

6.6. SPICE Simülasyonunda Kullanılmaya Yönelik Bir Analog Çarpma Devresi Makromodeli

6.6.1. Analog çarpma devresi

Analog çarpma devreleri, giriş gerilimlerinin çarpımıyla orantılı çıkış gerilimi veren düzenlerdir ve aradaki ilişki

$$V_o = K \cdot V_x \cdot V_y \quad (6.17)$$

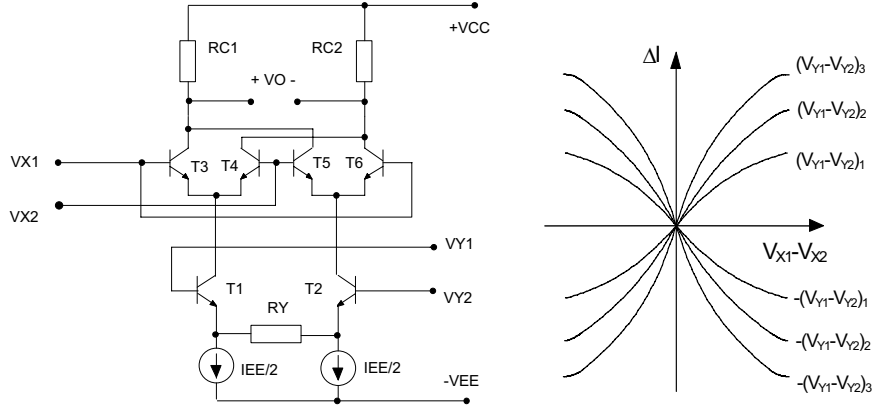
şeklinde dir. K büyüklüğü çarpma devresinin kazanç sabiti olarak isimlendirilir. V_o büyüklüğü çıkış gerilimini, V_x ve V_y büyüklükleri de giriş gerilimlerini göstermektedir. Analog çarpma devreleri, tümdevre tekniğinde kazancı gerilimle kontrol edilen kuvvetlendirici, faz kilitlemeli çevrim, faz karşılaştırıcı, modülatör, demodülatör, frekans çoğaltıcı gibi uygulamalara ilişkin düzeneklerin gerçekleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır .

Literatürde işlemsel kuvvetlendirici, işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA), akım taşıyıcı (CCII) gibi yaygın olarak kullanılan yapıların makromodelleri bulunmasına karşılık, analog çarpma devresi makromodellerine rastlanmamaktadır.

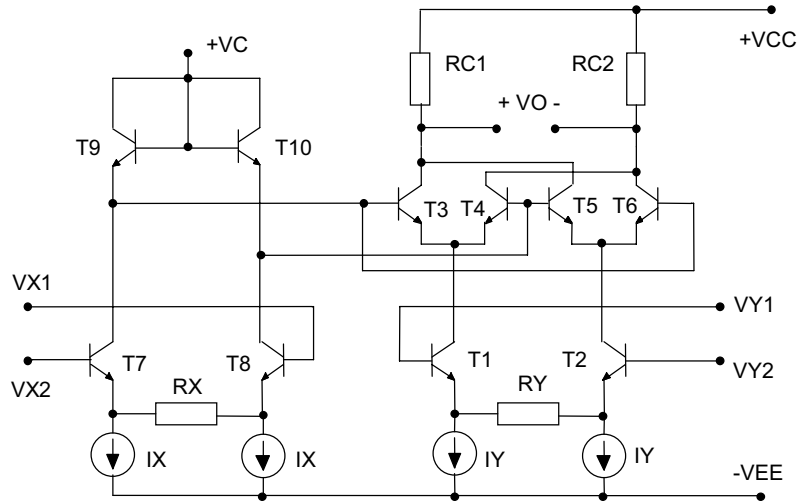
Bu bölümde, çeşitli biçimlerdeki devre topolojileri ile gerçekleştirilen analog çarpma devrelerinin SPICE programıyla simülasyonunda kullanılmaya yönelik bir makromodel gerçekleştirilmiş, makromodel yardımıyla elde edilen analog çarpma devresi karakteristikleri, eleman modeli yardımıyla SPICE simülasyonundan elde edilen sonuçlarla ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak kurulan modelin doğruluğu gösterilmiştir.

6.6.2. Temel analog çarpma devresi yapıları

Analog çarpma devrelerinin temel hücresi, gerek bipolar tümdevre gerekse MOS tümdevre tekniğinde, emetör (veya kaynak) bağlamalı fark kuvvetlendiricisidir. Dört bölge li analog çarpma devresi gerçekleştirmek üzere Gilbert hücresi olarak isimlendirilen altı tranzistorlu bir yapı kullanılır. Bu yapıda iki fark kuvvetlendiricisinin girişleri paralel, çıkışları ise çapraz olarak bağlanmıştır. Fark kuvvetlendiricilerin ortak kuyruk akımları ise bir diğer fark



Şekil-6.25.a) Analog çarpma devresi, b) tipik giriş-çıkış karakteristiği ($R_Y=0$ için).



Şekil-6.26. Lineerleştirilmiş analog çarpma devresi.

kuvvetlendiricisinin çıkış akımlarıyla sağlanmaktadır. Bu şekilde oluşturulan devrenin bipolar tekniğinde ne şekilde gerçekleştirildiği Şekil-6.25a'da görülmektedir. Şekil-6.25a'da yer alan ve bipolar tranzistorlarla gerçekleştirilmiş olan devrede çıkış akımının giriş gerilimlerine bağımlılığı

$$\Delta I = I_{EE} \cdot \tanh[(V_{X1} - V_{X2}) / V_T] \tanh[(V_{Y1} - V_{Y2}) / V_T] \quad (6.18)$$

biçimindedir. Uygun kutuplama ile tranzistorların doymaya girmemesi sağlanarak yüksek bir çalışma hızı elde edilebilir.

Girişlerden birinin geriliminin, $(V_{Y1}-V_{Y2})$ parametre alınmasıyla elde edilen giriş-çıkış karakteristikleri Şekil-6.25b'de verilmiştir. (6.18) bağıntısından ve Şekil-6.25b'den fark edilebileceği gibi, devre küçük genlikli işaretler için lineer çarpma işlemi yerine getirmektedir. Büyük genlikli işaretler söz konusu olduğunda, lineerleştirilmiş bir yapıdan yararlanır. Bu yapı Şekil-6.26'da verilmiştir. Şekil-6.26'daki devrenin çıkış gerilimini giriş gerilimlerine bağlayan ifade

$$V_O = \frac{2 \cdot R_L}{I_X R_X R_Y} (V_{X1} - V_{X2}) \cdot (V_{Y1} - V_{Y2}) \quad (6.19)$$

biçimindedir.

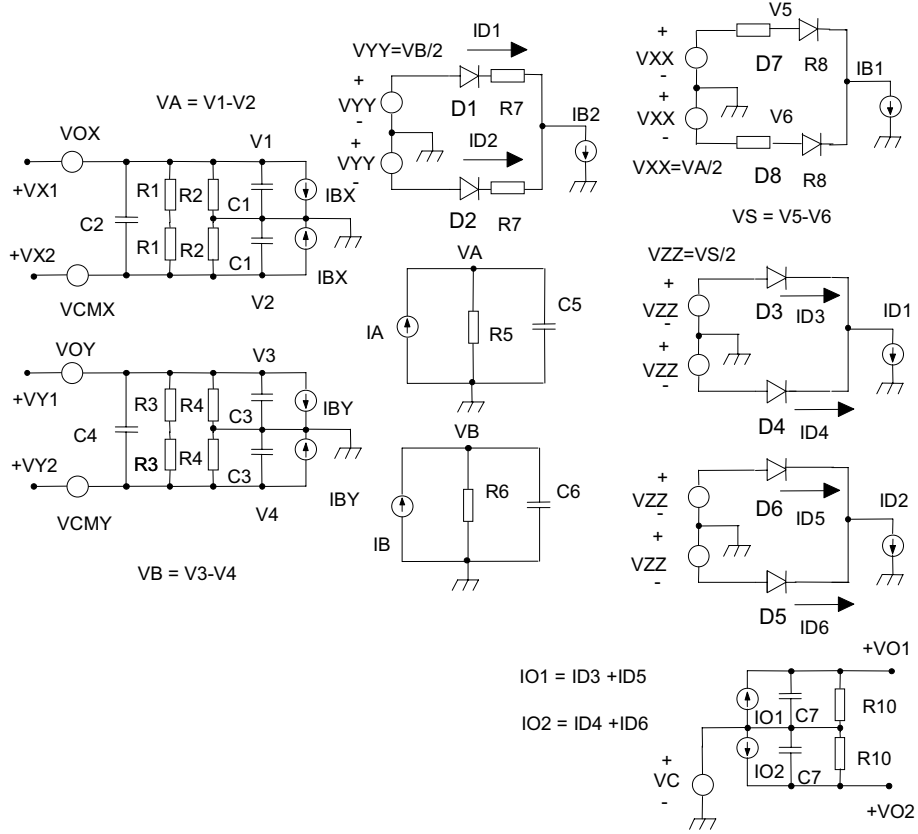
6.6.3. Önerilen Makromodel

Bu çalışmada önerilen analog çarpma devresi makromodeli Şekil-6.27'de görülmektedir. Genel amaçlı olarak hazırlanmış olan bu model bipolar ve MOS tekniğinde gerçekleştirilen tüm yapılar için kullanılabilir.

Şekil-6.27'deki makromodeldeki elemanların modelledikleri ve karşı düştükleri büyüklükler aşağıda belirtilmiştir:

X girişi: R_1 dirençleri X girişi fark işaret giriş direncini, C_2 fark işaret giriş kapasitesini, R_2 X girişi ortak işaret direncini, C_1 ortak işaret giriş kapasitesini, I_{BX} X girişi kutuplama akımını, V_{OX} X girişine ilişkin dengesizlik gerilimini, V_{CMX} ortak işaret davranışını temsil etmektedir.

I_A , R_5 , C_5 hücresi birim kazançlı bir kat oluşturur; bu kat X girişine ilişkin frekans eğrisinin baskın kutbunu belirler. I_A , R_5 and C_5 büyüklükleri



Şekil-6.27. Geliştirilen analog çarpma devresi makromodeli

$$I_A = g_{mx} \cdot (V_1 - V_2) \quad (6.20)$$

$$R_5 = \frac{1}{g_{mx}} \quad (6.21)$$

$$C_5 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{3dBx} \cdot R_5} \quad (6.22)$$

bağıntıları ile verilmektedir.. Burada

$$g_{mx} = \frac{I_X}{V_T} \quad (6.23)$$

oda sıcaklığında $V_T = kT/q = 26mV$ olarak tanımlanmaktadır.

V_{XX} , D_7 , D_8 , R_8 , I_{B1} hücresi T_7 - T_8 çiftine ilişkin lineer olmayan davranış modeller. R_8 direnci geçiş bölgesi genişliğini belirler, $I_{B1} = 2I_X$ bu hücrenin ortak kutuplama akımıdır.

Y girişi: Benzer bir yapı Y girişi için öngörülmüştür. R_3 dirençleri Y girişi fark işaret giriş direncini, C_4 fark işaret giriş kapasitesini, R_4 Y girişi ortak işaret direncini, C_1 ortak işaret giriş kapasitesini, I_{BY} Y girişi kutuplama akımını, V_{OY} Y girişine ilişkin dengesizlik gerilimini, V_{CMY} ortak işaret davranışını modellemektedir.

I_B , R_6 , C_6 , birim kazançlı bir hücredir ve Y girişine ilişkin frekans eğrisinin $f_{3dB Y}$ baskın kutbunu belirler. I_B , R_6 , C_6 büyüklükleri

$$I_B = g_{mY} \cdot (V_3 - V_4) \quad (6.24)$$

$$R_6 = \frac{1}{g_{mY}} \quad (6.25)$$

$$C_6 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{3dB Y} \cdot R_6} \quad (6.26)$$

şeklinde tanımlanırlar, burada

$$g_{mY} = \frac{I_Y}{V_T} \quad (6.27)$$

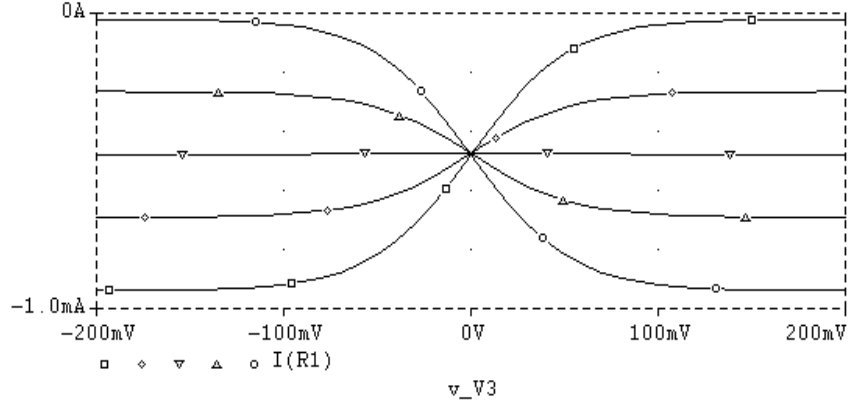
bağıntısıyla verilmektedir.

V_{YY} , D_1 , D_2 , R_7 , I_{B2} hücresi T_1 - T_2 çiftine ilişkin lineer olmayan davranış modeller. R_7 geçiş bölgesi genişliğini belirler, I_{B2} bu hücrenin ortak kutuplama akımıdır.

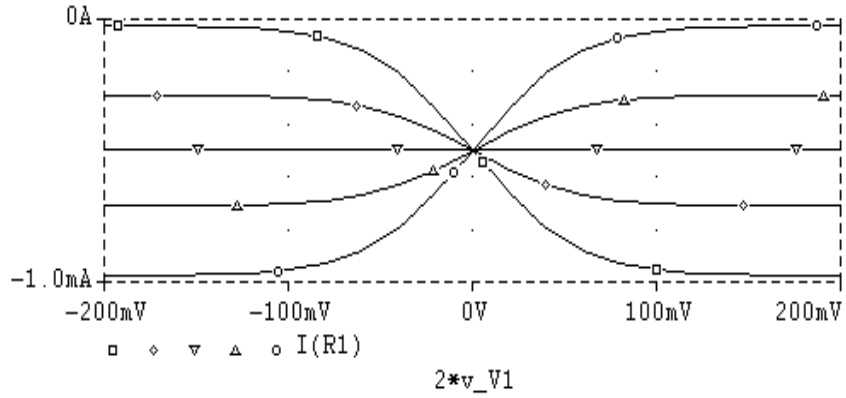
V_{ZZ} , D_3 , D_4 , I_{D1} hücresi T_3 - T_4 çiftine ilişkin lineer olmayan davranış modeller. I_{D1} bu hücrenin ortak kutuplama akımını göstermektedir. V_{ZZ} , D_5 , D_6 , I_{D2} elemanlarından oluşan benzer bir hücre T_5 - T_6 çiftinin lineer olmayan davranışını modeller, I_{D2} akımı bu hücrenin ortak kutuplama akımıdır.

Çıkış hücresi: I_{O1} , I_{O2} , C_7 , R_{10} , V_C hücresi çıkış hücresini oluşturur. I_{O1} ve I_{O2} iki kolun çıkış akımlarıdır. R_{10} dirençleri kol çıkış dirençlerini, C_7 kapasiteleri de kol çıkış kapasitelerini vermektedir. V_C çıkış doğru gerilimi seviyesini modeller.

6.6.4. Simülasyon sonuçları



(a)



(b)

Şekil-6.28. Gilbert hücresi için gerçek devre ve makromodel yardımıyla elde edilen giriş- çıkış karakteristikleri. a) Eleman modeli, b) makromodel.

Geliştirilen analog çarpma devresi makromodeli ile XR2208 (XR2228) tipi bir analog çarpma devresinin (Şekil-6.26) simülasyonları yapılmış ve tipik karakteristikleri çıkartılmıştır. Çarpma devresi XR B101 npn dizi tranzistorları ile kurulmuş ve simülasyonlarda bu tranzistorların parametreleri

6.41

kullanılmıştır. Simülasyonlarda besleme gerilimleri $V_{CC} = 12V$ ve $-V_{EE} = -12V$, kutuplama akımları da $I_X = I_Y = 0.5mA$ olarak alınmıştır.

Şekil-6.28'de $R_X = R_Y = 0$ için gerçek devre (eleman modeli) ve makromodel için elde edilen simülasyon sonuçları görülmektedir. Eğriler çıkartılırken girişlerden birine uygulanan doğru gerilim ($V_{Y1}-V_{Y2}$) parametre olarak alınmış, bu doğru gerilim $-50mV$ ile $+50mV$ değerleri arasında $25mV$ aralıklarla değiştirilmiş, bu girişe uygulanan her gerilim değeri için diğer girişe bir tarama gerilimi uygulanmıştır.

Şekil-6.28'den fark edilebileceği gibi, devre küçük gerilim değerleri için doğrusal özellik göstermekte, büyük gerilim değerlerinde tanh karakteristiği nedeniyle bozulma ortaya çıkmaktadır. Şekil-6.28b'den görülebileceği gibi, makromodelden elde edilen sonuçlar gerçek devre sonuçlarıyla uyumludur.

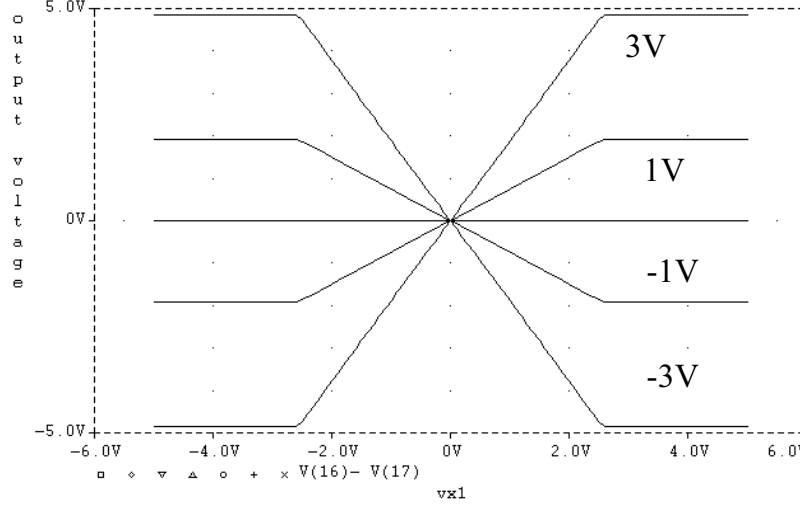
$R_X = R_Y = 10k\Omega$ 'luk dirençlerle lineerleştirilen devre için aynı yoldan hareket edilerek giriş-çıkış karakteristiği çıkartılmış ve Şekil-6.29'da verilmiştir. Fark edilebileceği gibi, lineerleştirme direncinin katılmasıyla giriş geriliminin değişim aralığı $-2.5V$ ile $+2.5V$ sınırlarına yükselmiştir. Bu da gerçek devre üzerinde yapılan ölçümlerden bilinen bir sonuçtur. Şekilden görülebileceği gibi, eleman modeli ile yapılan simülasyonların sonuçları, makromodel kullanılarak yapılan simülasyonların sonuçlarıyla uyumludur.

Lineerleştirilmiş devrede sabit V_Y gerilim değerleri için v_o/v_x geçiş fonksiyonunun frekans cevabı, eleman modeli ve makromodel kullanılarak SPICE simülasyonu ile çıkartılmış, elde edilen sonuçlar Şekil-6.30'da verilmiştir.

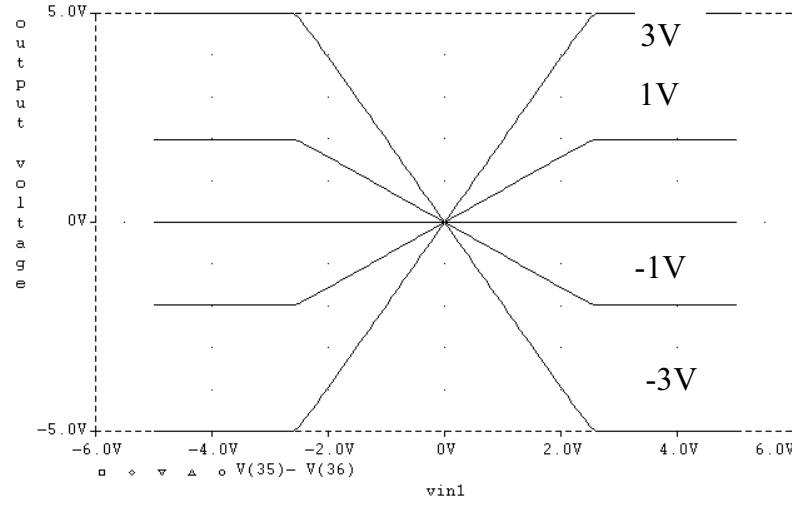
Şekiller çizilirken yatay eksen V_{X1} büyüklüğüne göre ölçeklenmiştir. Gerçek giriş geriliminin ($V_{X1}-V_{X2}$) olduğuna dikkat edilmelidir.

Aynı analog çarpma devresiyle kurulan bir frekans ikileyici devresi için eleman modeli ve makromodel kullanılarak simülasyonla elde edilen dalga şekilleri de Şekil-6.31'de verilmiştir. Girişlere $1V$ genlikli ve $1MHz$ frekanslı sinüs işaretleri uygulanmıştır.

6.42



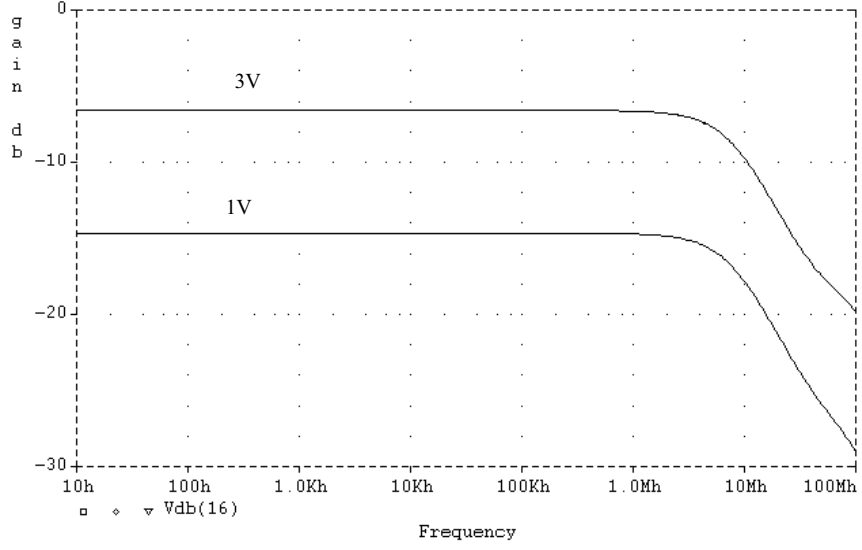
(a)



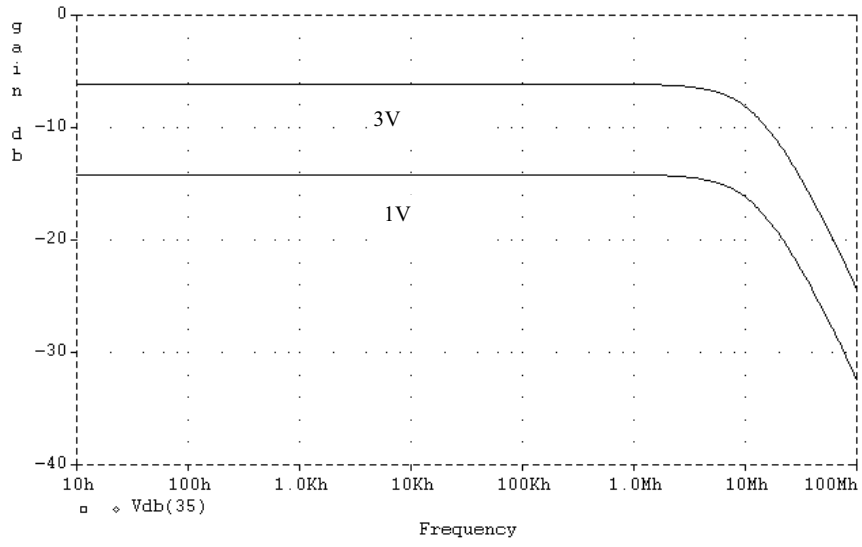
(b)

Şekil-6.29. Lineerleştirilmiş analog çarpma devresi için eleman modeli ve makromodel ile elde edilen giriş- çıkış karakteristikleri. a) eleman modeli b) makromodel

6.43

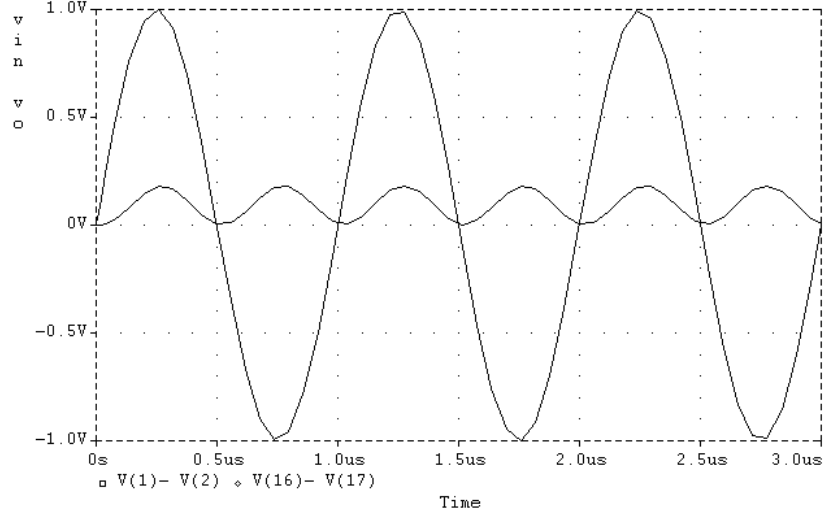


(a)

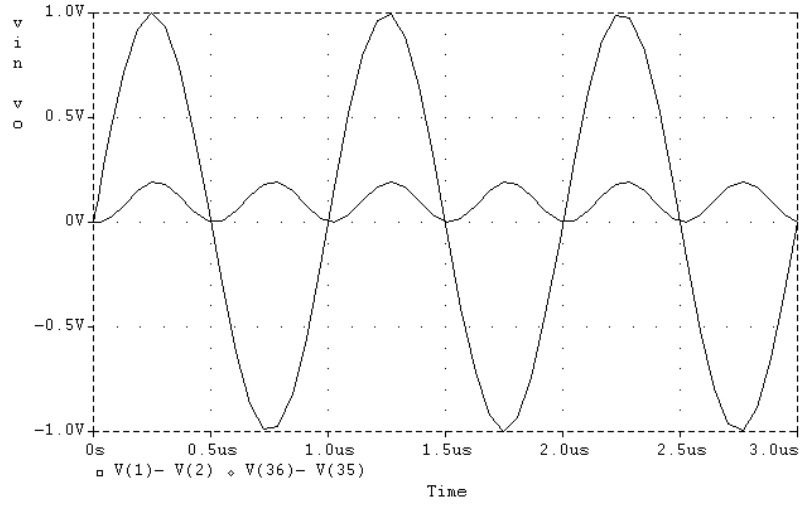


(b)

Şekil-6.30. Lineerleştirilmiş analog çarpma devresi için bir girişe uygulanan farklı doğru gerilim değerleri için makromodel yardımıyla elde edilen frekans eğrileri.



(a)



(b)

Şekil-6.31. Analog çarpma devresiyle kurulan bir frekans ikileyici devresi için simülasyonla elde edilen dalga şekilleri. a) eleman modeli b) makromodel. Girişlere 1V genlikli ve 1MHz frekanslı sinüs işaretleri uygulanmıştır.

Şekil-6.28, 6.29, 6.30 ve 6.31 de verilen sonuçlar, makromodel ve eleman modeli ile elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduklarını ortaya koymaktadır.

Her iki model için gereken simülasyon süreleri, Şekil-6.28, 6.29, 6.30 ve 6.31 için kullanılan test devreleri için karşılaştırılmış, elde edilen sonuçlar Tablo-6.9’da verilmiştir. Elde edilen doğruluğun yüksek olmasına karşılık, makromodel yardımıyla gerçekleştirilen simülasyonlar önemli ölçüde kısalmaktadır.

Tablo-6.9. Simülasyon sürelerinin karşılaştırılması.

Model/Analiz	DC (sn)	AC (sn)	Transient (sn)
Eleman Modeli	45	140	180
Makromodel	33	115	120

6.6.5. Sonuç

Bu çalışmada, analog çarpma devrelerinin simülasyonunda kullanılmak üzere genel bir makromodel önerilmiştir. Önerilen makromodel bipolar ve MOS teknolojisi ile gerçekleştirilen bütün analog çarpma devrelerine uygulanabilir. Şekil-6.26’deki lineerleştirilmiş bipolar analog çarpma devresi örnek olarak alınırsa, bu devre akım kaynağı düzenlerinin dışında 10 tranzistor, dolayısıyla 20 pn jonsiyonu içermektedir. Gerçek devre simülasyonunda her bir jonksiyon için dinamik davranışın (kapasitelerin) da modellendiği dikkate alınırsa, sadece bu devrenin davranışının incelenmesi için SPICE programının bu tranzistorlara ilişkin modellerden kaynaklanan lineer olmayan cebirsel ve lineer olmayan diferensiyel denklemleri çözmesi gerekeceği açıktır. Geliştirilen makromodel, aynı davranışı 8 pn jonksiyonu ve bunlara ek olarak gelen lineer devreler yardımıyla modellemektedir. pn jonksiyonları sadece statik lineer olmayan davranışı modellemekte, bütün dinamik davranış lineer elemanlarla temsil edilmektedir. Bu da simülasyon süresini önemli derecede kısaltmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, önerilen modelin, analog çarpma devrelerinin yaygın

olarak ve çok sayıda kullanıldığı haberleşme sistemlerinin SPICE simülasyonunda önemli derecede yarar sağlayacağı ve simülasyon süresini önemli derecede kısaltacağı söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] A.B. Grebene, Bipolar and MOS analog integrated circuit design, John Wiley, 1984.
- [2] P.R. Gray, R.G. Meyer, Analysis and design of analog integrated circuits, John Wiley, 1993.
- [3] H. Kuntman, Analog tümdevre tasarımı, Sistem yayınları, İstanbul, 1992.
- [4] H. Kuntman, İleri analog tümdevre tasarımı: Analog devreler, (Endüstri Semineri Notu), İTÜ İleri Elektronik Teknolojileri Araştırma Geliştirme Vakfı (ETA), İstanbul, 1994
- [5] H. Kuntman, Analog MOS tümdevre tekniği, İTÜ Kütüphanesi, Sayı:1587, İstanbul, 1997
- [6] G.R. Boyle, B.M. Cohn, D.O. Pederson and J.E.Solomon, macromodeling of integrated circuit operational amplifiers, IEEE, JSSC, 9, 353-363, 1974.
- [7] R.V. Peic, Simple and accurate nonlinear macromodel for operational amplifiers, IEEE, JSSC, 26, 896-899, 1991.
- [8] H. Kuntman, Simple and accurate nonlinear OTA macromodel for simulation of CMOS OTA-C filters, Int. Journal of Electronics, 77, 993-1006, 1994.
- [9] N. Tarım, B. Yenen and H. Kuntman, Simple and accurate nonlinear current conveyor macromodel, Melecon 96, Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference, 447-450, Bari, Italy, May 13-16, 1996.
- [10] N. Tarım, B. Yenen and H. Kuntman, Simple and accurate nonlinear current conveyor macromodel for simulation of active filters using CCII's, Int. Journal of Circuit Theory and Application, 26, 27-38, 1998.
- [11] H. H. Kuntman: Simple and accurate nonlinear analogue multipiler macromodel, Melecon'98: 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, Vol.1, pp 585-589, May 18-20, Tel Aviv, Israel, 1998.
- [12] H. H. Kuntman: Endüstriyel Elektronik, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1998.