

ELEKTRONİK DEVRELERE NULLATOR-NORATOR VE NULLOR MODELİNİN UYGULANMASI

Mustafa ALÇI, Esmâ UZUNHİSARCIKLİ

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri
Erciyes Üniversitesi, Kayseri Meslek Yüksek Okulu, Elektronik Programı, Kayseri

ÖZET

Bu çalışmanın amacı; aktif elektronik devre elemanları için geliştirilen nullor modelinin tanıtılmasıdır. Bu sebeple, transistör, ideal ve ideal olmayan işlemsel kuvvetlendirici (op-amp) gibi bazı elektronik devre elemanlarının nullor modelleri ve bu modelin negatif empedans çeviricisi, gyrator, çeşitli kontrollü kaynaklar ve aktif RC devre sentezindeki kullanımları verilmiştir. Bu konulara değinilirken, nullor'un tercih edilme sebepleri ve sağladığı yararlar üzerinde de durulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Nullator, Norator, Nullor

APPLICATION OF NULLATOR-NORATOR AND NULLOR MODEL TO ELECTRONIC CIRCUITS

ABSTRACT

The aim of this paper is to introduce the nullor model which is developed for active electronic circuit components. Therefore, nullor models of some electronic devices such as transistor, ideal and nonideal operational amplifiers are given. Applications of this model to negative impedance converters, gyrator, various controlled sources and the active RC circuit synthesis are presented and also the advantages of using this model are discussed.

Key Words : Nullator, Norator, Nullor

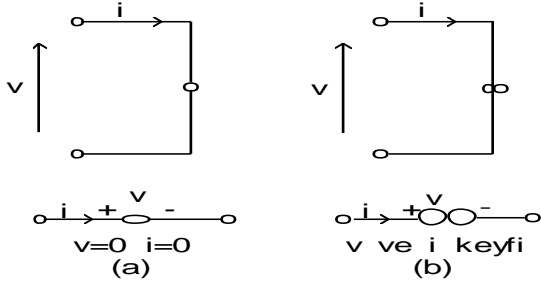
1.GİRİŞ

Lineer aktif karşılıklı olmayan (non-reciprocal) bütün devrelerin gerçekleştirilmesinde pasif elemanlara ilave olarak nullator-norator çifti de kullanılmaktadır. Voltaj ve akımın sıfır olduğu iki terminalli, bir kapılı (port), çift yönlü (bilateral) bir eleman olan nullator Şekil 1-a'da gösterilirken, voltaj ve akımın her ikisinin de keyfi olduğu iki terminalli, bir kapılı, karşılıklı olmayan bir eleman olan norator ise Şekil 1-b'de sembolik olarak gösterilmiştir. Nullator-norator çifti birbirinden bağımsız elemanlar olarak düşünüldüğünde fiziksel bir anlam taşımamaktadır. Kısaca, bu çift tek eleman olarak tanımlandığında NULLOR diye adlandırılmaktadır. Şekil-2 'de görüldüğü gibi, bir dış devrenin çıkış

ucundan giriş ucuna geri besleme yapılmasıyla nullor kavramı anlam kazanmakta v_0 çıkış voltajıyla i_0 çıkış akım değerleri burada dış devre tarafından belirlenerek uygulanmaktadır.

Nullor modelinin kullanıldığı devreler, bilinen metodların biraz değiştirilmesiyle, analiz edilebilmektedir. Bunlar; düğüm, çevre, pratik ve topolojik metodlardır. Bu metodlarla devreyi analiz etmeden önce, devrede bilinen aktif elemanların nullor eşdeğerleri alınmaktadır. Böylece nullor modeliyle aktif devre analizi belirli bir ölçüde basitleştirilmektedir.

Düğüm ve çevre metodlarının kontrollü kaynakların olduğu devrelerdeki kullanımı kolay değildir.



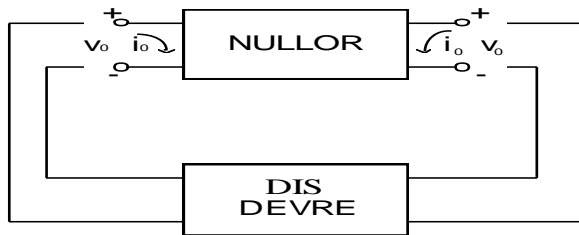
Şekil 1 (a) nullator'un (b) norator'un sembolik gösterimi.

Bu sebeple, devrelerde kontrollü kaynakların yerine nullor eşdeğerleri alınarak böyle bir sorun giderilmektedir. Ayrıca nullor modeli, aktif eleman sayısının fazla olduğu durumlarda örneğin; tektaş tümdevrelerde (monolithic IC) kullanılmaktadır (Davies,1967).

2. AKTİF ELEKTRONİK DEVRE ELEMANLARINDAN BAZILARININ NULLOR MODELİ

2.1 Transistör

Bir çok transistör devresinin yaklaşık analizinde, baz- emetör voltajı sıfır alınıp, baz akımı kollektör akımına göre ihmal edilmiştir. Bu durumda idealize edilmiş ve daha doğru bir analiz için y_{ie} , y_{fe} parametreleri ilave edilmiş transistörün nullor eşdeğeri Şekil 3'de gösterilmiştir. Transistör parametrelerinin imalat sırasındaki dağılımları performansın tümünden bağımsız yapılabilir. Sadece yeterli lokal geri besleme sağlanabiliyorsa, pratik transistör kuvvetlendiricileri genellikle tatmin edicidir. Böyle durumlarda daha basit bir model tercih edilmektedir.

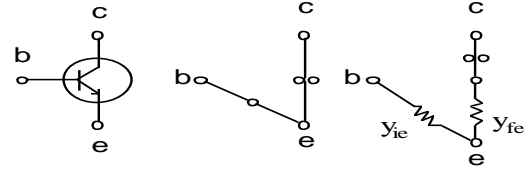


Şekil 2 Nullor'un gösterimi

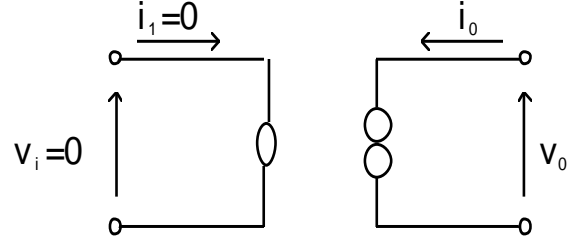
2.2 İşlemsel Kuvvetlendirici (Op-Amp)

2.2.1 İdeal Op-Amp

Sonsuz kazançla, keyfi çıkış ve sıfır giriş voltajı ile keyfi çıkış akımına sahip, nullor modeli kullanan ideal op-amp'ın sembolik gösterimi Şekil 4'te verilmiştir (Odess ve Hanochur,1980).

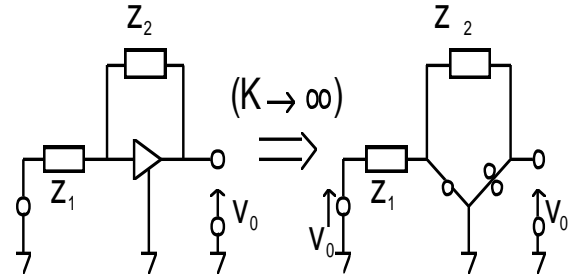


Şekil 3 Transistörün nullor modeli.



Şekil 4 Dört terminallli ideal op-amp'ın nullor modeli.

Büyük voltaj kazançlı (-K), yüksek giriş ve düşük çıkış empedanslı bir op-amp'ın Şekil 5'te nullor eşdeğeri verilmiştir. Bu eşdeğer model ideal bir op-amp için uygun görünmektedir. Ancak, nullor modelinde K kazancının işaretinin olmaması pozitif ve negatif geri besleme arasındaki farkı yok etmektedir. Bundan dolayı, nullor modelinde kararlılığı tartışmak anlamsız olmaktadır (Davies,1967).



Şekil 5 İdeal op-amp'ın nullor modeli

Bununla birlikte, nullator-norator devresinden ideal op-amp devresinin sentezi için bir teknik düşünülmüştür (Wierzb,1986). Bu teknikde; ideal op-amp kullanılan nullator ve topraklanmış norator'un birleşimi ile eşdeğer op-amp'ı oluşturan aynı nullor'lu farklı norator'lu çifti göstermektedir. Kullanılan bu teknikle kararlılığın düzeltilmesinden başka, oluşturulan devrelerin bazılarında kullanılan bant genişliğinde de önemli bir artış görülmüştür.

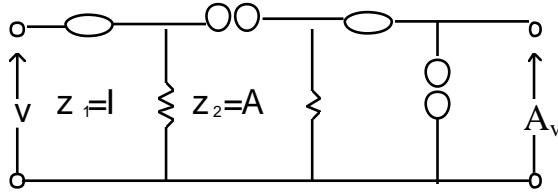
2.2.2 İdeal Olmayan Op-Amp

İdeal olmayan bir op-amp'ın; sıfırdan farklı kutuplama, öteleme (offset) ve gürültü akımına,

sıfırdan farklı öteleme ve gürültü voltajına, sonlu ortak modlu giriş empedansı ile sonlu fark giriş empedansına, sonlu çıkış empedansına, sıfırdan farklı ortak mod kazancına ve sonlu dc kazançla sahip olduğu bilinmektedir.

İdeal bir op-amp modeliyle gerçekleştirilen sentezin amacı; aktif filtrenin tüm frekans cevabı (response) üzerinde sonlu bant genişliğine sahip, kazancı olan op-amp'ın etkisini azaltmaktır. Bu durumda, senteze ideal op-amp modeliyle başlanmıştır. Deneme-yanılma yoluyla yeniden sentezlenen devreler ideal olmayan elemanlarla modellendirilip, performans düzeltilmektedir. Bu işlem, düzeltme işlemi gerçekleştirilinceye kadar devam etmektedir (Akerberg ve Mossberg,1969).

Kazançlı elemanları içeren bir eşdeğer devrede sentez işlemi , sonlu bant genişliği kazancının etkileri hakkında fikir edinmemizi sağlayacaktır. Ayrıca sentez işleminin verimi, gereken eliminasyonların yardımıyla artırılabilir. Bu hatırdaki tutularak, sonlu bant genişliğine sahip , belli kazancı olan op-amp'ın nullor modeli geliştirilmiştir. Bu eşdeğer devre, temel geri besleme bağlantıları (eviren, evirmeyen ve fark kuvvetlendiricileri) için oluşturulmuştur (Odessa ve Hanochur, 1980). Bunlardan sonlu kazancı op-amp'ın eviren voltaj-kontrollü-voltaj kaynağı (VCVS) olarak düşünüldüğü devre Şekil-6'da verilmiştir.



Şekil 6 Eviren voltaj kontrollü voltaj kaynağının nullor modeli

Nullor eşdeğer devreleri ;

-Bilinen aktif devrelerin ideal olmayan etkilerinin azaltılmasında,

-Devrede iki veya daha fazla kontrollü kaynak kullanıldığında,

-Devrenin pasif hassasiyeti bozulmaksızın aktif hassasiyetinin düzeltilmesinde,

tercih edilmektedir. Çünkü, bu durumda ideal kontrollü kaynaklı nullor eşdeğerinin çalışması daha kolay ve verimli olmaktadır (Akerberg ve Mossberg, 1969).

3. NULLOR MODELİNİN BAZI ÖNEMLİ ELEKTRONİK DEVRELERDE KULLANIMI

3.1 Negatif Empedans Dönüştürücüsü (n.i.c) ve Gyator

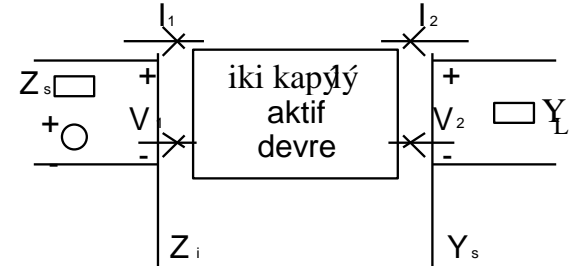
3.1.1 Negatif Empedans Dönüştürücüsü

BJT'lerin elektronik devrelerde kullanımını yeni aktif yapı taşlarının birkaçını meydana getirmiştir. Bunlardan ilk bilinenlerden biri n.i.c'tir. Şekil-7'de iki kapılı bir devre olarak n.i.c gösterilmiştir. İdeal bir n.i.c aktif iki kapılı bir eleman olup, kapının birindeki yük empedansı Z_L 'yi , diğer kapıdaki Z_L ile orantılı bir negatif empedansa çevirmektedir.

İdeal bir n.i.c'in aktif iki kapısı için gerek ve yeter şartlar şunlardır:

$$h_{11} = h_{22} = 0 \quad \text{ve} \\ h_{12} h_{21} = K$$

Burada K keyfi reel pozitif sayı olup, genellikle çevirme faktörü olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 7 n.i.c'nin iki kapılı devre olarak gösterimi

Op-amp'ın giriş terminaleri arasındaki görünürde (virtual) kısa devre sebebiyle, eviren terminaldeki voltaj v'ye eşit ve R_1 üzerindeki akım v/R_1 olacaktır.

Op-amp'ın çıkış voltajı

$$v + (v/R_1)R_2 = (1+R_2/R_1)v$$

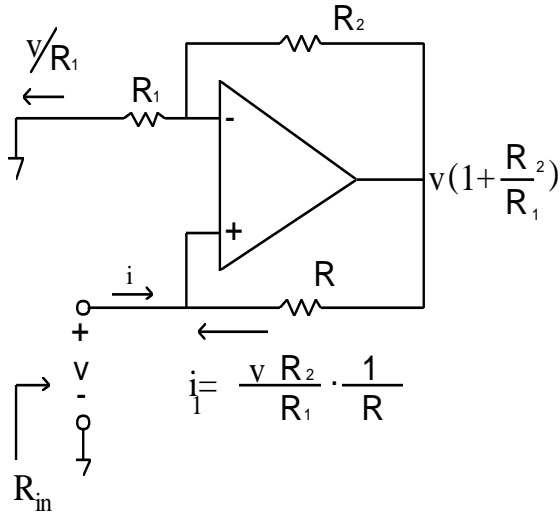
olacaktır. Op-amp'ın pozitif girişinde hiç bir akım olmadığı için

$$i = i_1 = -(v/R)(R_2/R_1)$$

ve böylece

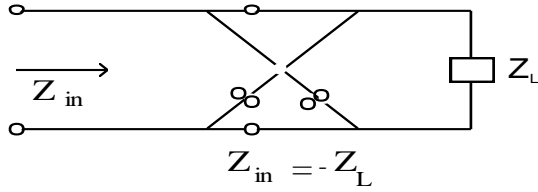
$$R_{in} = -R(R_1/R_2)$$

olur. İşte bu devredeki R_{in} giriş direnci, R_1/R_2 oranına bağlı olduğundan bu devre n.i.c adını almıştır (Sedra ve Smith., 1987).



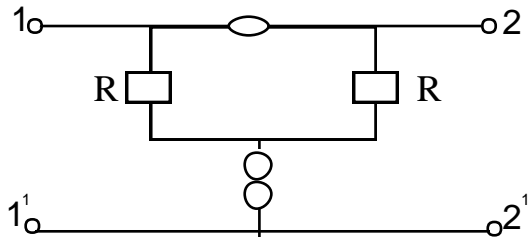
Şekil 8 n.i.c'in op-amp eşdeğeri

n.i.c'in nullor modeli Şekil -9'da verilmiştir. Modeller sadece iki kapılı yapıda geçerli olan küçük pratik değerlere sahiptir. Ancak, daha genel gösterimler de mümkündür. Negatif empedans eviricisi (n.i.i) de n.i.c gibi köprü tipi devrelerde kullanılmaktadır.

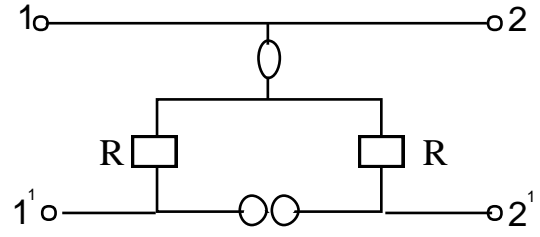


Şeki 9 n.i.c' in nullor modeli

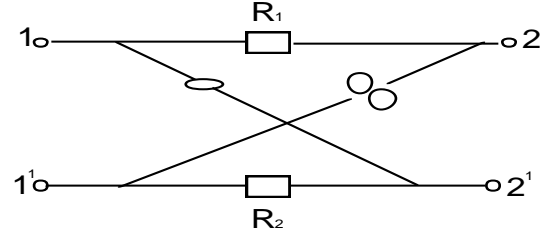
n.i.c'in iki tipi vardır. Bunlar voltaj dönüştürücü (v.n.i.c) ve akım dönüştürücü (c.n.i.c) tipidir (Antonou,1969). Bunların nullor eşdeğer modeli Şekil-10'da gösterilmiştir.



(a) c.n.i.c



(b) v.n.i.c

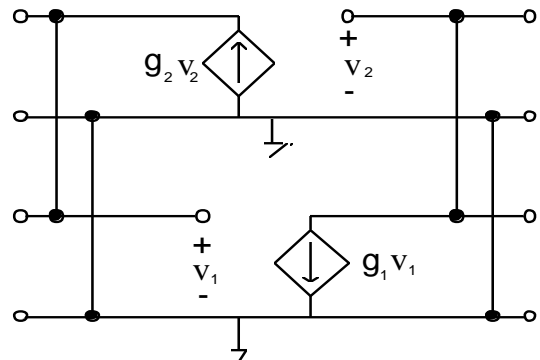


(c) n.i.i

Şekil 10 n.i.c ve n.i.i için nullor eşdeğer devreleri

3.1.2 Gyrtor

Bir gyrtor, zıt polariteli iki voltaj-kontrollü akım kaynağının ardarda paralel bağlanmasıyla gerçekleştirilebilen iki kapılı bir devredir. Bu açıklamalara bağlı olarak bir gyrtor devresi Şekil 11'de görülmektedir. Ayrıca, gyrtorun op-amp'lı modeli ise Şekil-12'de verilmiştir. Buradaki devrenin adı genelleştirilmiş empedans dönüştürücüsüdür(GIC).Genelleştirilmiş empedans dönüştürücüsü genel dönüşüm faktörü $Z_1 Z_3 / Z_2 Z_4$ ile çarpılmış olan Z_5 empedansına sebep olur ve sonuçta giriş terminallerinde görülen empedansın işareti ters çevrilir.

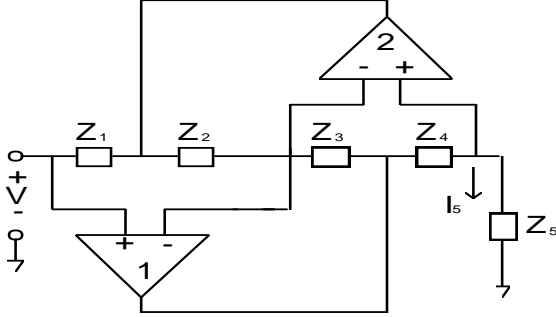


Şekil 11 Zıt polariteli iki voltaj akım kaynağının ardarda paralel bağlanmasıyla meydana gelen gyrtor

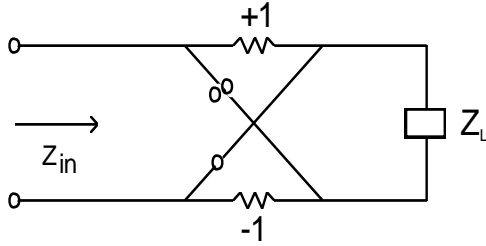
İndüktörsüz aktif filtre tasarımında GIC geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Örneğin günümüzde indüktör yerine GIC'in kullanılması

düşünülmektedir. Bir gyratorun nullor modeli Şekil-13'de verilmiştir (Davies, 1967).

Köprü tipi devrelerde kullanılan n.i.c ve n.i.i'in gerçekleştirilmesi için önce sonsuz kazançlı kontrollü kaynakların nullor eşdeğer modellerinden faydalanılmaktadır.



Şekil 12 Gyrator'un op-amp eşdeğeri.



Şekil 13 Gyrator'un nullor modeli.

Gyrator'un gerçekleştirilmesinde kullanılan nullator-norator çiftini içeren devrelerin bazı özelliklerinin incelenmesiyle, gyrator'un nullor eşdeğer devreleri n.i.c ve n.i.i'lerin kullanımıyla elde edilmektedir. Böylece, RC aktif filtre sentezinde gyrator devrelerinin uygulamaları düşünülmüş ve gyrator kullanan yüksek geçiren filtre tasarlanmıştır.

n.i.c'ler ve n.i.i'ler kullanılarak bir gyrator'un gerçekleştirilmesi için, aşağıdaki işlemler tatbik edilmektedir.

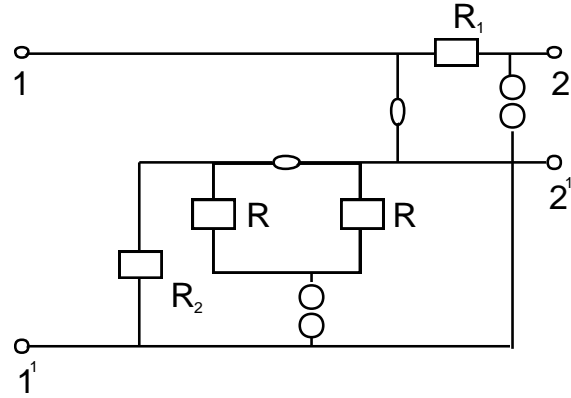
- (1)n.i.c'de negatif rezistanlar ile pozitifler yer değiştirmektedirler.
- (2) n.i.c ile n.i.i kaskad bağlanmaktadır.
- (3) Alternatif bir gyrator da ; nullor modelinin kullanımıyla (1) ve (2) inci şıklardan elde edilen sonuçlara göre ortaya çıkarılmıştır (Antoniou,1969).

Şekil 14'de birinci, Şekil-15'de ise ikinci işleme göre elde edilmiş gyrator devreleri görülmektedir.

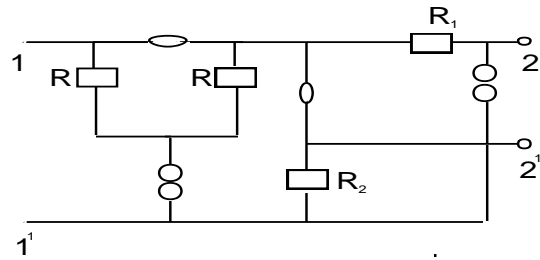
3.2 Nullor'un kontrollü kaynaklar yerine kullanımı

Karşılıklı olmayan ve aktif davranış gösteren, oldukça yaygın bir şekilde kullanılan ideal elemanlar, çeşitli kontrollü kaynaklardır. İdeal kontrollü voltaj kaynaklarını kullanan aktif devre sentezi, yüksek dereceli transfer fonksiyonlarını gerçekleştirmek için tasarlanmıştır.

Nullorun'un; Şekil-16 (a) ve (b)'de ideal akım ve voltaj kuvvetlendiricisinin, (c), (d) ve (e)' de ise self admitans, ortak admitans ve bağımlı akım kaynağı yerine kullanımı gösterilmiştir. Dört terminallli kontrollü kaynaklar içinde eşdeğer devreler geliştirilmiştir. Kontrollü kaynakların nullor eşdeğerleri oldukça sıkıcı olmasına rağmen, bazı önemli avantajlara sahiptirler (Davies, 1967a).



Şekil 14 n.i.i'de bir negatif rezistansla pozitifin yer değiştirilmesiyle gerçekleştirilen gyrator.



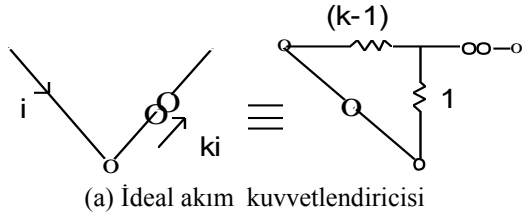
Şekil 15 n.i.c ile n.i.i' nin kaskad bağlanmasıyla gerçekleştirilen gyrator

3.3 Nullor'un Aktif RC sentezinde Kullanımı

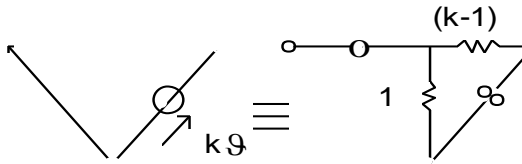
Aktif RC filtreleri hibrit tümdevrelerin kullanıldığı yapılar için çok uygundur. İlk olarak gerçekleştirilen filtre; ayrık RLC elemanlı olarak ses frekans filtrelerinin çoğunluğu olmuştur. Daha sonra transistörlerin ortaya çıkışıyla, aktif devrelerle büyük ve pahalı indüktörlerin yer değiştirilmesiyle maliyette ve boyutta önemli başarılar kazanılmıştır. Bu yüzden aktif filtreler cazip hale gelmeye

başlamıştır. Sonraları aktif filtreler ince film hibrit tümdevreleriyle (Hybrid Integrated Circuits-HIC's) gerçekleştirilmiştir. HIC küçük bir 16 pinli DIP (Dual- in-line package) içine yerleştirilmek için boyut olarak küçültülmüştür. Günümüzde, anahtarlı kapasitörlerin (switched-capasitor) kullanımıyla çok yüksek dereceden filtreler, çok küçük silikon tümdevre yongası (chip) olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, aktif R ve aktif C filtreleri tümdevre tasarımı için ses frekansında aktif RC filtrelerine göre daha uygun olduğundan tercih edilmektedir.

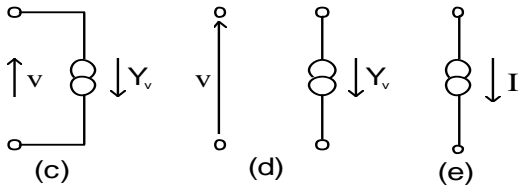
Aktif devre transfer fonksiyonlarının sentezinde kullanılan bir kaç metod vardır. Bunlardan, doğrudan gerçekleştirme metodu, iki yaklaşımdan oluşmaktadır. Bunlar; n.i.c ve kontrollü voltaj kaynağı kullanılan yaklaşımlardır. Eleman simülasyonu ile yapılan sentez işlemi ise; indüktans simülasyonu ve frekansa bağlı negatif rezistör (frequency-dependent negative resistor -FDNR) olarak ikiye ayrılmaktadır. Kaskad sentez yaklaşımı oldukça yaygın şekilde kullanılan bir methodur. Bu metod; bir op-amp'lı, iki op-amp'lı ve üç op-amp'lı biquad olarak üç şekilde uygulanabilmektedir. Çok çevreli geri beslemeli çevre metodu ise, simüle edilen indüktörlerin yerine LC merdiven gerçekleştirimi ile birlikte kullanılan diğer bir sentez methodudur (Ghausi,1984).



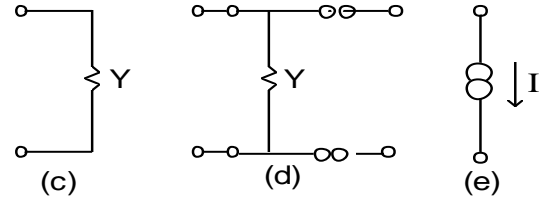
(a) İdeal akım kuvvetlendiricisi



(b) İdeal voltaj kuvvetlendiricisi



(c) Self admitans (d) ortak admitans (e) bağımlı akım kaynağı



Şekil 16 Yukarıdaki devrelerin nullor gösterimi.

Son zamanlarda bu metodlardan daha üstün ve pratik olan; rezistans, kapasitans ve nullator-norator çifti kullanan bir sistematik devre sentez işlemi ortaya çıkarılmıştır. Nullator ve norator'u içeren devreler için tek bir çözümün varlığını temin eden bir teorem sunulmuştur. Bu teoremden sentez işlemi durum modeliyle geliştirilmiş olup, bu işlemden, basit bir topoloji bulunmaktadır.

Bundan sonra, devre topolojisine bağlı, daha gelişmiş ve basit bir sentez metodu bulunmuştur. Reaktans çıkarma prensibine ve kararlı durum (state-space) tekniğine dayanan bu metod; minimum sayıda topraklanmış kapasitör kullanıp bunun sonucunda hiç bir topolojik değere bağlı olmayan sentez işleminden dolayı önem kazanmaktadır (Ramamoorty ve Thulasiraman., 1974). Pasif ve aktif devrelerin sentezinde kararlı durum tekniğinin kullanımı; entegre devre imalatında uygun özellikle, topraklanmış reaktif elemanların minimum sayısını kullanan devrelere öncülük ettiğinden cazip gelmektedir.

Son zamanlarda yapılan araştırmalarda voltaj-transfer fonksiyonlarının düşük kapasitörlü, az hassasiyetli aktif RC olarak gerçekleştirilmesinde ve kararlılık özelliklerinin incelenmesinde nullor kullanılmıştır. Gerçekleştirmeye düşük frekanslı kararsız modelden başlanmıştır.Nullator-norator modeli kullanılarak, orjinal devreden yeni devreler elde edilmiştir. Bu yeni devreler, düşük frekanslı olan kararsız modelden uzak, ancak orjinal devrenin tüm özelliklerini taşımaktadırlar (Mikhael ve Bhattacharyya, 1972).

Son yıllarda yeni bir RC aktif sentez işlemi bir kaç önemli özelliğe sahip olarak tanımlanmıştır.Bu özellikler şunlardır:

- (1) Transfer fonksiyonunun faktörü gereklidir.
- (2) Elemanlar doğrudan transfer fonksiyonunun katsayılarıyla bağlantılı olduğundan sentez işlemi basit olmaktadır.
- (3) Sonuç olarak gerçekleştirilenler; eleman değişimlerine karşı daha az duyarlı olmaktadır.

(4) Düşük hassasiyet özelliğine sahip olduğundan, yüksek dereceden transfer fonksiyonları tek bölümlü olarak gerçekleştirilebilmektedir.

(5) Gerçekleştirme kapasitörlerin sayısına göre minimumdur.

Bu özellikler; çalışma sırasında kararlılık özellikleri diye adlandırılan gerçekleştirmenin daha pratik şeklini incelemek için verilmiştir (Mikhael ve Bhattacharyya, 1972).

4. SONUÇ VE YORUM

Nullor, lineer karşılıklı olmayan devrelerin gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır. Elektronik devre elemanlarının nullor modeli kullanıldığı zaman, devre daha basitleştirilmektedir. Bu model özelliklerle; bilinen aktif elemanların ideal olmayan etkilerinin azaltılmasında, devrede iki veya daha fazla kontrollü kaynak kullanıldığında ve işlemin gayesi devrenin pasif hassasiyatini bozmaksızın, aktif hassasiyetini düzeltmek olduğunda tercih edilmiştir.

Bilinen analiz metodları, problem basit olduğunda kullanılmasına rağmen, nullor'lu metodlar aktif eleman sayısının fazla olduğu durumlarda daha iyi ve çabuk sonuç verdiği için tercih edilmektedir. Ayrıca aktif RC devre sentezinde de nullor kullanımı sentez işlemini daha basite indirgemektedir.

Nullor temelli yapıların kullanıldığı alanlar gittikçe artmaktadır. Örneğin; "CCIIQ/nullor (ikinci genel akım taşıyıcısının üç kapılı nullor modeli) eşdeğeri" nin kullanımıyla, sadece iki CC (akım taşıyıcısı) ve üç pasif elemana ihtiyaç duyup, pasif dengeleme elemanlarına ihtiyaç duymayan CC temelli yapılar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca farklı türde aktif elemanların kullanımıyla elde edilen, değişken imitans (empedans ve admitansın birlikte kullanılması) yapılarında da nullor yaklaşımının birleştirici bir rolü olduğu görülmüştür (Senani, 1988).

Son zamanlarda nullor temelli devrelerde nullatorlarla noratorların karşılıklı yer değiştirmesiyle voltaj modundan akım moduna da geçilmiştir. Böylece voltaj kuvvetlendiricisinden akım kuvvetlendiricisine dönüşüm sağlanmıştır (Carlosena, Moschytz, 1992).

KAYNAKLAR

Akerberg, D. and Mossberg, K. 1969. Low-Sensitivity Easily Trimmed Standart Building Block for Active RC Filters Electronics Letters, Vol. 5, No. 21, 528-529.

Antoniou, A. 1969. Realisation of Gytrators Using Op-amp and Their Use in RC- Active-Network Synthesis, Proc. IEE, Vol.116, No.11, 167- 171.

Carlosena, A. and Moschytz, G.S. 1992. Nullators and Norators In Voltage To Current Mode Transformations. International Journal of Circuit Theory and Application ,Vol. 21, 421-424.

Davies, A.C. 1967. The Significance of Nullators, Norators and Nullors in Active Network Theory. The Radio and Electronic Engineer, 259-267.

Davies, A.C. 1967a. Nullator-Norator Equivalent Networks for Controlled Sources, Proc IEEE, 55, 722.

Ghausi, M. S. 1984. Analog Active Filters IEEE Transactions on Circuits and Systems ,Vol. CAS- 31, No. 1, 13-30.

Michael, W.B. and Bhattacharyya, B.B. 1972. Stability Properties of Some realisations. Electronics Letters, Vol.8, No.11, p.p 288-289.

Odess, L. and Hanochur 1980. Nullor Equivalent Networks of Nonideal Operational Amplifiers and Voltage- Controlled Sources IEEE Transaction on Circuit and Systems, Vol. CAS-27, No. 3 , p.p 231-235.

Ramamoorthy, P.A. and Thulasiraman, K. 1974. Active RC n-Port Networks Synthesis Using Nullator and Norators IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol.CAS-21, No. 2, p.p 207-209.

Sedra, A.S. and Smith, K.C. 1987. Microelectronic Circuits 108 s. Second Edition Holt, Rinehart and Winston, Inc. New York.

Senani, R. 1988. Floating Immitance Realisation Nullor Approach. Electronics Letters, Vol. 27, No. 7, p.p 403- 405.

Wierzb, G.M. 1986. Op-amp Relocation: A Topological Active Networks Synthesis“, IEEE Transactions on Circuits and Systems, ol.CAS-33, No. 5, 469-475.