

INDUCTOR SIMULATION WITH OPERATIONAL DEVICES

Abdullah FERİKOĞLU*

Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Bölümü,
54187, Esentepe, Adapazarı, TÜRKİYE, e-mail:Af@sakarya.edu.tr

Taner TOPAL

Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Bölümü,
06500, Teknikokullar, Ankara, TÜRKİYE

ABSTRACT

In this study, inductor simulation by using operational devices, Opamp, OTA, and CC, is investigated. After covering main inductor simulation circuits, they are all tested in a passive band-pass filter with a center frequency of 1MHz using PSpice software. The filter characteristics thus obtained are compared to that of the original passive filter. As a result, the active filters tested are shown to be equivalents of the passive one with some performance differences.

Key Words: Inductor simulation, Opamp, OTA, CC, GIC, Operational devices

İŞLEMSEL DEVRE ELEMANLARI İLE ENDÜKTANS SİMÜLASYONU

ÖZET

Bu çalışmada işlemsel devre elemanları kullanarak endüktans simülasyonu üzerinde durulmuştur. Opamp, OTA ve CC kullanan endüktans simülasyon devreleri verildikten sonra, bu devreler kullanılarak pasif bir bant-geçiren filtrenin L elemanının $f_0=1\text{MHz}$ için PSPICE yazılımı ile simülasyonu yapılmıştır. Elde edilen filtre karakteristikleri orijinal RLC devresininkiyle karşılaştırılarak ele alınan devrelerin endüktans simülasyonunda başarıyla kullanılabileceği gösterilmiştir.

Key Words: Endüktör simülasyonu, Opamp,OTA, CC, GIC.

1. GİRİŞ

Endüktans elemanının boyut, maliyet vb. sebeplerle entegre devrelerle birlikte çok kullanılmadığı bilinmektedir. Bu durum evvelce geliştirilmiş ve davranışı bilinen bir çok devrenin kullanımı için bir kısıtlama oluşturmaktadır. Bununla birlikte, OPAMP, OTA vb. işlemsel elemanlar ve RC elemanları kullanarak endüktans elemanı gibi davranan iki-uçlular yapılabilmektedir. (1-3) Günümüze kadar kullanılagelmiş, yapısında endüktans bulunduran devrelerin çokluğu ve işlemsel elemanların imalatındaki hızlı gelişmeler endüktans simülasyonun önemini artıran etkenler olmuştur (3,4). Birinci bölümde, endüktans simülasyonunun önemine değinilmiştir. İkinci bölümde, endüktans simülasyon devrelerine yer verilmiş, üçüncü bölümde bu alt-devreler bir örnek devreye uygulanmış, dördüncü bölümde ise üçüncü bölümde elde edilen devreler PSPICE yazılımında çalıştırılarak sonuçlar karşılaştırmalı biçimde verilmiştir.

1. INTRODUCTION

It is well known that inductors are incompatible with integrated circuits because of their size, cost, etc. This causes a constraint for the use of many inductor circuits whose behaviours are well known. However, with the recent developments, their behavioral equivalents are possible by using operational devices, such as Opamp, OTA, and CC in the simulation Networks. The multitude of the networks used to date and the rapid developments in the semiconductor technology have encouraged works related to inductor simulation. In Chapter 2, main inductor simulation techniques are treated. In Chapter 3, the techniques are applied to an exemplary network. The results of the PSpice run of the Chapter 3 networks are provided in the last Chapter comparatively.

2. ENDÜKTANS SİMÜLYASYONU

Endüktans simülasyon devreleri, kısaca, aktif elemanların yanısıra direnç ve kapasite elemanlarından oluşmaktadır.(1,2)

2.1. İşlemsel Kuvvetlendirici Kullanarak Endüktans Simülasyonu

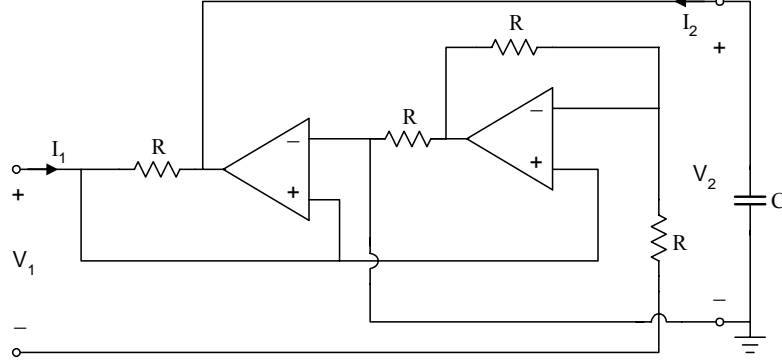


Figure 1. An Opamp-RC inductor simulation circuit
Şekil 1. Opamp-RC endüktans simülasyon devresi

Şek. 1'deki devrede,

$$V_1 = RI_2 \quad [1]$$

$$V_2 = -RI_1 \quad [2]$$

eşitlikleri iki-kapılımin bir jirator olarak davrandığını göstermektedir.(5,6) Böylece, çıkış uçları arasında bağlanan C kapasitesi, girişten

$$L = r^2 C \quad (r = R) \quad [3]$$

değerinde bir endüktans (topraklı !) olarak görünmektedir.

2.2. İşlemsel Geçişiletkenliği Kuvvetlendirici (OTA) Kullanarak Endüktans Simülasyonu

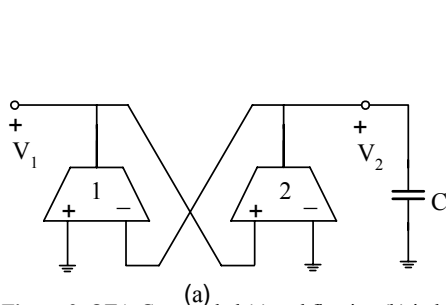


Figure 2. OTA-C grounded (a) and floating (b) inductor simulation circuits
Şekil 2. OTA-C endüktans simülasyon devreleri

Bir OTA iki giriş ucu, bir çıkış ucu ve ortak ucuyla bir 4-uçlu olarak modellendiğinde, çıkış akımı giriş gerilimleri arasındaki farkla kontrol edilmektedir. Dolayısıyla OTA'nın g_m parametresi (1/ohm) boyutunda olup geçiş iletkenliği olarak adlandırılmaktadır.

2. INDUCTOR SIMULATION

Inductor simulation circuits comprise basically active components besides resistors and capacitors. In the following main inductor simulation methods and circuits are surveyed.

2.1. Inductor Simulation with Opamps

An inductor simulation circuit using Opamps as active components is shown below:

In the fig. 1 circuit, equations

$$V_1 = RI_2 \quad [1]$$

and,

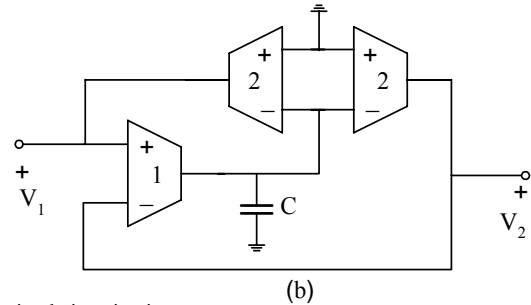
$$V_2 = -RI_1 \quad [2]$$

show that the two-port connected to the capacitor behaves as a gyrator. Thus, the capacitor at the output is seen as an inductor (grounded!) across input terminals:

$$L = r^2 C \quad (r = R) \quad [3]$$

2.2. Inductor Simulation with OTA's

Inductor simulation circuits using OTA's are provided in fig. 2.



An OTA can be modelled as a 4-terminal device; two input terminals, one output terminal and a common. The output current is controlled by the difference between voltages at the inputs, therefore its parameter g_m has the dimension of (1/ohm) and is named as transconductance. In

Şek. 2a devresinde iki OTA bir jirator elemanı oluşturmakta, dolayısıyla çıkış ucuna bağlanan kapasite elemanı girişten

$$L = \frac{C}{g_{m1}g_{m2}} \quad [4]$$

değerinde bir endüktans (topraklı !) olarak görünmektedir.

Şek. 2b devresinde ise

$$L = \frac{C}{g_{m1}g_{m2}} \quad [5]$$

değerinde bir endüktans (topraksız !) gerçekleştirilmiştir.

2.3. Akım Taşıyıcı (CC) Kullanarak Endüktans Simülasyonu

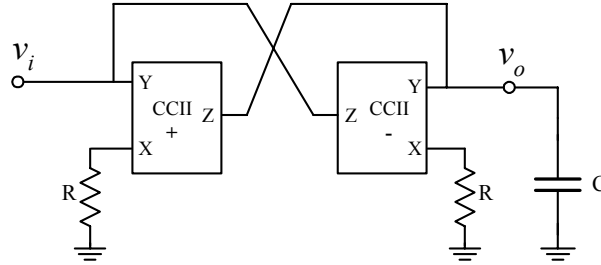


Figure 3. An CC-C inductor simulation circuit
Şekil 3. Bir CC-C endüktans simülasyon devresi

Bir CCII iki giriş ucu, bir çıkış ucu ve ortak ucuyla birlikte bir 4-üçlü olarak modellenebilmektedir. Y giriş ucuna ilişkin akım sıfırdır; Y ucu ile X ucu eşit gerilimdedir ve çıkış akımı X ucuna ilişkin akımla kontrol edilmektedir. Akım kazancı ise (+1) veya (-1) değerindedir.

Şek. 3 devresinde de iki CC elemanı bir jirator oluşturmakta ve böylece çıkış uçları arasında bağlanan bir C elemanı girişten

$$L = R^2C \quad [6]$$

değerinde bir endüktans (topraklı !) olarak görünmektedir (3).

2.4. Empedans Ölçekleme (Bruton Dönüşümü)

Empedans ölçekleme ile dolaylı olarak endüktans simülasyonu mümkündür. Bir iki-kapılıya ilişkin $H(s)$ transfer fonksiyonunun empedans ölçeklemesinden etkilenmediği bilinmektedir. Eğer

devreye $\frac{1}{kS}$, k bir sabit olmak üzere, ölçeklemesi uygulanırsa,

$$\hat{Z}_R = \frac{R}{kS} \quad [7]$$

$$\hat{C} = \frac{k}{R} \quad [8]$$

dirençler kapasitelere dönüşür;

fig.2a circuit, two OTA's realise a gyrator, with a grounded inductor in the value of,

$$L = \frac{C}{g_{m1}g_{m2}} \quad [4]$$

seen across the input. On the other hand, fig. 2b circuit realises a floating inductor in the value of,

$$L = \frac{C}{g_{m1}g_{m2}} \quad [5]$$

2c. Inductor Simulation with CC's

Current conveyors, together with a capacitor, can also be used for simulating inductors:

A CCII can also be modelled as a 4-terminal device; the current at Y is zero, voltage difference between Y and X terminals is zero and the output current is equal to the X terminal current, with or without a phase inversion, depending upon the design. In fig. 3 circuit, two CC's and resistors also, realise a gyrator, with a simulated inductor (grounded) of

$$L = R^2C \quad [6]$$

seen at the input.

2.4. Impedance Scaling (Bruton Transformation)

It is a well known fact that applying impedance scaling to a passive two-port doesn't influence the transfer function $H(s)$. Thus, under

such a scaling of $\frac{1}{kS}$, resistors convert into capacitors:

$$\hat{Z}_R = \frac{R}{kS} \quad [7]$$

$$\hat{C} = \frac{k}{R} \quad [8]$$

inductors into resistors:

$$\hat{Z}_L = \frac{L}{k} \quad [9] \quad \hat{Z}_L = \frac{L}{k} \quad [9]$$

$$\hat{R} = \frac{L}{k} \quad [10] \quad \hat{R} = \frac{L}{k} \quad [10]$$

endüktanslar dirençlere dönüşür;

$$\hat{Z}_C = \frac{1}{s^2 Ck} \quad [11] \quad \hat{Z}_C = \frac{1}{s^2 Ck} \quad [11]$$

$$\hat{D} = Ck \quad [12] \quad \hat{D} = Ck \quad [12]$$

Kapasiteler FDNR (frekansa bağlı negatif direnç) elemanlarına dönüşür (7).

and capacitors into FDNR's (frequency dependent negative resistors):

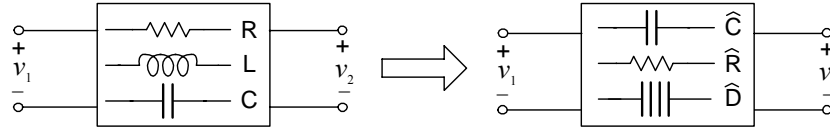


Figure 4. Applying impedance scaling of $(\frac{1}{ks})$ to a two-port.

Şekil 4. Bir iki-kapılıya $(\frac{1}{ks})$ empedans ölçekleme uygulanması

Şek. 4'de görüldüğü gibi Bruton dönüşümü sonunda ortaya çıkan FDNR elemanı Şek. 5'de verilen genel empedans dönüştürücüsü (GIC) ile gerçekleştirilebilir (4,8,9).

The FDNR device resulting under the above transformation is realisable with general impedance converters (GIC) [1].

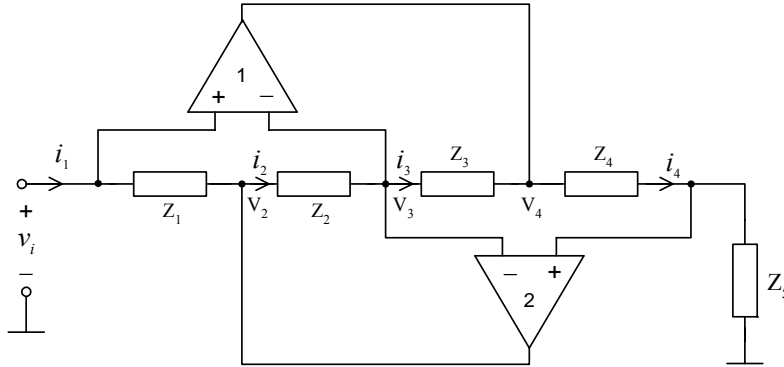


Figure 5. A GIC using Opamps and impedances

Şekil 5. Genel empedans – admitans (emitans) çevirici (GIC)

Şek. 5 devresinde

$$Z_{in}(s) = \frac{Z_1(s)Z_3(s)Z_5(s)}{Z_2(s)Z_4(s)} \quad [13]$$

ve

$$\frac{I_4(s)}{I_i(s)} = \frac{Z_1(s)Z_3(s)}{Z_2(s)Z_4(s)} \quad [12]$$

dir. Eğer, $Z_1 = Z_2 = Z_3 = R$ ve $Z_4 = \frac{1}{sC_4}$ seçilirse,

çıkışa bağlanan bir R_5 direnci girişten R^2C_4 değerinde bir endüktans olarak görünür (endüktans

From the straightforward analysis, the following are valid for the fig. 5 circuit:

$$Z_{in}(s) = \frac{Z_1(s)Z_3(s)Z_5(s)}{Z_2(s)Z_4(s)} \quad [13]$$

and,

$$\frac{I_4(s)}{I_i(s)} = \frac{Z_1(s)Z_3(s)}{Z_2(s)Z_4(s)} \quad [12]$$

If $Z_1 = Z_2 = Z_3 = R$ and $Z_4 = \frac{1}{sC_4}$ then, a resistor

simülasyonu) ; $Z_2 = Z_3 = Z_4 = R$ ve $Z_1 = \frac{1}{sC_1}$

seçilirse, çıkışa bağlanan bir C_5 kapasitesi girişten RC_1C_5 değerinde bir FDNR olarak görünür. Ancak, burada gerçekleştirilen elemanların topraklı olduğuna dikkat edilmelidir.(7,10)

2.5. Gorski-Popiel Tekniği

Gorski-Popiel tekniği ile endüktans alt-devreleri direnç alt-devrelerine dönüştürülmektedir. Bu teknikte kullanılan GIC'lerin sayısı endüktans alt-devrelerin dış bağlantılarının sayısına eşit olmaktadır (11,12).

R_5 is seen as an inductor of R^2C_4 at the input (inductance simulation) ; if $Z_2 = Z_3 = Z_4 = R$ and

$Z_1 = \frac{1}{sC_1}$ then, a capacitor C_5 is seen as an

FDNR at the input.

2.5.Gorski-Popiel Technique

With the so called Gorski-Popiel technique, inductor subcircuits in a passive network convert into inductor subcircuits, the number of GIC's used being equal to the number of terminals with which external connections are made [1].

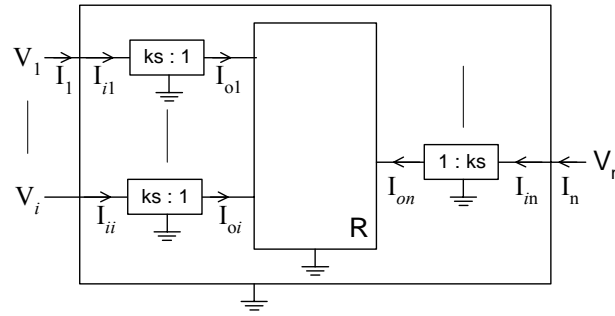


Figure 6. Inductive circuit simulation with the Gorski-Popiel technique

Şekil 6. Gorski-Popiel tekniği ile endüktif devre simülasyonu

Şek. 6'da R ile gösterilen blok dirençlerden oluşan bir devredir. Küçük bloklar ise empedans ölçekleme devrelerini göstermektedir.

Bu yöntem Şek. 7'de bazı alt-devrelere uygulanmıştır.

In fig. 6 the block R denotes a resistive circuit, and smaller blocks represent impedance scalars. In fig. 7, some common inductor subcircuits and their corresponding resistor equivalents are provided.

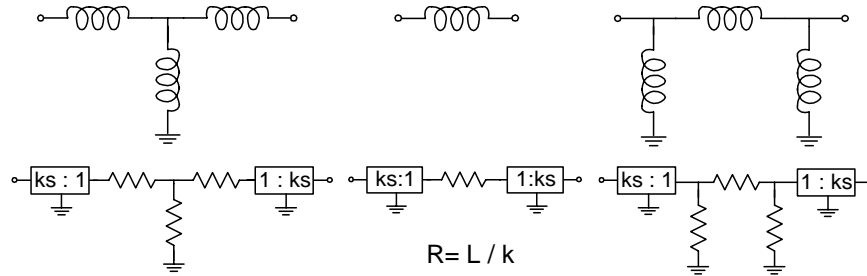


Figure 7. Illustration of the Gorski-Popiel technique

Şekil 7. Bazı endüktif alt-devreler için Gorski-Popiel dönüşümünün gösterilmesi

3. UYGULAMA

İkinci bölümde değinilen endüktans simülasyon yöntemlerinin bazıları Şek. 8'deki RLC devresine uygulanmıştır (12,13).

3. APPLICATION

In this Chapter, some methods studied in Chapter 2 are applied to an RLC network of fig.8.

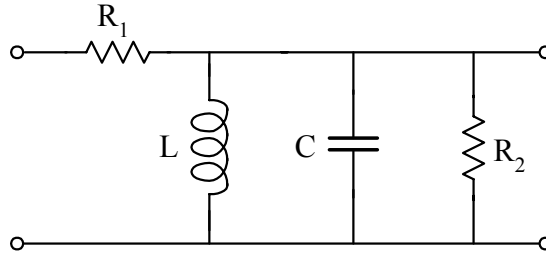


Figure 8. A passive band-pass filter
Şekil 8. Bir RLC bant-geçiren filtre devresi

Elde edilen devreler Şek. 9 – 11’de verilmiştir.

The equivalent active Networks obtained are given in fig. 9 – 11.

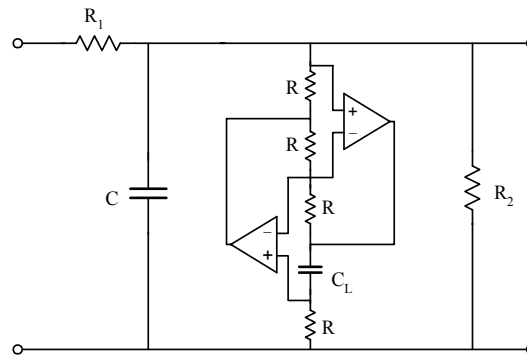


Figure 9. An equivalent of the RLC network of fig.8, with a GIC replacement for the inductor.
Şekil 9. Şek. 8’deki filtre devresinin endüktans yerine GIC simülasyonu kullanan eşdeğeri

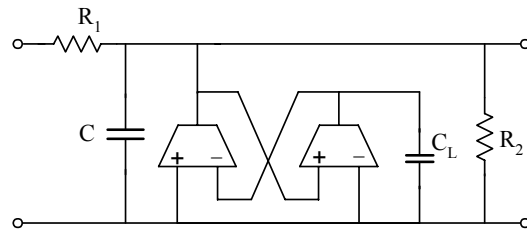


Figure 10. An equivalent of the RLC network of fig.8, with OTA-C subcircuit in the place of the inductor
Şekil 10. Şek. 8’deki filtre devresinin endüktans yerine OTA-C simülasyonu kullanan eşdeğeri

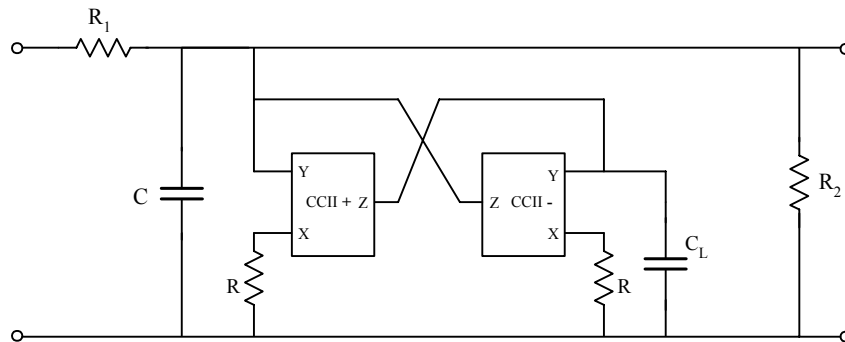


Figure 11. An equivalent of the RLC network of fig.8, with CCII-C subcircuit in the place of the inductor
Şekil 11. Şek. 8’deki filtre devresinin endüktans yerine CC-C simülasyonu kullanan eşdeğeri

4. SONUÇLAR

Bölüm 3'deki endüktans simülasyon devreleri $f_0=1\text{MHz}$ için PSPICE yazılımıyla analiz edilmiştir.(13) Analiz çıktıları Şek. 12 – 14'de orijinal RLC devresi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

4. RESULTS

In this Chapter, the simulation networks of Chapter 3 are run on PSpice, for $f_0=1\text{MHz}$. The outputs are given in fig. 12–14, in comparison to the passive RLC network.

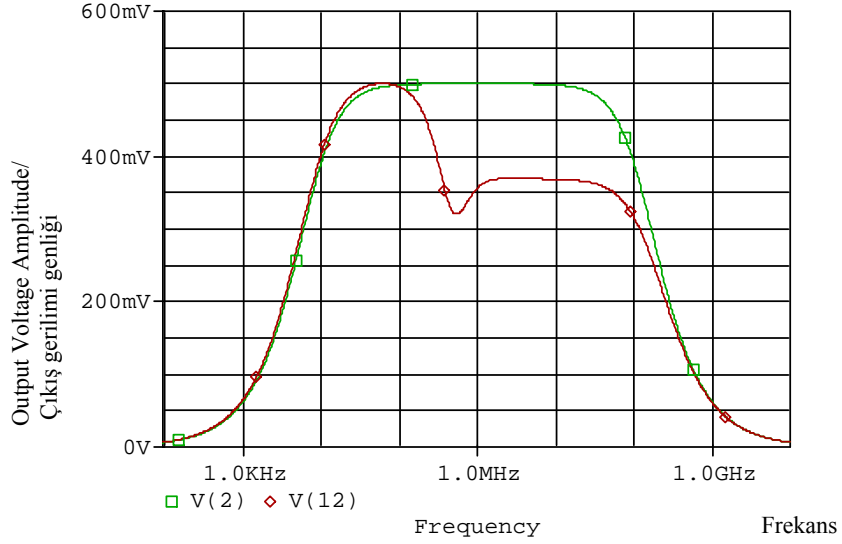


Figure 12. Voltage gain characteristics of fig.8 [v(2)] and fig.9 [v(12)] networks, with an UA741 Opamp model used
Şekil 12. Şek. 8 ve Şek. 9 devrelerinin $f_0=1\text{MHz}$ için transfer kazanç eğrileri (simülasyonda UA741 modeli kullanılmıştır. V(2) RLC devresine, V(12) simülasyon devresine ait eğrilerdir.)

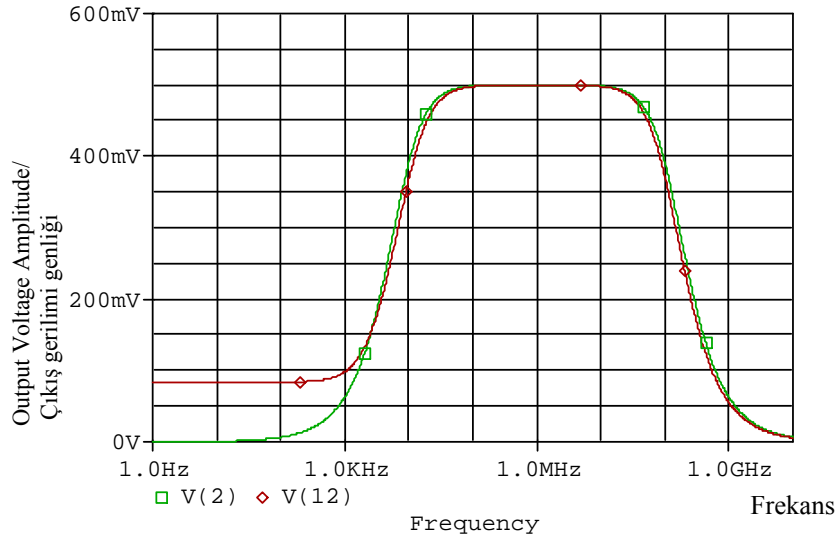


Figure 13. Voltage gain characteristics of the fig. 8 [v(2)] and fig.10 [v(12)] networks, with CA3080 OTA model used
Şekil 13. Şek. 8 ve Şek. 10 devrelerinin $f_0=1\text{MHz}$ için transfer kazanç eğrileri (simülasyonda CA3080 modeli kullanılmıştır. V(2) RLC devresine, V(12) simülasyon devresine ait eğrilerdir.)

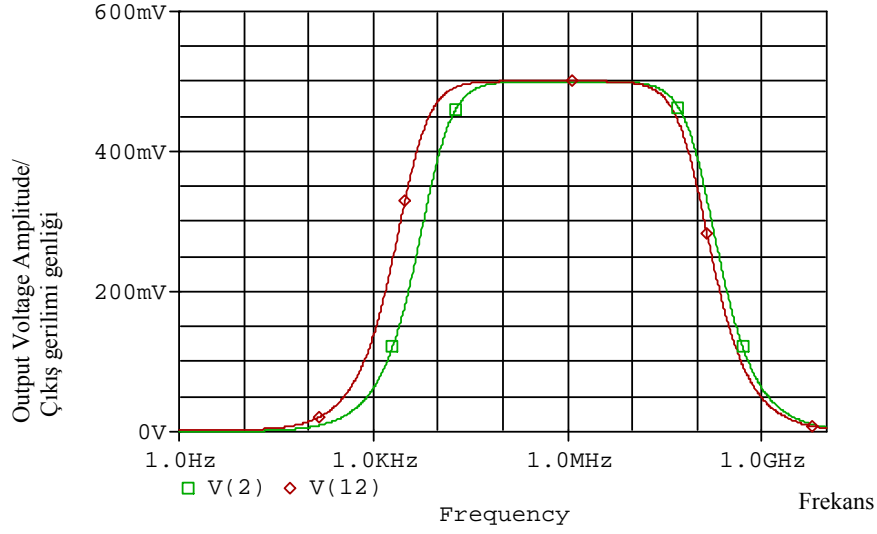


Figure 14. Voltage gain characteristics of the fig. 8 [v(2)] and fig.11 [v(12)] networks, with AD844 CC model used
Şekil 14. Şek. 8 ve Şek. 11 devrelerinin $f_0=1\text{MHz}$ için transfer kazanç eğrileri (simülasyonda AD844 modeli kullanılmıştır. V(2) RLC devresine, V(12) simülasyon devresine ait eğrilerdir.)

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde Opamp, OTA ve CC ile endüktans simülasyonu yapılabileceği görülmüştür. Şek. 12'de kazanç eğrisindeki azalma seçilen opamp modelinin OTA ve CC'ye göre kazanç-band genişliği çarpımının daha düşük olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

The results of the PSpice run reveals that circuits of fig. 9-11 are all applicable for inductor simulation up to at least 1 Mhz. The slight falldown of gain of on the fig.11 plot is an indication of the smaller gain-bandwidth product of thr Opamp model used compared to the OTA and CC models.

KAYNAKLAR/ REFERENCES

- Orchard, H. J., "Inductorless filters", *Electron. Lett.*, 2: 224 (1966).
- Riordan, R. H. S., "Simulated inductors using differential amplifiers", *Electron. Lett.*, 3: 50-51 (1967).
- Sedra, A., Smith, K., "A second generation current conveyor and its application", *IEEE Trans. Circuit Theory*, 17: 132-134 (1970)
- Bruton, L. T., "Topological equivalence of inductorless ladder structures", *IEEE Trans. Circuit Theory*, CT-20: 434-437 (1973).
- Antoniou, A., "Realization of gyrators using operational amplifier and their use in RC active network synthesis", *IEEE Proc.*, 16:1838-1850 (1969).
- Antoniou, A., "Gyrator using operational amplifier", *Electron Lett.*, 3: 350-352 (1967).
- Bruton, L. T., "Network transfer functions using the concept of frequency dependent negative resistance", *IEEE Trans.*, CT-16 (3): 406-408 (1969).
- Bruton, L. T., "NonIdeal performance of two amplifier positive impedance converters", *IEEE Trans. Circuit Theory*, CT-17: 541-549 (1970).
- Schaumann, R., Ghausi, M. S., Laker, K. R., *Design of Analog Filters: Passive, Active RC and Switched Capacitor*, *Prentice-Hall*, New Jersey (1990).
- Ishibashi, Y., Tsuduki, K., "Synthesis and RC-active simulation of an LR terminated LC filter", *IEE Proc.-Circuits Devices Syst.*, 142 (1): 49-52 (1995).

11. Gorski-Popiel, J., "RC-active synthesis using PIC", *Electron. Lett.*, 3: 381-382 (1967).
12. Topal, T., "İşlemsel devre elemanları ve tasarım uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya (2003).
13. Tuinenga, P. W., "SPICE: A guide to circuit simulation and analysis using Pspice", *Prentice-Hall*, New Jersey (1992).

Received/ Geliş Tarihi: 06.11.2003 Accepted/Kabul Tarihi: 04.08.2004