

Dağılmış Parametrelili Kuvvetlendiricinin Nonlinear Davranışının Volterra Serileri Yardımıyla İncelenmesi

Metin Yazgı Ali Toker

İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik Anabilim Dalı,
80626, Maslak, İstanbul

e-mail: metin@ehb.itu.edu.tr

e-mail: alitoker@ehb.itu.edu.tr

AnahtarKelimeler: Elektronik, Volterra Serileri, Dağılmış Parametrelili Kuvvetlendirici, Nonlinear Analiz

ABSTRACT

This paper presents a new approach to obtain the Volterra transfer functions of a nonlinear circuit. The approach simplifies nonlinear analysis of the circuits having many nonlinear components. By using the approach, nonlinear analysis of a distributed amplifier(DA) is made and the characteristics of HD2, HD3 and output power at 1-dB compression point are given.

1. Giriş

Düşük düzeyde nonlinear devreler Volterra serileri yardımıyla analiz edilebilir. Literatürde bu yöntemi kullanan çalışmalar verilmiştir [1,2]. Nonlinear kaynaklar yaklaşımı bu yöntemin kullanımını kolaylaştırır. Bussgang bu yaklaşımın temel noktalarını vermiştir [3]. Chua elektrik devrelerinde genel kullanım için bu yaklaşımı geliştirmiştir [4]. Bu yaklaşım sayesinde nonlinear devre analizinde Volterra serilerini kullanmak kolaylaşmıştır. Ayrıca, bu yaklaşım Volterra serilerinin bilgisayar analizlerinde kullanımını da kolaylaştırmaktadır [5]. Bu çalışmada nonlinear kaynaklar yöntemine alternatif olan yeni bir yaklaşım verilmektedir. Bu yeni yaklaşım, temel olarak nonlinear kaynaklar yöntemiyle eşdeğerdir ve uygulama olarak bu yöntemle benzerdir. Fakat yeni yaklaşım özellikle çok sayıda nonlinear eleman içeren devrelerde daha avantajlı olmaktadır. Yeni yaklaşımın kullanılabilmesi için, nonlinear kaynaklar yönteminde olduğu gibi, eleman nonlinearliklerinin kuvvet serileri şeklinde verilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, çok sayıda nonlinear eleman içerdigi dikkate alınarak, dağılmış parametrelili kuvvetlendiricinin (DA) distorsiyon özellikleri üzerinde tranzistor sayısının etkisi yeni yaklaşımla incelenmiştir [6-11]. Elde edilen sonuçlar verilmektedir.

2. Yeni Yaklaşım

Nonlinear devreler Volterra serileri yardımıyla analiz edilebilir. Bu yöntem kullanıldığında devrenin çıkış gerilimi

$$V_0 = H_1(\omega)V_1 + H_2(\omega_1, \omega_2)V_1^2 + H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3)V_1^3 + H_4(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4)V_1^4 + H_5(\omega_1, \dots, \omega_5)V_1^5 + \dots \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Nonlinear kaynaklar yönteminin kullanılması durumunda devrede herbir nonlinear

elemana ek olarak bir nonlinear kaynak yerleştirilir. Daha sonra devrenin bu haliyle matrisel denklem sistemi elde edilir. Bu yapıldıktan sonra nonlinear kaynaklar sıfırlanır ve ilk adımda devrenin lineer transfer fonksiyonları elde edilir. Daha sonra tablo yardımıyla kaynakların ifadeleri belirlenerek matrisel denklem sistemi düzenlenir. Bu şekilde adım adım nonlinear transfer fonksiyonları elde edilir [3-5]. Yeni yaklaşımda devreye fazladan eleman eklemeye gerek yoktur. Nonlinear devrede her bir nonlinear eleman yerine sadece lineer bileşeni bırakılarak devrenin matrisel denklem sistemi

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

şeklinde elde edilir. Burada V vektörü m adet nonlinear elemanların gerilimlerini göstermektedir (Şayet elemanın nonlinearlığı $V=f(I)$ şeklinde ise vektöre 0 elemanın akımı koyulur). V_i ise giriş kaynağını göstermektedir. A matrisi ve B vektörü herhangi bir devre çözüm yöntemi ile elde edilebilir. Bu aşamada önemli olan nokta A matrisinde herhangi bir nonlinear büyüklüğün çarpmaya göre tersinin görülmemesidir.

1. Adım: $V_i = 1$ yapılır. Bu durumda V vektörü $H_1(\omega)$ vektörü yani lineer transfer fonksiyonlarının vektörü olur. Denklem sistemi çözülerek lineer transfer fonksiyonları elde edilir.

$$V_i = 1 \Rightarrow \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{12} \\ \vdots \\ V_{1m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) \\ H_{12}(\omega) \\ \vdots \\ H_{1m}(\omega) \end{bmatrix} \quad (3)$$

2. Adım: $H_1(\omega)$ vektörü yerine $H_2(\omega_1, \omega_2)$ vektörü yani ikinci derece nonlinear transfer fonksiyonları vektörü koyulur. B vektörü yerine, A matrisine bakılarak ilgili tablo yardımıyla, ikinci derece sonuç vektörü, koyulur. Bu aşamada denklem sisteminde ω yerine $\omega_1 + \omega_2$ büyüklüğü koyulur ve çözülerek ikinci derece nonlinear transfer fonksiyonları elde edilir.

3. Adım: $H_2(\omega_1, \omega_2)$ vektörü yerine $H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ vektörü yani üçüncü derece nonlinear transfer fonksiyonları vektörü koyulur. B vektörü yerine, ilgili tablo yardımıyla, üçüncü derece sonuç vektörü koyulur. Bu aşamada ise denklem sisteminde ω yerine $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3$ büyüklüğü koyulur. Ve denklem sistemi çözülerek üçüncü derece nonlinear transfer fonksiyonları elde edilir. Bu şekilde adım adım devam ederek sonuca gidilir.

Tablo-1 Nonlinear transfer fonksiyonları için B vektörlerinin terimleri

n	b_i
2	$A_{i1(N2)} H_{11}(\omega_1) H_{11}(\omega_2) + \dots + A_{im(N2)} H_{1m}(\omega_1) H_{1m}(\omega_2)$
3	$\frac{2}{3} A_{i1(N2)} \overline{H_{11}(\omega_1) H_{21}(\omega_2, \omega_3)} + A_{i1(N3)} H_{11}(\omega_1) H_{11}(\omega_2) H_{11}(\omega_3) + \dots$ $\dots + \frac{2}{3} A_{im(N2)} \overline{H_{1m}(\omega_1) H_{2m}(\omega_2, \omega_3)} + A_{im(N3)} H_{1m}(\omega_1) H_{1m}(\omega_2) H_{1m}(\omega_3)$
4	$\left(\frac{1}{6} A_{i1(N2)} (3 \overline{H_{11}(\omega_1) H_{31}(\omega_2, \omega_3, \omega_4)} + 2 \overline{H_{21}(\omega_1, \omega_2) H_{21}(\omega_3, \omega_4)}) \right.$ $\left. + \frac{1}{2} A_{i1(N3)} \overline{H_{11}(\omega_1) H_{21}(\omega_2) H_{21}(\omega_3, \omega_4)} + A_{i1(N4)} H_{11}(\omega_1) H_{11}(\omega_2) H_{11}(\omega_3) H_{11}(\omega_4) \right) + \dots$
5	$\left(A_{i1(N2)} \left(\frac{1}{5} \overline{H_{21}(\omega_1, \omega_2) H_{31}(\omega_3, \omega_4, \omega_5)} + \frac{2}{3} \overline{H_{11}(\omega_1) H_{41}(\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)} \right) \right.$ $+ A_{i1(N3)} \left(\frac{1}{5} \overline{H_{11}(\omega_1) H_{21}(\omega_2, \omega_3) H_{21}(\omega_4, \omega_5)} + \frac{3}{10} \overline{H_{11}(\omega_1) H_{11}(\omega_2) H_{31}(\omega_3, \omega_4, \omega_5)} \right)$ $+ \frac{2}{5} A_{i1(N4)} \overline{H_{11}(\omega_1) H_{11}(\omega_2) H_{11}(\omega_3) H_{21}(\omega_4, \omega_5)}$ $\left. + A_{i1(N5)} H_{11}(\omega_1) H_{11}(\omega_2) H_{11}(\omega_3) H_{11}(\omega_4) H_{11}(\omega_5) \right) + \dots$

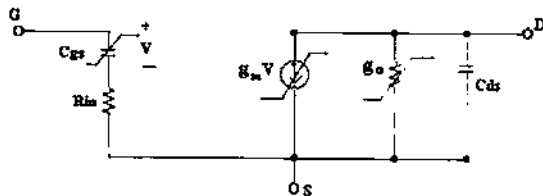
Yeni yaklaşım nonlinear kaynaklar yaklaşımı ile karşılaştırılırsa, nonlinear kaynaklar yaklaşımının kullanılabilmesi için devreye fazladan nonlinear eleman sayısı kadar eleman eklenerek denklem sisteminin kurulduğu görülür. Ayrıca nonlinear kaynaklar yönteminde iki tablo gereklidir. Bunlardan birisi nonlinear direnç (veya iletkenlik) diğeri ise nonlinear kapasite (veya endüktans) içindir. Oysa yeni yaklaşım için sadece bir tablo yeterlidir. Yeni yaklaşım bu açılardan avantajlı olmaktadır. Dezavantajı ise, A matrisinin elemanlarının

$$A_{ij} = A_{ijL} + A_{ijN} \quad (4)$$

şeklinde ayrıştırılması gerekmektedir. Burada bizim için önemli olan A_{ijN} terimidir. Bu terim Tablo-1'in kullanılmasında gerekli olmaktadır. Bu terim A_{ij} 'nin herhangi bir nonlinear eleman büyüklüğüne bağlı kısmını, A_{ijL} ise içermeyen kısmı göstermektedir. İlgili tablo Tablo-1'de verilmektedir.

3. DA'nın Nonlinear Transfer Fonksiyonlarının Elde edilmesi

Yeni yaklaşım kullanılarak dağılmış parameteli kuvvetlendiricinin nonlinear davranışı incelenmiştir. FET'in basitleştirilmiş nonlinear modeli Şekil-1'de verilmektedir [1].

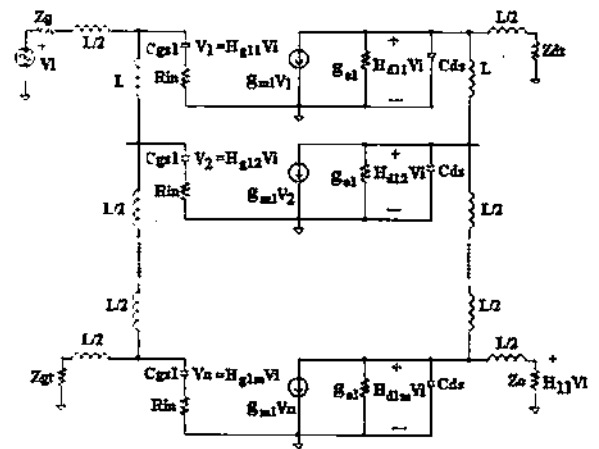


Şekil-1 FET'in basitleştirilmiş nonlinear modeli.

Devredeki elemanların nonlinearlikleri

$$\begin{aligned} g_m &= g_{m1} + g_{m2} V + g_{m3} V^2 + \dots \\ g_o &= g_{o1} - g_{o2} V_{ds} + g_{o3} V_{ds}^2 + \dots \\ C_{gs} &= C_{gs1} + C_{gs2} V + C_{gs3} V^2 + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

şeklinde verilmektedir. Dağılmış parametrelili kuvvetlendirici için bu modelin lineer karşılığı kullanılırsa Şekil-2 elde edilir. Böylece nonlinear davranışın incelenmesine yönelik ilk adım adanmış olur. Devre bu haliyle geribeslemsiz olduğu için giriş ve çıkış hatları için iki ayrı matrisel denklem sistemi elde etmek yapılan işimizi kolaylaştıracaktır.



Şekil-2 Dağılmış parametrelili kuvvetlendiricinin lineer hali.

1. Bölümde anlatılanlar yapılsa matrisel denklem sistemleri elde edilir. Böylece giriş hattı için

$$\begin{bmatrix} a & b & 0 & \dots & 0 \\ c & d & c & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c & d & c & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & c & d & c \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & c & e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{g11} \\ H_{g12} \\ \vdots \\ H_{g1m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

bağıntısı elde edilir. Bu denklem sistemi

$$[A_g(\omega)] [H_g(\omega)] = -[B_g] \quad (7)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada

$$\begin{aligned} a &= 1 + j\omega C_{p1} \left[R_m + Z_g + j\omega L_1 + \frac{R_m(Z_g + j\omega L_1)}{j\omega L_2} \right] + \frac{Z_g + j\omega L_1}{j\omega L_2} \\ b &= -\frac{R_m(Z_g + j\omega L_1)j\omega C_{p1}}{j\omega L_2} - \frac{Z_g + j\omega L_1}{j\omega L_2} \\ c &= -(j\omega C_{p1}R_m + 1) \\ d &= 2(j\omega C_{p1}R_m + 1) + j\omega C_{p1}j\omega L_2 \\ e &= j\omega C_{p1}R_m + 1 + j\omega C_{p1}j\omega L_2 + \frac{j\omega L_2}{Z_g + j\omega L_1} (j\omega C_{p1}R_m + 1) \end{aligned} \quad (8)$$

eşitlikleri geçerlidir. Çıkış hattı için ise

$$\begin{bmatrix} g & h & 0 & \dots & 0 \\ h & k & h & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h & k & h & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & h & k & h \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & h & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{d11} \\ H_{d12} \\ \vdots \\ H_{d1m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p & 0 & \dots & 0 \\ 0 & p & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & p & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{g11} \\ H_{g12} \\ \vdots \\ H_{g1m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

matrisel denklem sistemi elde edilir ve bu denklem sistemi

$$[A_d(\omega)] [H_d(\omega)] + [P] [H_g(\omega)] = -[B_d] \quad (10)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada

$$\begin{aligned} g &= g_{o1} + j\omega C_{d1} + \frac{1}{j\omega L_1 + Z_a} + \frac{1}{j\omega L_2} \\ h &= -\frac{1}{j\omega L_2} \\ k &= g_{o1} + j\omega C_{d1} + \frac{2}{j\omega L_2} \\ l &= g_{o1} + j\omega C_{d1} + \frac{1}{j\omega L_1 + Z_o} + \frac{1}{j\omega L_2} \\ p &= g_m \end{aligned} \quad (11)$$

eşitlikleri geçerlidir. Çıkış hattı için yapılan işlemlerde H_{g11} 'ler bilindiği için ayrı bir vektör olarak denklem sistemine konulmuşlardır, dolayısıyla bu vektör H_{d11} vektörünün çözümünde denklem sisteminin sağ tarafına geçirilir. Bu aşamaya kadar yapılanlarla

dağılmış parametrelili kuvvetlendiricinin lineer analizi yapılabilir ve lineer transfer fonksiyonları elde edilir. Bu aşamadan sonra devrenin nonlineer analizi yapılacaktır. Bunun için, tablo kullanımında gerekli olacaktır. 1. kısımda anlatıldığı şekilde matris elemanlarının ayrıştırılması gerekmektedir. Analizini yaptığımız devrede nonlineer büyüklükler C_{gs} , g_m ve g_a dur. Söz konusu işlem yapılsa

$$\begin{aligned} a_{Ni}(\omega) &= C_{gsi} j\omega \left[R_m + Z_g + j\omega L_1 + \frac{R_m(Z_g + j\omega L_1)}{j\omega L_2} \right] \\ b_{Ni}(\omega) &= -C_{gsi} j\omega \frac{R_m(Z_g + j\omega L_1)}{j\omega L_2} \\ c_{Ni}(\omega) &= -C_{gsi} j\omega R_m \\ d_{Ni}(\omega) &= C_{gsi} (2j\omega R_m + j\omega L_2) \\ e_{Ni}(\omega) &= C_{gsi} j\omega \left[R_m + j\omega L_2 + R_m \frac{j\omega L_2}{Z_g + j\omega L_1} \right] \\ g_{Ni} &= k_{Ni} = l_{Ni} = g_{oi} \quad p_{Ni} = g_{mi} \quad h_{Ni} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

büyüklükleri elde edilir. İlk olarak ikinci derece nonlineer transfer fonksiyonları elde edilir. Bunun için

1-Giriş hattı için kurulan denklem sisteminde H_{g11} vektörü yerine H_{g21} vektörü, çıkış hattı için kurulan matrisel denklem sisteminde H_{d11} vektörü yerine H_{d21} vektörü koyulur.

2-Sonuç vektörleri (B_{g2} ve B_{d2}) Tablo-1 yardımıyla oluşturulur. Çıkış hattı için oluşturulan denklem sisteminde iki ayrı matris olduğundan B_{d2} iki ayrı vektörün toplamı olarak oluşur.

3-Bu aşamada denklem sisteminde ω yerine $\omega_1 + \omega_2$ büyüklüğü koyulur.

$$B_{g2} = \begin{bmatrix} a_{N2}(\omega_1 + \omega_2) H_{g11}(\omega_1) H_{g11}(\omega_2) + b_{N2}(\omega_1 + \omega_2) H_{g12}(\omega_1) H_{g12}(\omega_2) \\ c_{N2}(\omega_1 + \omega_2) \left[H_{g11}(\omega_1) H_{g11}(\omega_2) + H_{g13}(\omega_1) H_{g13}(\omega_2) \right] + d_{N2}(\omega_1 + \omega_2) H_{g12}(\omega_1) H_{g12}(\omega_2) \\ c_{N2}(\omega_1 + \omega_2) \left[H_{g12}(\omega_1) H_{g12}(\omega_2) + H_{g14}(\omega_1) H_{g14}(\omega_2) \right] + d_{N2}(\omega_1 + \omega_2) H_{g13}(\omega_1) H_{g13}(\omega_2) \\ \dots \\ c_{N2}(\omega_1 + \omega_2) H_{g1(m-1)}(\omega_1) H_{g1(m-1)}(\omega_2) + e_{N2}(\omega_1 + \omega_2) H_{g1m}(\omega_1) H_{g1m}(\omega_2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B_{d2} = \begin{bmatrix} g_{o2}H_{d11}(\omega_1)H_{d11}(\omega_2) \\ + g_{m2}H_{r11}(\omega_1)H_{r11}(\omega_2) \\ \\ g_{o2}H_{d12}(\omega_1)H_{d12}(\omega_2) \\ + g_{m2}H_{r12}(\omega_1)H_{r12}(\omega_2) \\ \\ g_{o2}H_{d13}(\omega_1)H_{d13}(\omega_2) \\ + g_{m2}H_{r13}(\omega_1)H_{r13}(\omega_2) \\ \\ g_{o2}H_{d1m}(\omega_1)H_{d1m}(\omega_2) \\ + g_{m2}H_{r1m}(\omega_1)H_{r1m}(\omega_2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Bu aşamada oluşan denklem sistemleri

$$[A_g(\omega_1 + \omega_2)] [H_{g2}(\omega_1 + \omega_2)] = -[B_{g2}] \quad (15)$$

$$[A_d(\omega_1 + \omega_2)] [H_{d2}(\omega_1 + \omega_2)] = -[P] [H_{g2}(\omega_1 + \omega_2)] - [B_{d2}] \quad (16)$$

şeklinde gösterilebilir. Bu denklemler çözülerek 2. derece nonlineer transfer fonksiyonları elde edilir. Daha yüksek dereceli nonlineer transfer fonksiyonları aynı yol izlenerek elde edilir. Bu çalışmada 3.dereceye kadar olan nonlineer transfer fonksiyonları gözönüne alınmıştır.

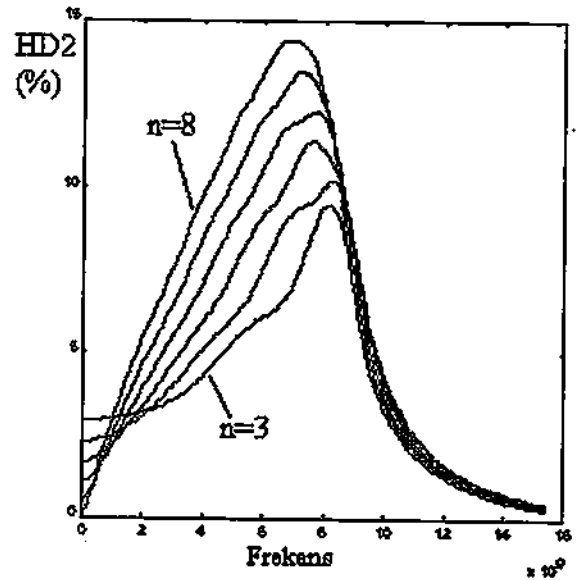
4. DA'nın Nonlineer Davranış

Dağılmış parametrelili kuvvetlendiricinin 2. ve 3. derece harmonik distorsiyon değerlerinin ve 1-dB bastırılma noktasındaki çıkış gücünün transistör sayısı ile değişimi incelendi. Bu amaçla literatürden seçilen bir transistör kullanıldı [12]. Transistörün eleman değerleri Tablo-2'de verilmektedir.

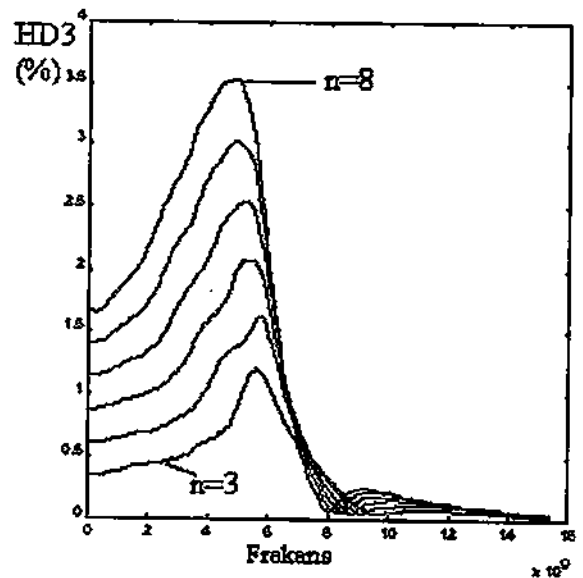
Tablo-2 Transistörün eleman Değerleri

C_{gs1}	0.35pF
C_{gs2}	0.06p
C_{gs3}	0
C_{ds}	0.35pF
L	0.875nH
R_{in}	6
g_{o1}	6.5mS
g_{o2}	-0.33m
g_{o3}	0.086m
g_{m1}	70mS
g_{m2}	12.45m
g_{m3}	0.863m

Bu transistör üzerinde elde edilen karakteristikler Şekil-3,4 ve 5'te görülmektedir. Karakteristikler incelendiğinde şu sonuçları elde etmekteyiz; Transistör sayısında oluşan değişim direkt olarak HD değerini etkilemektedir, Şekil-3 ve 4. Özellikle yüksek frekanslarda bu etki daha net olarak görülmektedir. Ayrıca yüksek frekanslarda harmonik distorsiyon çok artmaktadır. Bunun sebebi C_{gs} kapasitesinin nonlineerliğidir. Alçak frekanslarda HD2 için farklı bir görüntü vardır. Distorsiyon transistör sayısı arttıkça azalmaktadır. Bu durum genel bir durum değildir. Bazı transistörlerde gözlenmektedir. Bu bölgede C_{gs} kapasitesinin nonlineerliği etkili değildir. Bu durum g_m ve g_o elemanlarının nonlineerliklerinden kaynaklanmaktadır.

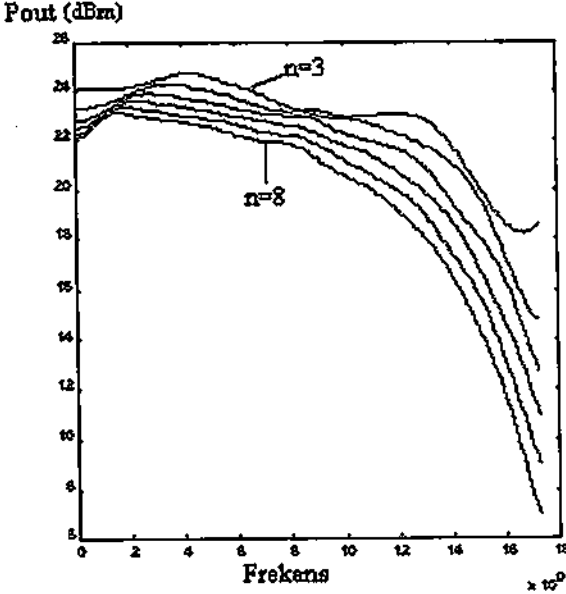


Şekil-3 Transistör sayısına göre HD2 değişimi



Şekil-4 Transistör sayısına göre HD3 değişimi

1-dB bastırılma noktasındaki çıkış gücü tranzistor sayısı arttıkça azda olsa azalmaktadır. Şekil-5. Azalmanın büyüklüğü tranzistordan tranzistora değişmektedir. Diğer yandan yüksek frekanslarda fazla tranzistorlu dağılmış parametrelili kuvvetlendiricilerde oluşan erken güç azalması band genişliği ile ilgili bir problemdir. Bilindiği gibi, tranzistor sayısı arttıkça kazanç-band genişliği düşmektedir.



Şekil-5 Tranzistor sayısına göre 1-dB bastırılma noktasındaki çıkış gücünün değişimi

5.Sonuç

Bu çalışmada Volterra serileri yöntemiyle nonlinear devre analizinin yapılmasını kolaylaştıran ve nonlinear kaynaklar yöntemine alternatif olan bir yöntem tanıtılmıştır. Bu yöntem özellikle çok sayıda nonlinear eleman içeren devrelerde daha avantajlı olmaktadır. Bu yöntem kullanılarak dağılmış parametrelili kuvvetlendiricilerde tranzistor sayısının nonlinear davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak tranzistor sayısındaki artışın harmonik distorsiyonu arttırdığı, çıkış gücünün 1-dB bastırılma noktası üzerinde ise azaltıcı yönde etkiye sahip olduğu gösterilmiştir.

Referanslar

- [1] R. A. Minasian, Intermodulation Distortion Analysis of MESFET Amplifiers Using the Volterra Series Representation, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-28, No. 1, January 1980
- [2] C. L. Law, C. S. Aitchison, Prediction of Wide-Band Power Performance of MESFET Distributed Amplifiers Using the Volterra Series Representation, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-34, No. 12, December 1986
- [3] J. J. Busgang, L. Ehrman, J. W. Graham, Analysis of nonlinear systems with multiple inputs. *Proc. IEEE*, 62, pp. 1088-1119, 1974
- [4] L. O. Chua, C. Y. Ng, Frequency-domain analysis of nonlinear systems: formulation of transfer functions, *Electronic Circuits and Systems*, Vol. 3, No. 6, Nov. 1979
- [5] P. Wambacq, W. Sansen, Distortion Analysis of Analog Integrated Circuits, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998
- [6] E. L. Ginzton, W. R. Hewlett, J. H. Jasberg and J. D. Noe, "Distributed Amplification", *Proc. IRE*, Vol. 36, pp. 956-969, Aug. 1948
- [7] D. Leblebici, Geciktirici Eleman Olarak Tranzistor Kullanan Dağılmış Sabiteli Amplifikatör, PhD. Thesis, Electrical Faculty, İ.T.Ü., 1966
- [8] J. B. Beyer, S. N. Prasad and R. C. Becker, MESFET distributed amplifier guidelines, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp. 268-275, Mar. 1984
- [9] A. Toker, Bipolar Tranzistorlu Dağılmış Parametrelili Kuvvetlendiricilerde Yeni Olanaklar, PhD. Thesis, Institute of Science and Technology, İ.T.Ü., 1986
- [10] T. T. Y. Wong, *Fundamentals of Distributed Amplifiers*, Artech House, Boston, 1993
- [11] M. Yazgı, A. Toker, D. Leblebici, On Distributed Amplifiers with Bandpass Filter Structure, *Proceedings of ELECO'99, International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Turkey, December 1999, pp. 128-131
- [12] J. C. Pedro, Evaluation of MESFET Nonlinear Intermodulation Distortion Reduction by Channel Doping Control, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 45, No. 11, November 1997