

YÜKSEK GÜÇLÜ ELEKTRONİK DEVRE ELEMANLARI İÇİN SOĞUTUCU TASARIMI

Doç. Dr. Fiz. Y. Müh. Macit Çiğdemoğlu

ÖZET

Kanat, çubuk, çıkıntı gibi araçlarla ısı iletim alanı artırılmış olan yüzeylere "uzantılı yüzeyler" denir. Sayıları gittikçe artan teknoloji dallarında yüksek miktarlarda ısının en kısa zamanda bir ortamdan diğerine iletilmesi gerekmektedir. Bu amaçla yüksek ısı iletim yetenekli, düşük ağırlık ve maliyetli, fakat çeşitli geometrik yapıları olan yüzeyler gerekir. Uzantılı yüzeylerin uygulama alanları pek çoktur. Uzay araçları, uçaklar, soğutma, ısıtma, iklimlendirme, kimya ve petrokimya endüstrisi, elektronik, endüstri fırınları, plazma tekniği, nükleer enerji, güneş enerjisi ve geleneksel güç teknolojisi bunların sadece bazılarıdır. Bu alanların çoğu uzaktan veya yakından elektrik-elektronik mühendisliği ile ilgili olduğundan uzantılı yüzeyler teori ve pratiğinin ayrıntılı olarak incelenmesinin bu bakımdan yararlı olacağı umulmaktadır.

GİRİŞ

Elektrik-elektronik mühendisliği kitaplarının pek çoğunda belirli bir yarı-iletken eleman güç düşümü ve soğutma teorisine yer verilmez. Oysa bu meslek dalına mensup olan mühendislerimizin çok kullandıkları

ve rastladıkları soğutucularla ilgili teoriyi bilmeleri soğutucuların tasarlanması ve etkin olarak belirli amaçlar için kullanılması büyük bir önem taşır. Buna göre bu yazıda çok kullanılan tip soğutucuların temel teorisi, belirli bir amaç için tasarımı ve uygulamalarına yer verilmiştir. Böylece bu alanda mühendislerimize yararlı olunacağı umulmaktadır.

Alanı A, yüzey sıcaklığın T_0 olan bir duvardan T_s sıcaklığındaki bir ortama (genellikle serbest atmosferik ortama) konveksiyonla iletilen ısı

$$q = A h (T_0 - T_s) \quad (1)$$

denklemlerle belirlenir. Burada h sabitine yüzey konveksiyon katsayısı adı verilir, ölçü birimi de W/m^2C tır. Alan birimi metre.kare, sıcaklık birimi C (veya K) alınırsa iletilen q ısısının W olarak ortaya çıkacağı açıktır. Bu ısı bir transistörün üzerinde düşen güç olarak yorumlanabilir. T_0 transistörün maksimum yüzey veya gövde sıcaklığıdır.

Son yıllarda elektronik dalındaki gelişmeler küçük sinyal ve düşük güç uygulamalarında transistor yerine komple entegre devreler getirmek yönünde olmuştur. Bununla beraber yüksek güç uygulamalarında hâlâ yüksek güçlü tek transistörler kullanılmaktadır. Üretim tekniğindeki gelişmeler gittikçe küçülen transistörlerde gittikçe artan güç düşümleri sağlamak yönünde olmuştur. Bir transistor üzerinde düşen maksimum güç ile transistor gövdesinin çalışma sıcaklığı arasında yakın bir ilişki vardır. Uygun miktarda soğutma sağlanabilirse transistorun maksimum güç düşümüne yakın düzeylerde çalıştırılabileceği açıktır. Germanyum ve si Neon transistörler arasında silikon transistörler germanium transistörlerden daha yüksek sıcaklıklarda ve dolayısıyla daha yüksek güç düşümlerinde çalıştırılabilir, örnek olarak maksimum çalışma sıcaklığı germanium için 100 - 110 C, silikon için ise 150 - 200 C dolaylarındadır.

Birçok uygulamalarda transistor üzerinde düşen ortalama güç (W)

$$P_D = V_{CE} I_c$$

denklemlerle bulunabilir. Fakat üretici standartlarına göre bu güç ancak belirli bir maksimum çalışma sıcaklığında düşmesine izin verilen güçtür. Bu maksimum değerler üzerindeki sıcaklıklarda transistörlerde düşürülecek güç azalır ve nihayet maksimum gövde sıcaklığında sifira kadar iner. Transistor üzerinde düşen güç arttıkça transistörün çalışma sıcaklığı da artar. Bu yüzden yüksek güçlü transistörler, ısıyı çevreye yayaabilecek büyüklük ve ölçülerde soğutucular üzerine monte edilir. Böylece transistorun maksimum çalışma gücü düzeylerinde güçlerle çalışılabilir. Bir soğutucu ne kadar büyük olursa olsun transistorun çalışma

sıcaklığını çevre sıcaklığına indiremez. Buna göre transistorun çalışma gücü ısının yayılacağı ortamın sıcaklığına göre düşürülmeli ve devre tasarımı buna göre yapılır. Belirli bir sıcaklıkta belirli bir güç düşürecek bir transistorun daha yüksek sıcaklıkta düşürebileceği güç değeri "güç düşüm faktörü" adı verilen bir faktörle düzenlenir. Bir örnek olarak 25 C üzerinde her derece sıcaklık için 0,5 W güç düşüm kaybı olan 80 W hk bir transistorun 125 C sıcaklıkta kaç Watt güç ile çalışabileceğini hesaplamak yararlı olacaktır.

$$P_D (125 C) = P_D (25 C) - (125 C - 25 C) (0,5 -W/C) = 30 W.$$

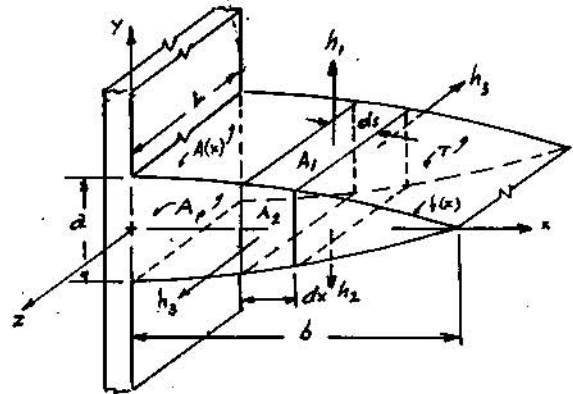
Buna göre transistor 25 C sıcaklığına ne kadar yakın sıcaklıkta çalışırsa o kadar yüksek bir güçle çalışabileceği görülmektedir. İşte bu çalışma ancak uygun bir soğutucu ile sağlanabilir.

Boyuna konvektif kanatlar:

Isı iletimi biliminin en önemli amaçlarından biri soğutucudan çevreye atılan ısının kontrolüdür. Bir yüzeyden bir ortama ısı iletimi başlıca üç metotla kontrol edilebilir :

- Yüzey - ortam sıcaklık farkının kontrolü
- Konveksiyon katsayısının (h) değiştirilmesi
- Isı iletim alanının değiştirilmesi.

Bu yazının başlıca amacı bu üçüncü faktörü kontrol etmektir. Isı iletim alanı taban yüzeye bağlanacak aralıklı uzantılar veya kanatlarla artırılabilir. Uzantılar çeşitli geometrik biçimlerde kanat veya çıkıntılar halinde yüzey ile birlikte dökülebilir veya ayrı olarak geçme, vidalama kaynak gibi metodlarla ana gövdeye bağlanabilir. En uygun uzantı tipi ve üretim metodu genellikle teknolojik ve ekonomik faktörlerin dengelenmesiyle bulunur. Burada iki tip uzantı için gaz ortamlara (özellikle serbest havaya) konvektif ısı iletimi sağlayan uzantı karakteristikleri incelenecektir.



Şekil 1: Genelleştirilmiş boyuna kanat ve koordinat sistemi

Kanat çevresindeki ortama konvektif ısı iletimi dolayısıyla kanat sıcaklığı yüzeyin her noktasında farklıdır. Buna göre kanattan çevreye ısı iletimi doğrudan doğruya (1) denkleminde hesaplanamaz. Önce kanat bünyesindeki sıcaklık profili ve buradan da ortama iletilen ısı miktarı hesaplanmalıdır. Bu amaçla bütün boyuna kanat tipleri için geçerli olacak bir denklem elde etmek üzere genelleştirilmiş kanat kavramı geliştirilecektir. Şekil 1 de genelleştirilmiş bir kanat profili görülmektedir.

Genelleştirilmiş kanat denkleminin analizi yolu ile kanat sıcaklık profili, kanat verimi ve kanat parametrelerinin optimizasyonu hakkında çok değerli bilgiler elde edilebilir. Kanatların ısı iletim karakteristikleri, yüzey konveksiyon ve bünye kondüksiyon katsayıları ve geometrik kanat şekillerine göre çok değişir. Buna göre çeşitli kanat geometrilerinin incelenmesinde problemi sınırlamak ve çözümü kolaylaştırmak için yapılacak temel kabuller çok önemlidir. Kanatlı yüzeylerde genellikle şu kabullerin yapılması pratik formüller elde edilmesine yardımcı olur:

- 1) Kanat kararlı rejimde çalışmaktadır. Başka bir deyişle kanadın birim zamanda ortama yaydığı ısı miktarı daima aynı kalır ve zamanlı değişmez.
- 2) Kanat malzemesi homojen ve izotropiktir. Başka bir deyişle kanadın ısı iletkenliği sabittir ve kanadın her noktasında aynıdır.
- 3) Konveksiyon katsayısı sabittir ve kanat yüzeyi üzerinde üniformdur.
- 4) Kanadı çevreleyen ortamın sıcaklığı üniformdur.
- 5) Kanat yeteri kadar incedir ve kanat kalınlığı boyunca sıcaklık sabittir.
- 6) Kanat taban sıcaklığı sabittir.
- 7) Kanadın ana gövdeye bağlandığı yerde birleşme direnci yoktur.
- 8) Kanat yüzeyinden çevreye ısı iletimi kanat yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki farkla orantılıdır.
- 9) Kanat içinde ısı kaynağı yoktur.
- 10) Kanat eksenel düzleme göre simetriktir.

Şekil 1 de görülen genelleştirilmiş boyuna kanat için, seçilmiş olan koordinat sistemine göre, xy-düzlemine paralel kesite kanadın profil yx yüzeyi veya profil alanı, yz-düzlemine paralel kesitlere de kanat kesiti denir.

Kanat profilini belirleyen eğrilerin denklemi f(x) ile gösterildiğine göre, profil alanı, A_p

$$A_p = 2 \int_0^b f(x) dx \quad (2)$$

ve kanat kesiti

$$A(x) = 2Lf(x) \quad (3)$$

yazılabilir.

Kalınlığı dx olan diferansiyel dilimde ısı bilançosunu düşünelim. Kanadın herhangi bir noktasındaki sıcaklık T ise x = 0 düzleminde geçerek dx dilimine giren ısı, Fourier kanunu uyarınca

$$q_x = -kA(x) \frac{dT}{dx}$$

diğer yüzeyden çıkan ısı

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{d}{dx} (q_x) dx$$

ve dilim içindeki net ısı akışı

$$dq = q_x - q_{x+dx} = -\frac{d}{dx} (q_x) dx$$

$$= k \left[\frac{dA(x)}{dx} \frac{dT}{dx} + A(x) \frac{d^2T}{dx^2} \right] dx \quad (4)$$

bulunur. Kararlı rejimde bu ısı konveksiyon olayı ile dilim yüzeylerinden ortama iletilmelidir. Bu ısı (1) denklemi uyarınca

$$dq_c = [AT (h_1 + h_2) + 2A_2 h_3] (T - T_s) \quad (5)$$

yazılabilir. Burada $A = L ds$ ve $Af = 2f(x) dx$ olduğundan (5) denkleminde yerleştirilerek

$$dq_c = [L(h_1 + h_2) ds + 4h_3 f(x) dx] (T - T_s) \quad (6)$$

elde edilir. Elemanter diferansiyel hesap teorisinden

$$ds = 1 + (dy/dx)^2 dx$$

yazılabilir. Kanatlarda $a < b$ olduğundan $(dy/dx)^2 \approx 1$ ve $ds \approx dx$ kabul edilebilir. Buna göre (6) denklemi

$$dq_c = [U h_1 + h_2 + 4h_3 f(x)] (T - T_s) dx \quad (7)$$

şeklini alır. Boyuna kanatlarda $L > b > a$ olduğundan kanadın profil yüzeylerinden iletilen ısı üst ve alt yüzeyler yanında ihmal edilebilir. Böylece (7) denklemi

$$dq_c = L(h_1 + h_2)(T - T_s) dx \quad (8)$$

şekline basitleşir.

Üst ve alt yüzeylerin konveksiyon katsayıları farklı olabilir. Fakat

$$h = \frac{1}{2} (h_1 + h_2) \quad (9)$$

denkleminde ortalama bir konveksiyon katsayısı tanımlanırsa (8) denkleminde

$$dq_c = 2Lh(T - T_s) dx \quad (10)$$

bulunur. Ayrıca $\theta(x) = T(x) - T_s$ sıcaklık farkı tanımlanır (10) denkleminde

$$dq_c = 2Lh\theta(x) dx \quad (11)$$

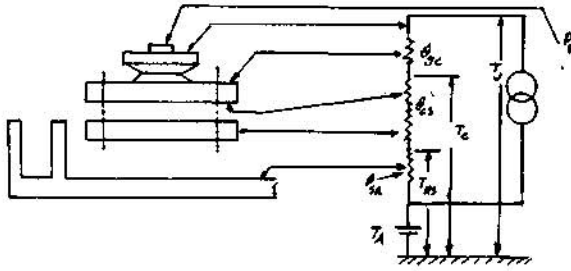
(4) denkleminde de

$$dq = k \left[\frac{dA(x)}{dx} \frac{d\theta}{dx} + A(x) \frac{d^2 \theta}{dx^2} \right] dx \quad (12)$$

bulunur. (11) ve (12) denklemleri eşitlenirse, (3) ışığında

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} + \frac{1}{f(x)} \frac{df(x)}{dx} \frac{d\theta}{dx} - \frac{h}{kf(x)} \theta(x) = 0 \quad (13)$$

bulunur. Bu denkleme genelleştirilmiş boyuna kanat diferansiyel denklemi denir ve çözümü, boyuna kanatlarda $\theta(x)$ sıcaklık profilini verir.



Şekil 2: Termo-elektrik analogi

Termo-elektrik analogi

Transistor soğutucu kompleksi Şekil 2'de görülen termo-elektrik analogi ile açıklanabilir. Transistorun termik karakteristikleri ile üzerindeki güç düşümü arasında bulunan ilişki sıcaklıkla sınırlanan güç düşümü yönünden yararlı olabilir. Soğutucu-transistör kompleksinin ısı atma yeteneği bakımından birleşme yüzeyi sıcaklığı (T_J), gövde sıcaklığı (T_C) ve çevresel hava sıcaklığı (T_A) ile ilişkisi "termik direnç" adı verilen bir kavram yardımı ile kısaca incelenebilir. Termik direnç **sözü** ısı etkisini elektrik benzerlik yönünden açıklamak için kullanılır. Şekil 2'deki çeşitli terimlerin tanımları şunlardır :

θ_{JA} : Toplam termik direnç (birleşme yüzeyinden çevreye)

θ_{JC} : Transistor termik direnci (birleşme yüzeyinden gövdeye)

θ_{CS} : Yalıtıcı termik direnci (gövdeden soğutucuya)

θ_{SA} : Soğutucu termik direnci (soğutucudan çevreye)

Bu dört büyüklük arasında şöyle bir denklem yazılabilir:

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}$$

Bu analogi Kirchhoff kanunu yardımı ile

$$T_J = P_D \theta_{JA} + T_A$$

şeklinde yazılabilir. Bu bağıntıya göre birleşme yüzeyi sıcaklığının çevresel hava sıcaklığı üzerinde "yüzdüğü", başka bir deyişle, çevresel hava sıcaklığının düştüğü kadar düştüğü ve arttığı kadar da arttığı görülmektedir. θ termik faktörü transistor üzerinde belirli bir güç düşümü için ne kadar sıcaklık düşümü (veya artımı) yer alacağı hakkında bilgi sağlar. **θ_{JC}** nin değeri genellikle 0,5 C/W'dir. Buna göre 50 W'lık bir güç düşümü için gövde sıcaklığı ile birleşme yüzeyi iç sıcaklığı arasındaki fark (termokupl ile ölçüldüğüne göre)

$$T_J - T_C = \theta_{JC} P_D = (0,5)(50) = 25 \text{ C}$$

kadardır. Buna göre soğutucu transistor gövdesini 50 C sıcaklıkta tutabiliyorsa birleşme yüzeyi 75 C sıcaklıkta olacaktır.

Soğutucu kullanılmadığı zaman birleşme yüzeyinden serbest havaya termik direnç tipik olarak **θ_{JC}** = 40 CAV kadardır. Böylece 1 W'lık bir güç düşümünün birleşme yüzeyi sıcaklığı çevre sıcaklığının 40 C üzerine çıkmakta olduğu görülmektedir. Buna göre 25 C çevre sıcaklığında çalışan bir transistor üzerinde düşen gücün 5 W olabilmesi için birleşme yüzeyi limit sıcaklığı olan 100 C'ine üzerine çıkılması gerekecektir. Sayısal bir örnek verilirse, bu sıcaklık

$$T_J = T_A + \theta_{JA} P_D = 25 \text{ C} + (40 \text{ C/W})(5 \text{ W}) = 225 \text{ C}$$

bulunacaktır. Bu sonuca göre bir soğutucu, gövde ile hava arasında, soğutucusuz transistor ile hava arasındaki dirençten çok daha düşük bir direnç halindedir.

Yine bir sayısal örnek vermek gerekirse $\theta_{SA} = 2 \text{ C/W}$, gövdeden soğutucuya yalıtıcı direnci $\theta_{CS} = 0,8 \text{ CAV}$ ve transistor için $\theta_{JC} = 0,5 \text{ CAV}$ seçilirse (bunlar tipik değerlerdir)

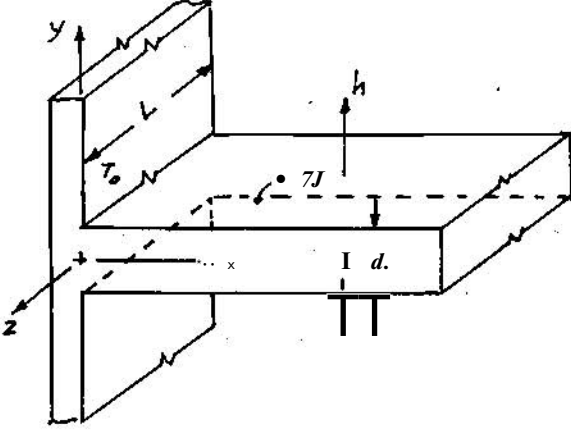
$$\theta_{JA} = \theta_{SA} + \theta_{JC} + \theta_{CS} = 2,0 + 0,5 + 0,8 = 3,3 \text{ C/W}$$

bulunur. Buna göre soğutucu kullanıldığında, soğutucusuz transistor için 40 CAV olan direnç, soğutucu tarafından 3,3 CAV değerine indirilmektedir. 2 W'lık bir transistor için bu fark

$$(T_j - T_A) = \theta_{JA} P_D = (3,3 \text{ C/W}) (2 \text{ W}) = 6,6 \text{ C}$$

olacaktır.

Boyuna dikdörtgen kanat



Şekil 3: Boyuna dikdörtgen kanat

Şekil 3 te görülen kanat yapım kolaylığı dolayısıyla en çok kullanılan kanat tipidir ve kolayca gövde ile birlikte dökülebilir ve preslenebilir.

Bu kanat için

$$f(x) = a/2, \quad df(x)/dx = 0 \quad (14)$$

ve (13) denkleminde yerleştirilip düzenlemekle

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - m^2 \theta = 0, \quad m^2 = 2h/ka \quad (15)$$

bulunur. Bu ikinci mertebeden bir adi diferansiyel denklemdir ve genel çözümü

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad (16)$$

yazılabilir. C_1 ve C_2 sabitlerinin değerlendirilmeleri için iki sınır şartı gerekir? Bunlardan biri şudur:

$$x = 0, \quad \theta(0) = T_0 - T_s = 0_0 \quad (17)$$

ikinci sınır şartı kanadın yapısına bağlıdır ve başlıca şu durumlar söz konusu olabilir:

- Sonsuz kanat
- Ucu yalıtılmış sığ kanat; uçtan ısı kaybı yok.
- Ucu çıplak sığ kanat; uçtan ısı kaybı var.

Kanadın sıcaklık profili ve yayacağı ısı bu üç durumda farklı olduğundan bu durumların ayrıntılı olarak incelenmeleri gerekir.

a) Sonsuz kanat

Şekil 3 te kanat yüksekliği (b boyutu) yeteri kadar büyükse kanat uç sıcaklığı ortam sıcaklığına eşit kabul edilebilir ve bu şart

$$x = \infty, \quad T(b) = T_s \text{ veya } \theta(b) = 0 \quad (18)$$

eli belirlenir. (17) ve (18) şartları sıra ile (16) denkleminde uygulanırsa

$$C_1 + C_2 = \theta_0$$

bulunur. Sıcaklık kanadın her noktasında sonlu olmalıdır. Buna göre (18) sınır şartı (16) denkleminde $C_2 = 0$ gerektirir ve böylece kanadın sıcaklık profili

$$\theta(x) = \theta_0 e^{-mx} \quad (19)$$

bulunur. Bu sonuç, θ nin tanımı uyarınca

$$T(x) = T_s + (T_0 - T_s) e^{-mx} \quad (20)$$

yazılabilir.

Kanat tabanından kanada giren ısı, Fourier kanunu uyarınca

$$q_0 = -kaL(d\theta/dx)_0 = kaLm\theta_0 \quad (21)$$

bulunur. Taban sıcaklığındaki kanat yüzeyinden ideal ısı iletimi

$$q_i = 2hbL\theta_0 = a >$$

olduğundan kanat verimi

$$\eta = q_0/q_i = 0$$

bulunur.

b) Ucu yalıtılmış sığ kanat

Kanadın $x = b$ ucu mükemmel yalıtılmış ise uçtan ısı iletimi olmayacağından

$$q_b = -kaL(d\theta/dx)_b = 0, \quad (d\theta/dx)_b = 0 \quad (22)$$

olmalıdır. Bu şart (16) denkleminde uygulanırsa

$$\left(\frac{d\theta}{dx} \right)_b = m(C_1 e^{mb} - C_2 e^{-mb}) = 0$$

buradan da

$$C_2 = C_1 e^{2mb}$$

bulunur. Bu denklem diğer sınır şartı olan $(C_1 + C_2) = \theta_0$ ile birlikte çözülürse

$$C_1 = \frac{\theta_0}{1 + e^{2mb}}, \quad C_2 = \frac{\theta_0}{1 + e^{-2mb}}$$

bulunur ve (16) denkleminde taşıyıp hiperbolik fonksiyonlardan yararlanılırsa

$$\theta(x) = \frac{\theta_0}{1 + e^{2mb}} \cosh m(x-b) + \frac{\theta_0}{1 + e^{-2mb}} \cosh m(b-x)$$

elde edilir. Kanat tabanından kanada giren ısı, Fourier kanunu uyarınca

$$q_0 = -kaL(d0/dx)_b = kaL0_0 \tanh(mb) \quad (24)$$

bulunur. Taban sıcaklığındaki kanat yüzeyinden ideal ısı akışı

$$q_i = 2hbL\theta_0$$

olduğundan, kanat verimi

$$\eta = \frac{\tanh(mb)}{mb} \quad (25)$$

elde edilir.

c) Çıplak uçlu sıg kanat

Bu durumda kanat ucuna bünyeden kondüksiyonla gelen ısı uçtan konveksiyonla ortama yayılacaktır. Sıcaklık kanat yüksekliği boyunca değiştiğinden uç ve yüzey kondüksiyon katsayıları eşit olmayabilir. Buna göre uç konveksiyon katsayısı h_b ile gösterilirse iki durum ortaya çıkar:

1) Uç ve yüzey konveksiyon katsayıları eşit, $h = h_b$
Bu durumda kanat ucuna kondüksiyonla gelen ısı

$$q_b = -kaL(d0/dx)_b$$

uç yüzeyinden konveksiyonla çevreye yayılan ısı

$$q_s = h_a L 0_b$$

ve kararlı rejimde bu ısılar eşit olacaklarından

$$-k(d0/dx)_b = h 0_b \quad (26)$$

yazılabilir ve (16) denkleminde

$$(d0/dx)_b = m t^{e^{-m \cdot 1}} - C^2 e^{-m \cdot 6}$$

ve

$$\theta(b) = \theta_b = C_1 e^{mb} + C_2 e^{-mb}$$

bulunarak (26) denkleminde yerleştirilmekle

$$C_1 e^{mb} - C_2 e^{-mb} = \frac{h}{km} (C_1 e^{mb} + C_2 e^{-mb}) \quad (27)$$

elde edilir. Bu denklem $0_1 + C_2 = 0_0$ denkleminde birlikte çözülüp (16) denkleminde yerleştirilirse, düzenlemeler yapıp üstel fonksiyonlardan hiperbolik fonksiyonlara geçilerek

$$0(x) = 0_0 \frac{\cosh m(b-x) + M \sinh m(b-x)}{\cosh(mb) + M \sinh(mb)}, M = h/km \quad (28)$$

ve Fourier kanunu yardımı ile de tabandan kanada giren ısı

$$q_0 = kaLm 0_0 \frac{\sinh(mb) + M \cosh(mb)}{\cosh(mb) + M \sinh(mb)} \quad (29)$$

elde edilir. Taban sıcaklığındaki kanat yüzeyinden ideal ısı transferi

$$q_i = 2hbL0_0$$

olduğundan kanat verimi

$$\eta = \frac{1}{mb} \frac{\sinh(mb) + M \cosh(mb)}{\cosh(mb) + M \sinh(mb)} \quad (30)$$

bulunur.

Soğutucu tasarımında genellikle ucu yalıtılmış kanat veya çıplak uçlu kanat ($h = h_b$) yaklaşımı kullanılır. Şimdi 25 W lık bir transistör için soğutucu tasarımını görelim. Transistörün maksimum çalışma sıcaklığı 100 C, çevre sıcaklığı 20 C, kanat kalınlığı 2 mm, kanat yüksekliği 20 mm, kanat malzemesi alüminyum, ($k = 200 \text{ W/mc}$) konveksiyon katsayısı 5,5 $\text{W/m}^2\text{C}$ olsun, önce m sabiti hesaplanır:

$$m^2 = \frac{2h}{ka} = \frac{2(5,5)}{200(0,002)} = 27,5, m = 5,244$$

$$mb = 5,244(0,020) = 0,105,$$

$$M = \frac{h}{km} = \frac{5,5}{200(5,244)} = 0,005$$

Buna göre tek bir kanadın yayacağı enerji (29) denkleminde

$$q_0 = (200)(0,002)(5^{44})(80)$$

$$\frac{\sinh(0,105) + (0,005) \cosh(0,105)}{\cosh(0,105) + (0,005) \sinh(0,105)} = 18,34 \text{ W}$$

Bu değer bir metre uzunluğundaki tek bir kanadın birim zamanda çevreye yayacağı ısıdır. Kanat uzunluğu iyi bir boyut olan 150 mm kabul edilirse tek bir kanadın yayacağı ısı $(18,34)(0,15) = 2,75 \text{ W}$ olur. Gerekli kanat sayısı ise $18,34/2,75 = 6,67$ kanat bulunur. Bu durumda soğutucunun kanatlar arası yüzeyinden de çevreye ısı yayacağı düşünülürse 6 kanatlı bir soğutucu ile yetinilebilir. Böylece iki tarafında üçer kanat bulunan 150 mm uzunluğunda bir soğutucu 25 W lık bir transistörü soğutabilecektir. Kanatlar arası boşluklardan çevreye ısı yayılacağı düşünülmezse soğutucunun iki tarafında dörder kanat bulunan 150 mm uzunluğunda bir parça şeklinde olması gerekecektir. Maliyet faktörleri dolayısıyla 6 kanatlı bir soğutucu seçilmesi yerinde olacaktır.

KAYNAKLAR

Çiğdemoğlu, M., "Isı İletimi Prensipleri", Doruk Matbaacılık Sanayii, Ankara, 1980.

Kern, D.O., A.J.D. Kraus, "Extended Surface Heat Transfer", McGraw-Hill, 1972.

Boylestad, D., L. Nashelsky, "Electronic Devices and Circuit Theory", Prentice-Hall, 1978.

Fink, D.G., D. Christlansen, "Electronic Engineers Handbook", McGraw-Hill, 1982.