı”. İstanbul, Sistem Yayıncılık, s. 289-298.
- Kuntman H.H., Toker A., Özcan S. (1996): “Sayısal Elektronik Devreleri”, İstanbul, Sistem Yayıncılık, s.13-20.
- Özütürk E. (2000): “LED’lerin Aşırı Darbe Akımında Çalışmasının Teorik ve Pratik Araştırması”, Bursa, Uludağ Üniversitesi (doktora tezi), s.1-163.
- Özütürk E., Karlık S.E. (1998): “ Kızılötesi Işınlarla Açık Optik Ortamda Bilgisayarlar Arası Veri İletimi”, Bursa 5. Bilgisayar-Haberleşme Sempozyumu, Bursa, s.104-106.
- Sidorov A.S. (1975): “Diyotlu ve Transistorlu Anahtarlama Devreleri”. Moskova, Sviyaz, s. 64-70.
- Watson J. (1988): “Optoelectronics”, U. K., Van Nostrand Reinhold (U.K) Co. Ltd., p. 55 -78.
- Wilson J., Hawkes J.F.B. (2000): “Optoelektronik”, Adapazarı, Değişim Yayınları, s.156-157.