

İşlem (Operasyon) Amplifikatörü

Yazan :
Caiian HÜSEYİN

ÖZET

Çelik endüstrisi sahasında kumanda sistemlerinde ve elektronik hesap makinalarında geniş tatbikatı olan işlem amplifikatörleri isminden de anlaşılacağı gibi çeşitli matematik işlemleri yapabilen amplifikatörlerdir. Amplifikatörde işlemler, direnç ve kapasite gibi pasif devre elemanları yardımı ile yapılmaktadır. Yazı, işlem amplifikatörlerinin çalışma prensiplerini izah etmektedir.

SUMMARY:

Having an extensive use in the fields of steel industry, control systems and electronic computers, operation amplifiers, as implied by their names, are devices capable of handling various mathematical operations. In an amplifier, these operations are performed by means of passive circuit elements such as resistance and capacitance. In the article below, operation principles of these devices are explained.

A — GİRİŞ VE MANASI :

İşlem Amplifikatörünün isminden de anlaşılacağı gibi sistemin gayesi amplifikatöre muhtelif matematik işlemlerin yaptırılmasıdır. Meselâ; Toplama, çıkarma, çarpma, integral, diferansiyel, v.s. gibi. Bu işlemlerin nasıl yapıldıklarına ileride teker teker temas edilecektir.

İşlem amplifikatörü önceleri daha ziyade analog hesap makinelerinde kullanılmakta idi. Son zamanlarda askerî sahada ölçü sistemlerinde, çelik endüstrisinde geri besleme (feedback) kontrol sistemlerinde geniş bir tatbikat sahası bulmuştur.

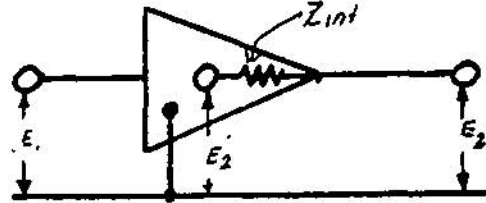
Amplifikatörde işlemler direnç ve kapasiteler gibi pasif devre elemanları yardımı ile yapılmaktadır. Amplifikatörün imalinde bahis konusu işlemlerin, amplifikatör içerisindeki değişkenler ile hiçbir bağıntısı yoktur. Pasif elemanlarla yapılan devrelerin stabilite ve linearteleri, doğruluk dereceleri yüksek olan analog hesap makinelerinde çok arzu edilen hususlardandır.

İşlem amplifikatörünün açık çevrim kazancı — geribesleme yokken — oldukça yüksektir (yaklaşık olarak 40.000 mertebesinde). Halbuki işlem yaptırılma durumunda İzolasyon bakımından kazancın oldukça düşük olması istenir. Kazancı düşürmek için amplifikatöre geribesleme tatbik edilir

İşlem amplifikatörünün kazancının geribesleme ile değişimi şu şekilde izah edilebilir :

Amplifikatörün -iç empedansının Z_{int} olduğunu kabul edelim. Negatif geribesleme yapılması halinde Z_{int} empedansına tesir edilmekte ve değeri düşürülmektedir. Bu konuya teferruatlı olarak ileride temas edilecektir.--

Yüksek kazançlı amplifikatör şeması:

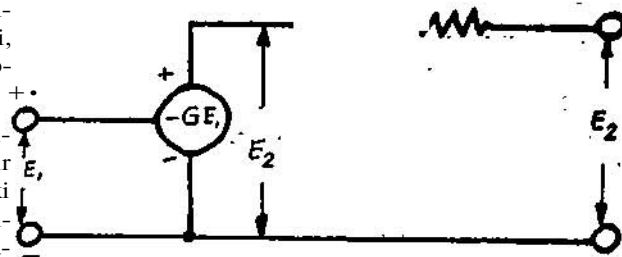


Şekil : 1

Şekil : 1 deki amplifikatörün giriş empedansının sonsuz, çıkış empedansının Z_{int} olduğunu kabul edelim.

$$\text{Kazanç : } G = \frac{E_2}{E_1} \text{ ve } G > 0 \text{ dır.}$$

Şekil: 1'in eşdeğer devresi:



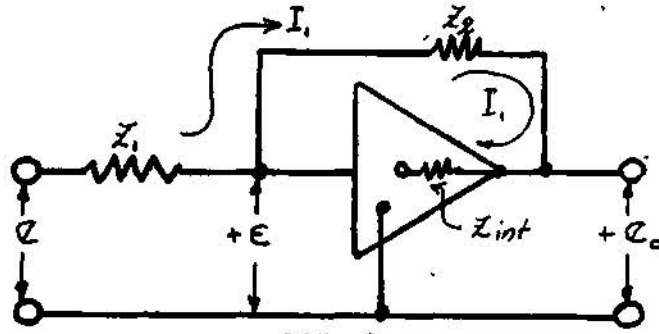
Şekil : 2

Yüksek kazançlı amplifikatöre geribesleme devresini de ilâve edecek olursak aşağıdaki şekli almaktadır (Şekil : 3).

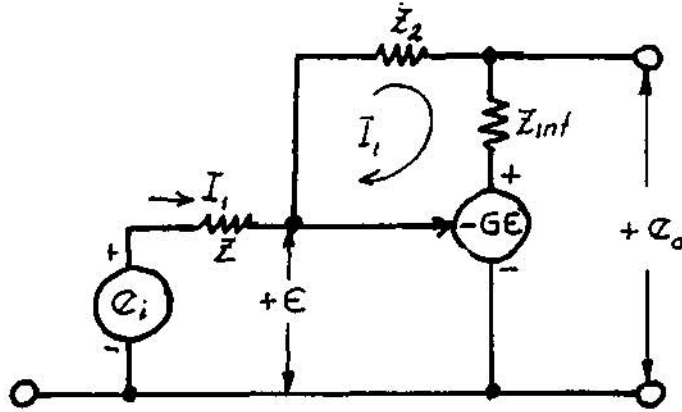
Eşdeğer -devre : Şekil : i.

Şekil : 4'deki eşdeğer devreden şu bağıntılar yazılabilir :

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1} = \frac{E_1 - E_2}{Z_2} = \frac{E_1 - (-GE_1)}{Z_2 + Z_{int}} \dots \dots \dots (D)$$



Şekil . 3



Şekil : 4

Çıkış voltajı e_o için :

$$e_o = -G_e + I_1 Z_{int} = \epsilon \left(G \frac{(1 + 0 \cdot Z_1)}{Z_2 + Z_{int}} \right) \quad (2)$$

$$e_o = -\epsilon \frac{G(Z_2 + Z_{int} - Z_{int}) - Z_{int}}{Z_2 + Z_{int}} \quad (3)$$

$$e_o = -\epsilon G' \quad (4)$$

Burada :

$$G' = \frac{G(Z_2 + Z_{int}) - (G + 1)Z_{int}}{Z_2 + Z_{int}} \quad (5)$$

Eğer $Z_1 \gg Z_2 \gg (G + 1)Z_{int}$ ise $G' \approx G$ dir. (6)

Pratik olarak (6) bağıntısı gerçekleşmektedir.

(4) bağıntısından $e_o = -e_o/G'$ yü (1) bağıntısında yerine koyarsak :

$$\frac{e_o}{Z_1} + \frac{e_o}{G'Z_2} = \frac{e_o}{G'Z_2} - \epsilon_o \quad (7)$$

şeklini almaktadır.

Limit durumunda $G \rightarrow \infty$ olduğundan $Z_0 \rightarrow 0$ 'a gitmektedir. ... (8)

$$G \gg 1 \text{ için } \frac{e_o}{e_i} = -\frac{Z_2 Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{Z_{int}}{GZ_1} \quad (9)$$

$\epsilon = 0$ dır.

$G \rightarrow \infty$ için $\epsilon = 0$ $e_o/e_i = -Z_1/Z_2$,

$$Z_0 = 0 \quad (10)$$

Sonuçlar şunu göstermektedir ki, cihaz çok yüksek giriş empedansla (Z_1 'yi yüksek seçmekle) çok alçak çıkış empedansı haiz ve çıkış - giriş karakteristikleri sadece pasif devre elemanları olan Z_1 ve Z_2 'ye bağlıdır. Bu özellikleri haiz amplifikatöre «İŞLEM (OPERASYON) AMPLİFİKATÖRÜ» ismi verilmektedir.

B - İŞLEM AMPLİFİKATÖRÜNÜN KULLANILIŞI :

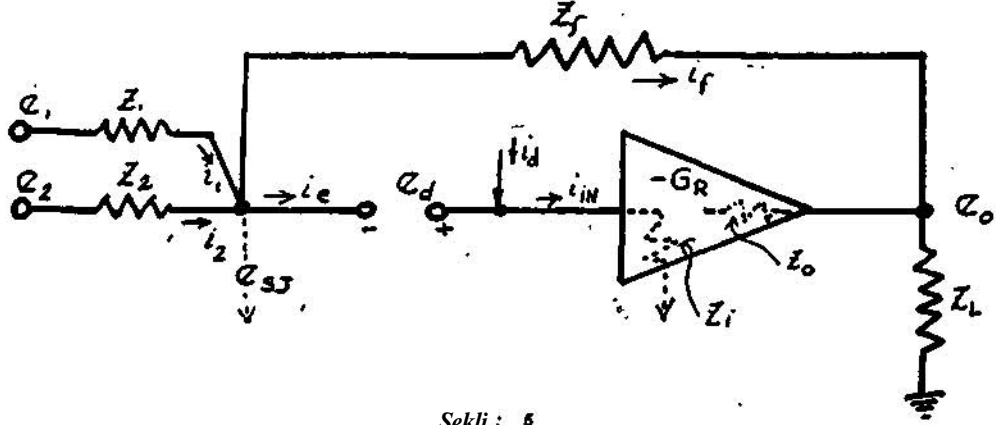
İşlem amplifikatörü muhtelif işlemleri yapmada kullanılır Şöyle ki;

- İşaret değiştirici olarak
- Bir sabite ile çarpma işleminde
- İşaret toplama ve çıkarmada
- Gerilimi akıma dönüştürmede
- Akımı gerilime dönüştürmede
- Gerilim amp'ifikasyonunda
- Akım amplifikasyonunda
- Sabit gerilim kaynağı olarak
- İntegrasyon işleminde
- Diferansiyel işleminde

Yukarıdaki işlemlerden mühim olanlara kısaca temas edelim

1. İŞARET DEĞİŞTİRİCİ (İNVERTER) OLARAK KULLANILMASI :

İşaret değiştirmekten kâsıt, amplifikatörün giriş işareti ile çıkış işareti arasında 180° faz farkı temin etmektir. Devre olarak :



Şekli : 5

Devrede kullanılan notasyonların masaları:

Z_{ip}	Z_j, Z_f	Giriş ve geribesleme empedansları
J_{in}		Amplifikatör giriş empedansı
Z_o		Amplifikatör çıkış empedansı
Z_L		Amplifikatör yük empedansı
e_j, e_2		Giriş işaret gerilimleri
e_d, I_{rf}		Girişe nazaran haricî parazit gerilim akımı
e_{sj}		Toplanma noktasındaki gerilim
e_o		Çıkış gerilimi
e'_o		Yüksüz halde çıkış gerilimi
i_1, i_2, i_3		Giriş ve geribesleme akımları
i_e		Toplanma noktasındaki hata akımı
i_{in}		Amplifikatör giriş akımı
G_R		Amplifikatör kazancı (VOLT/AMP.)
O		Amplifikatör kazancı (VOLT/VOLT)

Şekil : 5 deki devrede düğüm noktası akımlar bağıntısını yazacak olursak,

$$i_e = i_1 + i_2 - i_f \quad (11)$$

$$i_1 = \frac{e_1 - e_{sj}}{Z_1}, \quad i_2 = \frac{e_2 - e_{sj}}{Z_2}, \quad i_f = \frac{e_{sj} - e_o}{Z_f} \quad (12)$$

$$i_{in} = i_e + i_d \quad (13)$$

(11), (12), (13) toağıntılarının bileşiminden

$$i_{in} = e_1/Z_1 + e_2/Z_2 + e_o/Z_f - e_{sj} (1/Z_1 + 1/Z_2 + 1/Z_f) + i_d \quad (14)$$

$$e_{sj} = e_d + i_{in} \cdot Z_{in} \quad (15)$$

(14) ve (15)'in birleşiminden,

$$i_{in} (1 + Z_{in} (1/Z_1 + 1/Z_2 + 1/Z_f)) = e^{\wedge Z_1} + e_2/Z_2 + e_o/Z_f - e_d (1/Z_1 + 1/Z_2 + 1/Z_f) + i_d \quad (16)$$

$$i_{in}' = -e'_o/G_R \quad (17)$$

$$e'_o = \frac{Z_o + Z_L}{Z_L} \cdot e_o \quad (18)$$

(17) ve (18)'in birleşiminden,

$$i_{in} = -\frac{Z_o + Z_L}{Z_L} \cdot e_o \quad (19)$$

(16) ve (19)'un birleşiminden,

$$\frac{e_o}{Z} \left(1 + \frac{(Z_o + Z_L)Z_f}{Z_L \cdot G_R} + \frac{(Z_o + Z_L)Z_{in} \cdot Z_f}{Z_L \cdot G_R} \right) = \frac{Z_1 Z_2 Z_f}{Z_1 Z_2 Z_f} \left(\frac{e_1}{Z_1} - \frac{e_2}{Z_2} + e_d \right) + \frac{Z_j Z_2 + Z_1 Z_f + Z_2 Z_f}{Z_1 Z_2 Z_f} e_d \quad (20)$$

Sağ ve sol terimleri gruplar haline getirecek olursak;

$$e_o \left(1 + \frac{(Z_o + Z_L)Z_{in}}{Z_L G_p} \left(1 + \frac{Z_1}{Z} + \frac{Z_2}{Z} + \frac{Z_f}{2L} \right) \right) = -e_1 \frac{Z_f}{Z_1} - e_2 \frac{Z_f}{Z_2} + e_d \left(1 + \frac{Z_f}{Z_1} + \frac{Z_f}{Z_2} \right) - V^5 \quad (21)$$

(21) bağıntısını basitleştirerek şöyle yazmak mümkündür.

$$e_o = -e_1 \frac{z_f}{z_1} M - e_2 \frac{z_f}{z_2} M + e_d \left(1 + \frac{z_f}{z_1} + \frac{z_f}{z_2} \right) M - i_d z_f M \quad (22)$$

Burada,

$$M = \frac{1}{(Z_0 + Z_L) Z_{in} + \frac{Z_1 Z_2}{Z_m} + \frac{Z_1 Z_2}{Z_1} + \frac{Z_1 Z_2}{Z_2}} \quad (23)$$

Yukarıdaki formül sadece iki girişli bir işlem amplifikatörü için çıkarılmıştır. Çok girişli amplifikatör için de benzer şekilde ve ilâve girişleri de nazarı itibare olarak formülü genişletmek mümkündür.

ideal bir işlem amplifikatöründe iki giriş için aşağıdaki bağıntıyı yazmak mümkündür.

$$e_o = e_1 \frac{z_f}{z_1} - e_2 \frac{z_f}{z_2} \quad (24)$$

(22) bağıntısı teorik olarak bulunan hakikî bir amplifikatöre aittir. Pratikte bu amplifikatörü gerçekleştirmek ve (24) bağıntısında gösterilmiş olan ideal bir amplifikatöre İrca etmek için (22) bağıntısındaki bazı şartların yerine getirilmesi lâzımdır. Bu şartlar:

$$1 - M = 1$$

$$2 - e_d \left(\frac{z_f}{z_1} + \frac{z_f}{z_2} \right) M = 0$$

$$3 - i_d z_f M = 0$$

olmalıdır. Bu şartları gözden geçirelim :

1. Şart: $M = 1$:

M teriminin Karakteristiklerini incelemek için Şekil 5 deki devrenin G normal kazancı ile H_R geribesleme kazancını nazarı itibare almak lâzımdır. Çünkü G ve H_R yukarıda bahis konusu haraci parazit e_d gerilimi ile i_d akımının fonksiyonu değillerdir. e_d ve i_d işletme zamanında sıfır olarak düşünülebilir.

Buna göre :

$$G = \frac{1}{Z_m} \quad (25)$$

$$e_o = -G_R \left(\frac{z_f}{z_0 + z_L} \right) \quad (26)$$

$$G = \frac{G_R}{z_0 + z_L} \left(\frac{z_f}{z_0 + z_L} \right) \quad (27)$$

$$\frac{1}{G} = \frac{Z_{in}}{G_R} \left(\frac{Z_0 + Z_L}{Z_f} \right) \quad (28)$$

Geribesleme kazancı H ise, geribesleme empedansı ve giriş empedanslarının paralel değerine tabiidir.

$$H = \frac{e_{s1}}{e_o} \quad (29)$$

$$W = \frac{z_1 z_2 z_{in}}{z_1 z_2 z_{in} + z_1 z_2 z_{in} + z_1 z_2 z_{in}} \quad (30)$$

$$H = \frac{z_1 z_2 z_{in}}{z_1 z_2 z_f + z_1 z_2 z_{in} + z_1 z_2 z_f + z_2 z_{in} z_f} \quad (31)$$

$$\frac{1}{H} = \left(1 + \frac{z_f}{z_{in}} + \frac{z_f}{z_1} + \frac{z_f}{z_2} \right) \quad (32)$$

(23), (28) v» (32) bağıntılarından,

$$M = \frac{1}{1 + \frac{GH}{GH}} = \frac{GH}{1 + GH} \quad (33)$$

$GH \gg 1$ olduğu zaman $M = 1$ olmakta ve birinci şart gerçekleşmektedir.

M terimi işlem amplifikatörlerin imalinde en önemli yeri işgal etmektedir. Bu terim amplifikatörün sadece düzgünlüğünü (hatasuu) tayin etmekle kalmayıp aynı zamanda dinamik karakteristiklerinin iyi olmasını sağlamaktadır. Mühim olan bir husus da, amplifikatörün bir fonksiyonu olan v_d gerilimi ile i_d akımı bir yana, (22) bağıntısında işaret edilen M faktörünün amplifikatörün dahili karakteristiklerine ait olmasıdır. Bunun haricindeki faktörler harici karakteristiklere aittir. M terimini daha teferruatlı olarak incelemek mümkündür.

$$\left(\frac{G_R}{Z_{in}} \right) :$$

Bu terim amplifikatörün gerilim kazancını tayin etmektedir. GH'in büyük olması istendiği zaman G_R / Z_{in} nin büyük olması lazımdır. İyi bir amplifikatör için de kazancı «n- az 10.000 mertebesinde olması arzu edilir. Milyon mertebesinde kazanç normal olarak kullanılmaktadır. Amplifikaotr imâl edilirken İm teriminin dinamik karakteristiğinin kontrol edilmesi lâzım-

dır. Bundan başka işlem amplifikatöründe iyi bir elastikiyet elde etmek için çevrim kazancı 20db/dek. ve 90° faz kayması halinde sabit değerlerde sıfırın altına düşünceye kadar zayıflatılır. Karakteristiğin -1 eğiminde sonsuz geribesleme empedansı hasil olur ve çevrim stabilitesinin muayyen derecelerinde bundan istifade edilir. Bu lüzumlu kazanç zayıflama karakteristiğinden dolayı frekans yükseldikçe M terimi de yükselir ve (22) bağıntısı da (24) bağıntısından türetilir.

$$\frac{Z_o Z_L}{Z_L} :$$

Bu terim amplifikatörün açık çevrim çıkış empedansından meydana gelmektedir, özel olarak imal edilmiş amplifikatörde bütün frekans değerlerinde Z_o empedansı Z_L yük empedansından oldukça küçük olması lazımdır. Bu şart sadece kazanç zayıflamasına mani olmak için istenmemekte kapasitif yüklenme halinde kapalı çevrim faz çizgisinin kaymasından mütevellit meydana gelecek faz kaymasına mani olmak içindir. $Z_o \ll Z_L$ olması halinde bahis konusu $(Z_o + Z_L)/Z_L$ terimi kabili ihmalidir.

$$\left(1 + \frac{Z_f}{Z_{in}} + \frac{Z_f}{Z_1} + \frac{Z_f}{Z_2}\right)$$

Bu terim de geri besleme kazancının tam manasıyla resiproku olup değeri hiçbir zaman, 1 den küçük değildir. Şurası aşıkardır ki işlem kazancının büyümesi bu terimin değerini dolayısıyla M'in değerini de artırmış olur. Buna paralel olarak işlem amplifikatörünün doğruluğunu azaltmaktadır. Bu terimden dolayı işlem amplifikatörünün yüksek kazançlı olanları pratikte pek tercih edilmezler. Yüksek doğruluk istenen yerlerde de kazanç 10 dan yukarı olmamalıdır.

$$2. \text{ Şart, } e_d \left(1 + \frac{Z_f}{Z_1} + \frac{Z_f}{Z_2}\right) \cdot M = 0$$

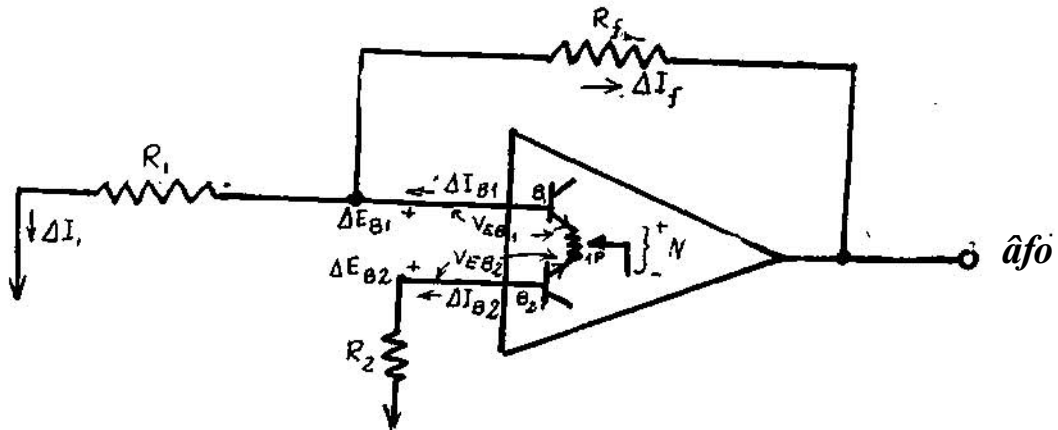
2. Şart, $e_d = 0$ olduğu zaman gerçekleşmektedir. e_d gerilimi amplifikatörün girişindeki (toplanma noktası) istenmeyen gerilimleri temsil etmekte idi. Bunlar, harici parazitlerden sıcaklık değişimlerinden ve besleme geriliminin değişiminden meydana gelebilmektedir. Şurası muhakkaktır ki e_d 'nin bir d.c terimi olması bahis konusu değildir. $(1 - f Z/Z_j + Z/Z_o)$ faktörü hakikatte paralel bağlı giriş empedanslarının oranı geri besleme empedanslarının paralel bağlı giriş empedanslarının bölümüne eşittir. Bu oran ile $M = 1$ olduğu bilinmektedir. Bahis konusu harici gerilimlerin çıkış üzerindeki tesirleri keza hesaplanabilir. Bunu telâfi etmek için lüzumlu giriş sinyal gerilimi, giriş empedansını çıkış empedansına bölerek ve harici gerilim ile çarparak hesaplanabilir.

$$3. \text{ Şart, } i_d \cdot Z_c \cdot M = 0$$

3. Şart, $i_d = 0$ olduğu zaman gerçekleşmektedir. i_d akımı girişteki harici akımları temsil etmektedir. Bu akımın en büyük tesiri, sıcaklıktan meydana gelen giriş akımının değerinin değişmesidir. $M = 1$ olması halinde harici akım, giriş akımının değer değiştirmesinden dolayı çıkışta husule gelen çıkış gerilimi ile geri besleme empedansını etkilemektedir. Giriş sinyal geriliminin, akımın değer değiştirmesinden meydana gelen değişmiş, çıkış geriliminin, giriş empedansı ile çıkış empedansının oranlarının çarpımı ile meydana gelen ifadeyi telâfi etmesi lazımdır.

2. İŞLEM AMPLİFİKATÖRÜNDEKİ KISMI DEĞİŞİMLER

Bundan önceki bölümde işlem amplifikatörünü incelerken harici veyahut dahili tesirlerden (meselâ sıcaklık değişiminden) dolayı amplifikatör içerisinde kısmi değişimlerin meydana gelebileceğine işaret etmiştik. Bunlara kısaca temas etmek faydalı olacaktır.



şekil: 6

Düşük değerli kısmî değişimler kararlı olmayan işlem amplifikatöründe farklı giriş katları ve silikon transistörler kullanılması halinde kendilerini göstermektedirler. Bu halde fark girişleri, fark katının transistörlerine baz-bağlantısı şeklinde bağlanmaktadır. Baz akunlarındaki kısmi değişimler ile baz-şase arasındaki gerilimlerdeki kısmi değişimlerin tesirleri aşağıda gösterilmiştir.

- R_1 Baz 1 deki ibütün giriş dirençlerinin şaseye nazaran paralel değeri
- R_f Geri besleme direnci
- R_2 Baz 2 deki direncin şaseye nazaran değeri
- ΔI_{B1} Baz 1 deki akımın kısmi değişimi
- ΔI_{B2} Baz 2 deki akımın kısmi değişimi
- ΔV_{BE1} 1 nolu giriş transistörünün Baz-Bemetör voltajının kısmi değişimi
- ΔV_{BE2} 2 nolu giriş transistörünün Baz-Emetör voltajının kısmi değişimi
- $E_d = A V_{BE1} - V_{BE1}$ Birinci kat transistörlerinin Baz-Emetör kısmi değişim voltajlar farkı.
- $I_d = A I_{B1} - I_{B2}$ Birinci kat transistörlerinin baz akımlarındaki kısmi değişim farkı

$$\Delta E_{B1} - A E_{B2} = A V_{BE1} - \Delta V_{BE2} + \Delta N \quad (34)$$

İP potangiyometresi uçlarındaki N geriliminin kısmi değişimi $\Delta V_{BE1} - \Delta V_{BE2}$ içerisinde mevcut olduğundan kabli-i ihmaldir.

Yani $A N = 0$ dır.

$$\Delta E_{B1} = E_d + \Delta I_{B2} R_2 \quad (35)$$

$$\Delta I_1 = \frac{A E_{B1}}{R_1} \quad (38)$$

$$A I_f = A \hat{I}_{B1} - A I_f \quad (37)$$

$$A E_o = A B_{B1} - A I_f t \quad (38)$$

(35), (36) ve (37) eşitliklerinin birleşiminden.

$$\Delta I_f = \Delta I_{B1} - \frac{E_d}{R_1} - \Delta I_{B2} \frac{R_2}{R_1} \quad (39)$$

(35), (38) ve (39) eşitliklerinin birleşiminden,

$$\Delta E_o = E_d + \Delta I_{B2} R_2 - \Delta I_{B1} R_f + \frac{E_d R_f}{R_1} + \Delta I_{B1} \frac{R_2 R_f}{R_1} \quad (40/1)$$

$$\Delta E_o = E_d \left(\frac{R_1 + R_f}{R_1} \right) + \Delta I_{B2} R_2 \left(\frac{R_1 + R_f}{R_1} \right) - A I_f R_f \quad (40)$$

(34) ve (35) bağıntılarının eşitliklerinden giriş direnci çözülecek olursa,

$$R_2 = \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f} \text{ olarak bulunur.} \quad (41)$$

Buna göre,

$$\Delta I_{B1} = E_d \left(-\frac{R_1 + R_f}{R_1} \right) - I_d R_f \text{ şeklini alır} \quad (42)$$

Birbirine tam olarak eşit iki tane transistor alınacak olursa yani iyi bir taz-emetör Voltajını haiz ve sıcaklık baz akımına tesir etmiyorsa E_d ve T_d değerleri yaklaşık olarak sıfır alınabilir. Bu şekilde kısmi değişim oldukça küçük değerde tutulabilir.

Silikon tipi transistörlerin baz-emetör voltajları ve kazançları birbirine çok yakın olduğundan çok iyi alçak kısmi değişimli fark girişi olarak kullanılmaktadır. Bu transistörlerin kolektör-baz akım kaçağı oldukça düşüktür. Bunun yanında mahsur olarak baz akımında sıcaklık ile meydana gelen kısmi değişim, kazancın daha büyük değişimlerine sebep olmaktadır.

(34) ve (35) bağıntılarından çözülen 'giriş dirençleri eşit değillerse çftuş kısmi değişimini bulmak için (40) no'lu eşitlikten istifade etmek lazımdır.

$$R_2 = m \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f} \text{ olduğunu kabul edelim.} \quad (43)$$

$$\Delta E_o = E_d \left(\frac{R_1 + R_f}{R_1} \right) + (m \Delta I_{B2} - \Delta I_{B1}) R_f \quad (44)$$

$$I_d = 0, \quad A I_{B1} = A I_{B1} \quad (35)$$

$$\Delta E_o = E_d \left(\frac{R_1 + R_f}{R_1} \right) + \Delta I_{B2} (m - 1) R_f \text{ olmuş olur.} \quad (45)$$