

Simgesel Benzetim ve Eğitimde Kullanımı

Recai Oktaş¹

Mustafa Ulutaş²

¹Elektrik–Elektronik Mühendisliği Bölümü

Mühendislik Fakültesi

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 55139, Kurupelit, Samsun

²Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Mühendislik Fakültesi

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 55139, Kurupelit, Samsun

¹roktas@omu.edu.tr

²ulutas@omu.edu.tr

Özet

“Simgesel çözümleme”, SPICE [2] gibi sayısal benzeticilerde uygulanan sayısal çözümlemeden farklı olarak seçilen problem üzerinde analitik türde bir çözümleme yapmak anlamına gelmektedir. Elektronik devrelerde simgesel çözümlemenin tanıtıldığı bu çalışmada, çeşitli uygulama alanlarıyla birlikte simgesel benzeticilerin Elektrik–Elektronik mühendisliği eğitiminde kullanım olanakları değerlendirilmektedir.

1. SİMGESEL BENZETİM

Model parametreleri simgelerle temsil edilen bir devrenin belirli bir modeli üzerinde seçilen giriş ve çıkışlar için simgesel çözümleme yapan program “simgesel benzetim programı” (veya “simgesel benzetici”) olarak tanımlanır [6].

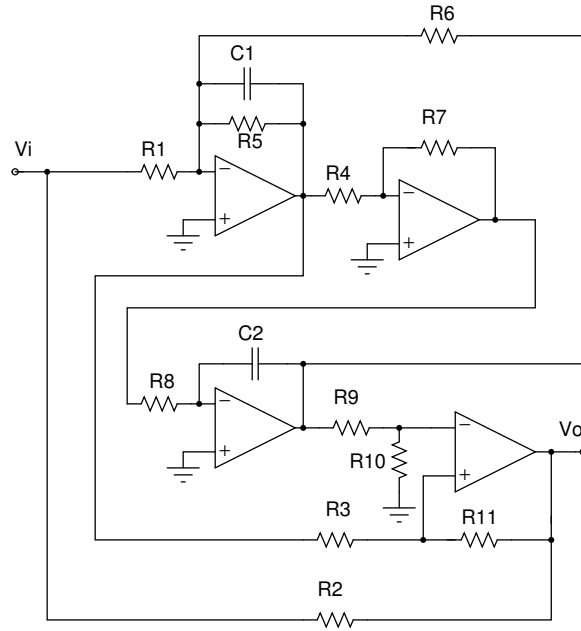
Bu genel tanımda simgesel benzeticilerin ilgilendiği devre tipleri hakkında bir sınırlama konulmamakla birlikte simgesel çözümlemenin en tipik kullanım alanı toplu–parametrelili, doğrusal zamanla değişmeyen devrelerde tanımlı devre işlevlerinin karmaşık frekans x bölgesinde bulunmasıdır [3].

$$H(x) = \frac{N(x)}{D(x)} = \frac{\sum_i x^i a_i(p_1, \dots, p_m)}{\sum_i x^i b_i(p_1, \dots, p_m)} \quad (1)$$

Devre işlevi $H(x)$, $N(x)$ ve $D(x)$ çokterimlilerinin oranıyla tanımlanan bir rasyonel işlev olmaktadır. Bu bağtımda pay ve payda çokterimlileri karmaşık frekans değişkeni x ve buna ait $a_i(\dots)$, $b_i(\dots)$ katsayılarında p_j simgesiyle temsil edilen devre parameterlerine bağlı birer simgesel çokterimlidir. Karmaşık frekans değişkeni sürekli zamanlı devrelerde s , ayrık zamanlı devrelerde z olacaktır [10].

Simgesel çözümlemede devre parametrelerinin bir kısmını sayısal değerlerle temsil etmek de mümkündür. Bu durumda yapılan simgesel çözümleme “yarı-simgesel çözümleme” olarak adlandırılır [14, 15, 6].

Şekil 1’de gösterilen aktif–RC süzgecine ait V_o/V_i geçiş işlevi için Leuven Katholieke üniversitesinde [22] geliştirilen bir simgesel benzetim program olan ISAAC’le [8] elde edilen sonuç şöyle



Şekil 1: Aktif-RC süzgeci

olmaktadır [6]:¹

$$\begin{aligned}
 & - G_1 G_2 G_4 G_8 G_9 \\
 & - G_1 G_3 G_4 G_8 G_9 \\
 & - G_1 G_4 G_8 G_9 G_{11} \\
 & - G_2 G_4 G_6 G_8 G_9 \\
 & - G_1 G_4 G_8 G_9 G_{11} \\
 & - G_2 G_4 G_6 G_8 G_9 \\
 & - G_2 G_4 G_6 G_8 G_{10} \\
 + S & (G_1 G_3 G_7 G_9 C_2 \\
 & + G_1 G_3 G_7 G_{10} C_2 \\
 & - G_2 G_5 G_7 G_9 C_2 \\
 & - G_2 G_5 G_7 G_{10} C_2) \\
 - S^2 & (G_2 G_7 G_9 C_1 C_2 \\
 & + G_2 G_7 G_{10} C_1 C_2) \\
 \hline
 & G_4 G_6 G_8 G_9 G_{11} \\
 & + G_4 G_6 G_8 G_{10} G_{11} \\
 + S & (G_5 G_7 G_9 G_{11} C_2 \\
 & + G_5 G_7 G_{10} G_{11} C_2) \\
 + S^2 & (G_7 G_9 G_{11} C_1 C_2 \\
 & + G_7 G_{10} G_{11} C_1 C_2)
 \end{aligned}$$

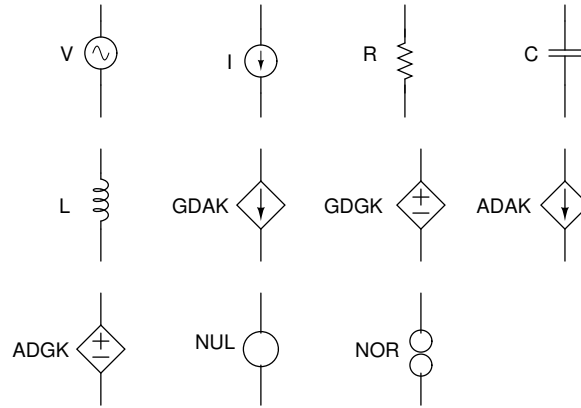
Bu örnekte görüldüğü gibi simgesel benzetim programının ürettiği çıktıda dirençler geleneksel olarak kondüktans notasyonunda gösterilmektedir. Çıktı biçeminde gözlenen bir diğer özellik

¹Örnek çıktılar özellikle simge gösteriminde ISAAC programının ürettiği çıktıları yansıtmakla beraber biçimsel olarak ISAAC'le aynı değildir.

pay ve paydadaki çokterimlilerin “çarpımlar toplamı” formundaki terimlerden oluşmasıdır. Geçiş işlevi ifadesinin ortak çarpanlar dikkate alınarak farklı şekillerde düzenlenmesi de mümkündür.

1. Simgesel benzetimde kullanılabilen devre ilkelleri

Doğrusal olmayan devre elemanlarının yerine AC eşdeğerlerinin konulması suretiyle elde edilecek nihai devreye bakıldığında bu devrenin Şekil 2’de görülen yapıtaşlarından oluştuğu görülebilir. Karmaşık bir devreyi oluşturan bu basit bileşenlere *ilkel elemanlar* denilmektedir [6, 15]. Mevcut simgesel benzetimler incelendiğinde simgesel benzetime konu devrelerin içeriğinin bu eleman kümesiyle sınırlı olduğu söylenebilir.



Şekil 2: İlkel devre elemanları

İlkel elemanlar temel olarak üç tip pasif eleman ve dört tip bağımlı kaynaktan oluşmaktadır. Bunların dışında göze çarpan bir çift eleman daha vardır: “nullator” ve “norator”. Devre kuramında iyi bilinen bu elemanlar fiziksel olarak varolan herhangi bir devre elemanına karşı düşmeyen *kurgusal* elemanlardır. Nullator ve norator bir devrede daima Şekil 3’de görülen bir çift devre elemanı olarak yer aldığından bir nullator/norator çiftine *nullor* de denilmektedir [13].

Şekil 3’de gösterilen uç büyüklükleri kullanıldığında nullor’un uç bağıntıları aşağıdaki gibi olacaktır.

$$V_A = V_B \quad I_A = I_B = 0 \quad (2)$$

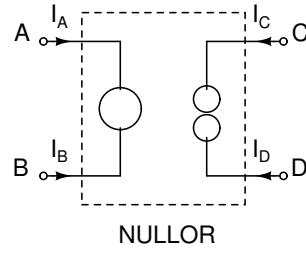
$$I_C = I_D \quad V_C = V_D = 0 \quad (3)$$

Nullator ve norator’un birer ilkel eleman olarak simgesel devre çözümlemesinde gördüğü işlev ideal işlemsel yükselteçte görülen ve herhangi bir pasif eleman ve bağımlı kaynak kümesiyle gösterilemeyecek “sanal toprak” gibi özelliklerin temsil edilmesidir. Böylelikle Şekil 4’de görülen işlemsel yükselteçte olduğu gibi[21] belirli düşünsel devre elemanlarının simgesel çözümleme kapsamına alınması mümkün olmaktadır.

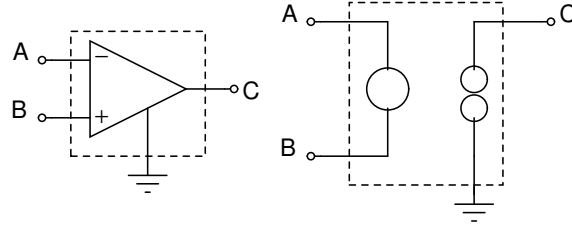
2. UYGULAMALAR

1. Tasarım otomatizasyonu

“Tasarım Otomatizasyonu” bilgisayar destekli tasarımın, insan kaynaklı hataları azaltmak ve tasarım sürecini hızlandırmak işlevlerini ifade etmektedir. Simgesel benzetimlerin en önemli kullanım alanı “Analog Tasarım Otomatizasyonu” ortamlarıdır. Simgesel benzetici, sayısal tasarım



Şekil 3: Nullor



Şekil 4: İşlemsel yükselteç nullor eşdeğeri

ortamlarının sunduğu olanakların benzerini analog tasarım ortamında da oluşturmak noktasında kritik öneme sahip bir bileşendir. Bir uzman sistemde, önceden oluşturulmuş bir analog hücre veritabanından seçilen analog birimleri, belirli bir performans ölçütüne göre simgesel benzetim yoluyla eniyileştirmek bu kapsamda verilebilecek tipik bir örnektir [6].

2. Devre davranışının incelenmesi

Simgesel benzetim programları analog devre tasarımcısının tasarımda takip ettiği en temel yollardan biri olan devre bağıntılarının analitik yoldan elde edilmesi işlemi bilgisayarla gerçekleştiren uygulamalar olması itibarıyla tasarımcının çalışma tarzıyla doğal bir uyum göstermekte ve devre davranışının incelenmesinde geniş olanaklar sunmaktadır. Devre davranışının incelenmesi aynı zamanda kendi başına eğitsel değer taşıyan bir faaliyet olduğundan bölüm 3.'de verilen uygulama örnekleri bu kapsama giren uygulamaları da açıklayıcı nitelikte olacaktır.

3. Tekrarlı işlemler

Simgesel devre çözümlemesinin bir diğer önemli uygulama alanı tekrar tekrar hesaplanması gereken devre bağıntılarıdır. Bu bağıntılardaki tekrarlı hesap zorunluluğu belirli bir devre ölçütünün iyileştirilmesi amacına yönelik olabilir [7, 9]. Örnek olarak bir devre büyüklüğünün frekansa bağlı değişimi incelenirken önce bu büyüklüğün simgesel ifadesinin elde edilmesi ve tekrarlı AC çözümlemenin bu analitik bağıntı üzerinde yürütülmesi hesap süresini çok kısaltacaktır [15, 6].

Doğal olarak bütün problemler simgesel çözümlemeye uygun bir yapıya sahip değildir. Özellikle doğrusal devrelerin tolerans (*Monte Carlo*) ve duyarlılık analizi bu kapsama giren başlıca örneklerdir [12]. Öte yandan, son yıllarda araştırmacıların ilgisini çeken yeni bir saha olarak belirli problem türleri için doğrusal olmayan halde simgesel çözümleme yapmak da mümkün olmaktadır [18].

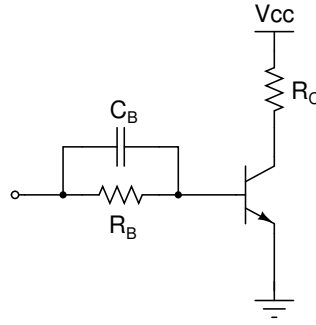
Doğrusal olmayan analog devrelerde kusur tanısı [20] tekrarlı işlem gerektiren uygulamalara ilginç bir örnektir. Kusur tanısı uygulamasında simgesel benzetici kusur tanısı yapan uzman sistemin bir bileşeni olarak tekrarlı hesapların yapılmasında kullanılmaktadır.

4. Devre performansının etkileşimli şekilde iyileştirilmesi

Simgesel çözümlemeyle devre topolojisindeki değişimlere bağlı olarak devre performansındaki değişimleri gözlemek de mümkündür. Simgesel çözümleme sayesinde, özellikle çeşitli çizim programları yardımcı araçlar olarak kullanıldığında, devreye belirli bir elemanın eklenmesi veya çıkarılması halinde seçilen performans ölçütünün ne şekilde değiştiği etkileşimli şekilde incelenebilir [6].

3. SİMGESEL BENZETİCİLERİN EĞİTİMDE KULLANIMI

Önceki bölümlerde açıklanan kullanım senaryoları büyük ölçüde eğitim alanına da uyarlanabilir. Devre davranışını etkileyen büyüklükleri görmek, devre performansını etkileşimli olarak iyileştirmek aynı zamanda eğitsel değeri haiz zihinsel etkinliklerdir. Simgesel benzetimler klâsik teknikleri de gözardı etmeyen bir çerçeve içinde kullanılacak olursa bu tür faaliyetlerin daha etkili şekilde gerçekleşmesi mümkün olacaktır [11, 5].



Şekil 5: Hızlandırma sığacı kullanan anahtarlama devresi

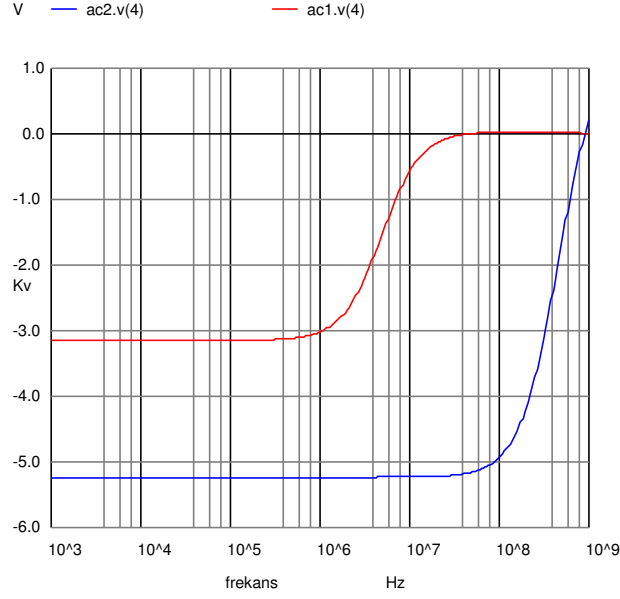
Basit bir örnek olarak Şekil 5’de görülen anahtarlama devresinin davranışı incelenebilir. Bu devrede anahtarlama süresini kısaltmak için eskiden beri bilinen etkili bir teknik olarak bipolar tranzistörün bazında bir “hızlandırma sığacı” kullanılmıştır [17]. Sığacın etkisi aşağıdaki devre tanımı kullanılarak yapılan bir SPICE benzetimiyle gözlenebilir.

```
.model qmod npn
+ level=2 bf=100 rb=1 tf=0.5ns
+ tr=6ns cje=13pf cjc=4pf va=50)

vcc 5 0 12V
rb 1 2 1k
cb 1 2 220pF
q 4 2 0 qmod
rc 4 5 220ohm
vg 1 0 dc 0.75 ac 1
```

Sığaç yokken ve uygun bir değere ayarlanmış bir hızlandırma sığacı bağliken yapılan SPICE benzetimlerine ilişkin sonuçlar Şekil 6’de verilmiştir. ² Görüldüğü gibi hızlandırma sığacının uygun ayarlanması şartıyla bu teknik devrenin bant genişliğini arttırmaktadır.

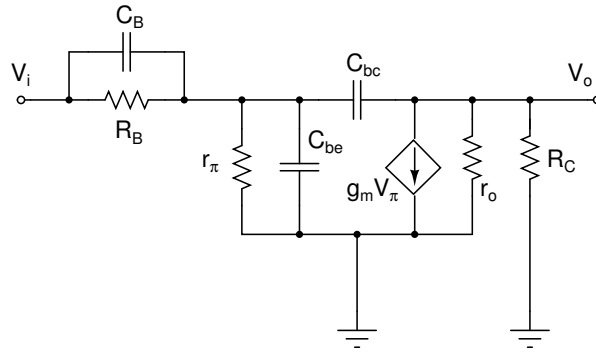
²SPICE benzetiminde `spice3` [19] temelli bir program olan `ngspice`’m [1] modifiye edilmiş bir sürümü kullanılmıştır [16].



Şekil 6: Hızlandırma sıgacının kazanç–frekans değişimine etkisi

Simgesel benzetim, sayısal benzetimle gözlenen bu davranışın içyüzünü anlamak olanağı sunmaktadır. Bu amaçla Şekil 7’deki AC eşdeğer kullanıldığında $H(s) = V_o/V_i$ geçiş işlevi için aşağıdaki simgesel çıktı üretilecektir:

$$\begin{aligned}
 & - \text{GM.Q GB} \\
 & - S (\text{GM.Q CB}) \\
 \hline
 & \text{GO.Q GB} + \text{GO.Q GP.Q} \\
 & + S (\text{GO.Q CB} + \text{GO.Q CBE.Q})
 \end{aligned}$$



Şekil 7: Anahtarlama devresi AC eşdeğeri

Simgesel çıktıda görülen GM.Q, GP.Q ve GO.Q simgeleri sırasıyla Q tranzistörünün küçük işarete eşdeğerinde g_m , g_π ve g_o simgelerine karşı düşmektedir. Simgesel benzetim programlarında yaygın olarak kullanılan *iletkenlik* notasyonuna uygun olarak GB simgesi de R_B direncine ait G_B iletkenliği olmaktadır.

Bu basit örnekte simgesel benzetim C_B sığacının hangi şart sağlandığında devrenin anahtarlama süresini kısaltacağını göstermektedir:

$$R_B C_B = r_\pi C_{be}$$

eşitliği sağlanacak şekilde seçilen bir sığaç kullanılması halinde devre *tümgeçiren süzgeç* olarak davranmaktadır. Osiloskop proplarında kullanılan 1 : 10 zayıflatma tekniğinin ardındaki ilkeyi de açıklayan bu örnek küçük değişikliklerle birlikte zenginleştirildiğinde öğrencinin elektronikteki bazı temel kavramları algılamasına yardımcı olacaktır.

4. Sonuç

Elektrik-Elektronik Mühendisliği eğitimi gören bir öğrenci eğitim sürecinin geniş bir döneminde devre bağıntılarının analitik olarak elde edilmesini gerektiren problemlerle uğraşmaktadır. Simgesel çözümler bu problemlerde, elde edilen sonuçların doğrulamasında kullanılabilir. Analog devrelerde kullanılan simgesel benzetimlerle benzer işlevselliği sayısal mantık devrelerinde sunan mantık benzetimleri de mevcuttur [4]. Her iki türde aracın kullanımı öğrencilerin analog ve sayısal elektronikte *keşfetmesi* sürecini hızlandırarak eğitim kalitesinde kendine özgü farklılıklar yaratabilir.

Kaynaklar

- [1] Ng-spice: the free circuit simulator. <http://ngspice.sourceforge.net/>.
- [2] D. O. Pederson A. Vladimirescu, A. R. Newton. *SPICE version 2G.1 user's guide*. Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley, October 1980.
- [3] P. R. Adby. *Applied circuit theory: matrix and computers methods*. Ellis Horwood, 1980.
- [4] R. Bryant. Boolean analysis of mos circuits. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design, CAD-6(4):634-649*, July 1987.
- [5] T. G. Engel. Splice: An analytical network analysis software. *IEEE Transactions on Education*, 39(3):394-398, 1996.
- [6] W. Sansen G. Gielen. *Symbolic analysis for automated design of analog integrated circuits*. Kluwer academic publishers, 1991.
- [7] W. Sansen G. Gielen, H. Walscharts. Analog circuit design optimization based on symbolic simulation and simulated annealing. *proc. ESSCIRC*, pages 252-255, 1989.
- [8] W. Sansen G. Gielen, H. Walscharts. Isaac: a symbolic simulator for analog integrated circuits. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, SC-24(6):1587-1597, December 1989.
- [9] W. Sansen G. Gielen, H. Walscharts. Analog circuit design optimization based on symbolic simulation and simulated annealing. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, SC-25(3):707-713, June 1990.
- [10] W. Sansen H. Walscharts, G. Gielen. Symbolic simulation of analog circuits in s- and z-domain. *proc. ISCAS*, pages 814-817, May 1989.
- [11] L. P. Huelsman. Personal computer symbolic analysis programs for undergraduate engineering courses. *proc. ISCAS*, pages pp. 798-801, 1989.

- [12] J. Vlach K. Singhal. Symbolic analysis of analog and digital circuits. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, CAS-24(11):598–609, November 1977.
- [13] E. S. Kuh L. O. Chua, C. A. Desoer. Linear and nonlinear circuits. *McGraw-Hill*, 1987.
- [14] P. M. Lin L. O. Chua. *Computer-aided analysis of electronic circuits: algorithms and computational techniques*. Prentice-Hall, 1975.
- [15] P. M. Lin. *Symbolic network Analysis*. Elsevier Science Publishers, 1991.
- [16] R. Oktaş. Ngspice for debian. <http://kirkambar.net/devel/ngspice/>.
- [17] C. L. Searle P. E. Gray. *Electronic principles: Physics, models, and circuits*. John Wiley, 1967.
- [18] W. Sansen P. Wambacq, G. Gielen. Symbolic simulation of harmonic distortion in analog integrated circuits with weak nonlinearities. *proc. ISCAS*, pages 536–539, 1990.
- [19] J. M. Rabaey. The spice page. <http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/>.
- [20] M. C. Piccirilli S. Manetti. *Special issue on symbolic analysis of analog circuits: Techniques and applications*, chapter Symbolic simulators for the fault diagnosis of nonlinear analog circuits, pages 59–72. Kluwer academic publishers, 1993.
- [21] Yılmaz Tokad. *Devre Analizi Dersleri, Kısım – I*. Çağlayan kitabevi, 1986.
- [22] Katholieke Universiteit. Department of electrical engineering – esat. <http://www.esat.kuleuven.ac.be/>.