

dur-geç süzgeçler

muhammed köksal

UDK: 621.372.54: 621.3.011.6

ÖZET

Bu yazıda yüksek sıklıkta çalışan dönemli anahtarları içeren devrelerin zamanla değişmeyen geçiş işlevlerini nasıl gerçekleştirdiği ve bunun çeşitli yararları anlatılmış, bu tür devrelerin en yaygın örneği olarak bilinen dur-geç süzgeçler (stop-go filters) tanıtılmıştır.

SUMMARY

in this article, the use of fast-periodic switched networks to obtain time invariant transfer functions are described and, as the most common application of this, stop-go filters are introduced.

1. GİRİŞ

Günümüz elektroniğinde zamanla değişmeyen geçiş işlevlerinin gerçekleştirilmesi yüksek sıklıklarda çalışan dönemli anahtarları içeren doğrusal devrelerle de yapılabilir [1]. Böyle anahtarların kullanılmasıyla zamanla değişmeyen bir devrenin deviniği (dinamiği) bir bölümüyle yada tümüyle değiştirilebilir. Bu olgu, uygulamada, çevre koşullarına duyarsız tümleşik devrelerin gerçekleştirilmesinde etkin bir biçimde kullanılır [2]. Ayrıca devre içindeki yerlerine ve çalışma biçimlerine bağlı olarak, bu anahtarlar bazı devre öğelerinin

Muhammed Köksal, Y.Prof.Dr., ODTÜ

etken değerlerini değiştirirler ve böylece iyi bir elektronik ayarlama ve hatta geçiş işlevlerinde tam bir sıklık ölçeklemesi sağlarlar.

Tümleşik devre tasarımının göze çarpan zorluklarından birisi de büyük değerli direnç ve sığaçların yapımı, diğer bir deyişle büyük zaman değişmezlerinin gerçekleştirilmesidir. Bu zorluğu gidermek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. İlk kez Lin [3] tarafından ortaya atılan bir yol, her dirence seri bir anahtar bağlamaktır. Bu durumda etken direnç, anahtar döneminin (T_0), anahtarın boyunca bir dönem kapalı kalma süresine (T) oranı kadar artar, başka bir deyişle fiziksel direnç T_0/T ile çarpılmış olur. Tümleşik devrelerde anahtarlama yöntemi ile direnç çarpılması Sun ve Frisch [2] tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Daha sonra Hirano ve Nishimura [4] dirençlere ek olarak, elektriksel topaç iletkenliklerinin (*gyrator conductances*) bağımlı kaynaklar ve eksi empedans çevirgeçleri gibi öğelerin geçiş katsayılarının da çarpılabileceğini gösterdiler ve bunu deneysel olarak uyguladılar. Dönemli anahtarlama ile gerçekleştirilen bu çarpım, T_0/T oranını değiştirmekle sürekli olarak değiştirilebildiğinden bu yöntemle yapılan geçiş işlevlerindeki elektronik ayarlama da sürekli olur.

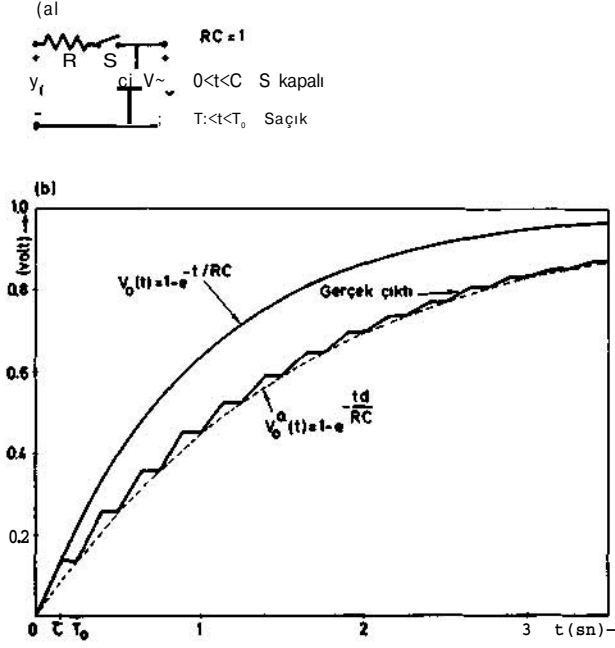
Hızlı çalışan dönemli anahtarların önemli bir başka uygulaması da çok kanallı geçiş işlevlerinin gerçekleştirilmesinde görülür [5]. Bu uygulamada ise yükselteçler ve bu tür anahtarları içeren etkin RC devrelerindeki diğer öğeler zaman paylaşmalı olarak her kanal tarafından ortaklaşa kullanılırlar [6]. Fakat bu paylaşım her kanala ilişkin geçiş işlevinin ayarlama alanını kısıtlar.

Yukarıda verilen bilgileri kuramsal olarak kanıtlamak, daha somutlaştırmak için Şekil 1a'da gösterilen devreyi ele alalım. $V_f(t) = V(t)$ birim basamak girdisi için devrenin gerçek çıktılarını Şekil 1b'de gösterilmiştir. Sürekli olan $V_0(t)$ eğrisi, S anahtarının sürekli kapalı kalması durumuna karşılık gelir. Noktalı olarak çizilen $V_S(t)$ eğrisi ise, S anahtarı, $T_0 = 0,25$ saniyelik bir dönem ve $d = x/T_0 = 0,6$ lık bir çalışma çarpanı (*duty cycle*) ile çalıştığıında elde edilen gerçek çıktının (basamaklı eğri) yaklaşık değişimini gösterir. Görüldüğü gibi bu değişim, $t_k = kT_0$ $k = 0,1,2,...$ anlarında gerçek çıktıya tam olarak eşittir. Ayrıca bu eşitlik, anahtarlama sıklığı $f_0 = 1/T_0$ sonsuza vardığında bütün t^0 zamanı için geçerli olur.

$V_0(t)$ ve $V_S(t)$ işlevleri karşılaştırıldığında, S anahtarının, RC devresinin zaman değişmezini $RC = 1$ değerinden $(1/d)RC = 1,666...$ ya çıkarttığı görülür; bundan dolayı C sığacının geriliminin 1 volta ulaşması geciktirilmiş, devrenin deviniği yavaşlatılmıştır. Diğer bir deyişle $V_S(t)$ işlevi, direnci $1,66 R$, sığacı C olan Şekil 1a'dakine benzer, fakat anahtarsız bir devrenin birim basamak girdisine olan tepkisine eşittir; bu ise S anahtarının, R direncinin değerini etken olarak $1/d = 1,666...$ ile çarptığı anlamına gelir.

$H(s) = V_0(s) / V_i(s) = 1 / (s + 1/RC)$ ve

$H_0(s) = v_g(s) / V_i(s) = 1 / (s/d + 1/RC)$ geçiş işlevleri karşılaştırıldığında, $H_0(s) = H(s/d)$ olduğu görülür. Bu karşılaştırma da anahtarlanın $H(s)$ geçiş işlevinin sıklık ölçeklemesini nasıl yaptığını ortaya çıkarır.



Şekil 1. (a) Anahtarlı RC devresi/
(b) Birim basamak işlevine olan tepkeleri.

2. DUR-GEÇ SÜZGEÇLER

Yeterli ölçüde hızlı dönemli anahtarlar kullanılarak gerçekleştirilen süzgeç ayarlamasının özel bir uygulaması, zamanla değişmeyen bir devrede bu anahtarların belirli yerlere yerleştirilmesi biçiminde görülür. Bu uygulamadaki düşünce, zamanla değişmeyen toplu (*lumped*) öğelerden oluşan devrenin tüm deviniğini belirli bir oranda yavaşlatmak ve böylece geçiş işlevindeki istenilen sıklık ölçeklemesini elde etmektir. Sözü edilen yavaşlatma, dönemli anahtarların çalışma çarpanını ($d \cdot x / T_0$) değiştirmekle denetlenebilir. Şimdi bu tür uygulamanın en yaygın örneği olan dur-geç süzgeçler tanıtılacaktır.

Bir dur-geç süzgeç, eşzamanlı, dönemli bir biçimde durum değiştiren anahtarlar aracıyla denetlenen bir devredir. Anahtarlar T_0 döneminin T kadarlık bir bölümünde bir durumda, $T_0 - T$ kadarlık diğer bölümünde ise öteki durumdadırlar, T uzunluğundaki sürede (açık süre, GEÇ durumu) devre tümüyle etkin olup, devrenin durum denklemleri;

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1a)$$

$$y = Cx \quad (1b)$$

verilir. $T_0 - T$ uzunluğundaki sürede (kapalı süre, DUR durumu) ise devre tümüyle dondurulmuş olup durum denklemleri;

$$\dot{x} = 0 \cdot x + 0 \cdot u \quad (2a)$$

$$y = Cx \quad (2b)$$

biçimindedir. Yukarıdaki denklemlerde x durum değişkenleri vektörünü, u giriş imini, y çıkış imini gösterirler; A, B, C ise değişmez matrislerdir.

GEÇ durumunda, (1a) denkleminde de görüldüğü gibi durum değişkenleri değişmektedir; örneğin sı-

yaçlardan akım geçmekte olup sığaç gerilimleri değişmektedir.

DUR durumunda ise (2a) denkleminde de görüldüğü gibi durum değişkenleri dondurulmuştur; örneğin sığaç akımları (indüktans gerilimleri) sıfırdır ve bu nedenle sığaç gerilimleri (indüktans akımları) değişmez değerlerde durmaktadır. DUR durumu, devredeki her sığaca (indüktansa) seri (paralel) bir açık (kapalı) anahtar bağlamakla kolayca elde edilebilir. Bu anahtarların hepsinin aynı anda durum değiştirmeleri ile devre de bir durumdan ötekine geçer.

Ancak parasal sorun, devrenin bütün durum değişkenlerinin dondurulmasını en az sayıda anahtarla yapmayı gerektirmektedir [7]. Bazı devreler için kullanılacak anahtarların yeri ve sayısı bulunmuştur [8].

Uygulamada, çoğu zaman çıkış iminin sürekli bir işlev olması istenir. Bu nedenle çıkış imi doğrudan doğruya bir sığaç gerilimi yada bir indüktans akımı ile beslenir. Başka bir deyişle, (1b), (2b) denklemlerinden de görüleceği gibi giriş iminin çıkış imine doğrudan doğruya bağlanması (*coupling*) önlenir. Eğer bu yapılmamışsa, sözü edilen süreklilik, dur-geç süzgecin çıkışına alçak geçiren başka bir süzgeç koymakla sağlanabilir.

Genelde dur-geç süzgeçler, zamanla dönemli olarak değişen dizgelerin bir bölümüdür. Bu nedenle bir dur-geç süzgecin $u(t) = Ue^{st}$ (u gerçel sıklık ise $s = ju$) üstel girdisine olan kalıcı tepkisi, $y(t) = H(s, t)e^{st}$ denkleminde belirlenir [9]. Burada $H(s, t)$ süzgecin zamanla değişen dizge işlevi olup t zamanına göre T_0 dönemi ile dönemlidir. Ancak, eğer dönemli anahtarlar yeterli hızla çalışıyorlarsa o zaman $H(s, t)$ nin t ye göre Fourier açılımındaki bütün katsayılar (ortalama değer dışında) sıfıra yavaşlarlar, böylece zamanla değişen dizge işlevi, ortalama değeri $H(p, t)$ olan $H_0(s)$ geçiş işlevine dönüşür. (1) ve (2) denklemleriyle gösterimlenen bir dur-geç süzgeci için bu işlev,

$$H_0(s) = H(s/d) \quad (3)$$

olarak bulunur [10]. Burada $H(s)$ dur-geç süzgecin geçiş işlevi olup $H(s) = C [sI - A]^{-1} B$ olarak bilinir.

Bir dur-geç süzgecin geçiş işlevini tanımlayan (3) denklemini yaklaşık bir sonuç olup birçok araştırmacı tarafından çeşitli yöntemler kullanılarak elde edilmiştir [11, 12, 13]. Bu araştırmacıların tümü soruna genel bir biçimde yaklaşmamakta, değişik özel durumları incelemektedirler. Ancak hızlı çalışan dönemli anahtarları içeren devrelere ilişkin en genel yaklaşık sonuçlar ve özel olarak (3) denklemini [14] de elde edilmiştir. Bütün bu yaklaşımlarda anahtarların sıklığının (f_0) giriş imi sıklığından ve (1) denklemler iyi e gösterilen zamanla değişmeyen devrenin doğal sıklıklarından yeterli ölçüde büyük olduğu varsayılmıştır.

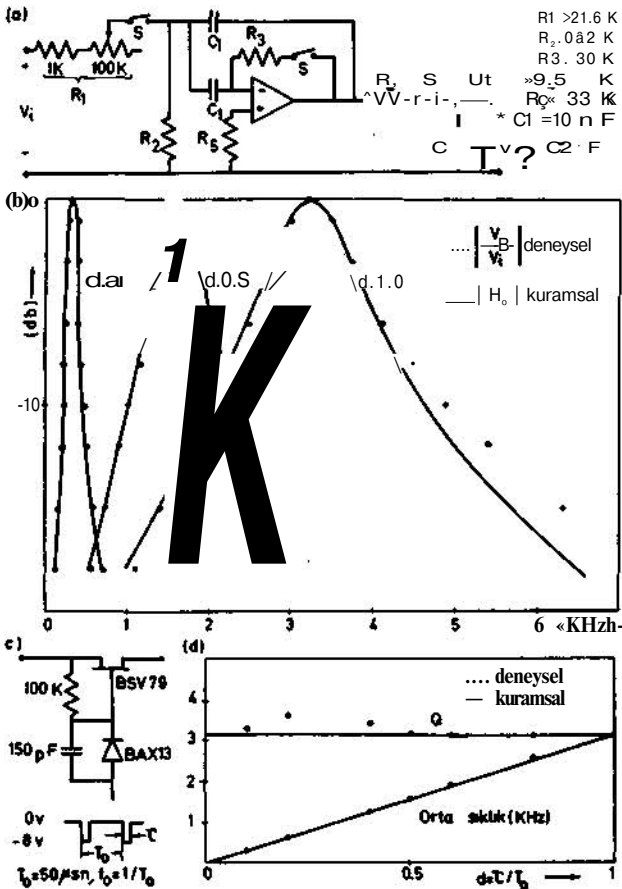
(3) denklemindeki sonuç çok önemli olup uygulamada çokça kullanılır [4, 7, 11, 13]. Bu denklemin belirttiğine göre d çalışma çarpanının değişimi, sürekli bir sıklık ölçeklemesi doğrudur. Böylece hızlı anahtarlama yöntemiyle hem bant genişliği hem de tepe sıklığı ayarlanabilir süzgeçler yapılabilir.

Bu süzgeçlerin ayarlama alanı ulaşılabilen en düşük çalışma çarpanı d_{min} ile kısıtlıdır. $\hat{\hat{}}$ ise anahtarların çıkış ve düşüş süreleri ve F_0 gibi bir sıklığa bağlıdır. F_0 ya girişimin içerdiği en yüksek sıklığı yada (1) ile gösterimlenen devrenin doğal sıklıklarından salt değeri en büyük olanını (hangisi büyükse) gösterir. Uygulamada kolayca gerçekleştirilebilen $0,1 \times 10^{-6}$ saniyelik bir çıkış ve düşüş süresi için en fazla

$$1 : \frac{1}{W} = 1 : \frac{10^6}{5F_0} \quad (4)$$

lık bir ayarlama alanı elde edilebilir. (A) denklemini elde ederken en düşük anahtarlama sıklığının (f_{min}) $5F_0$, en düşük açık kalma süresinin (t_{min}) $0,2 \times 10^{-6}$ saniyelik bir (çıkış + düşüş) süresinin 5 katı olabileceği varsayılmıştır. Bu varsayımların ilki kuramsal, ikincisi ise uygulamadaki kısıtlamaların birer sonucu olup, deneysel olarak istenilen geçiş özelliklerini pek bozmadıkları gösterilmiştir [2, 5, 12]. Bu yayınlarda Uygulamada kullanılan ve düşüncel olmayan anahtarlara ilişkin sıfırdan farklı çıkış ve düşüş sürelerinin, sıfırdan farklı kapalı durum ve sonsuz olmayan açık durum dirençlerinin ve anahtarlama sıklığının (f_0) geçiş özelliklerine etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Şekil 2. (a)örnek 1'e ilişkin dur-geç süzgeç; (b)Geçiş işlevleri (c)Anahtarların yapısı (d)Orta sıklık ve Q nun d ile değişimi.



3. ÖRNEK 1.

Dur-geç süzgeçlere bir örnek olarak Şekil 2a'daki bant geçiren süzgeç* gerçekleştirilmiş ve

$$H_0(s) = \frac{V_0(s)}{V_1(s)} = H(s/d) = \frac{1}{RIUCIC2} \left(\frac{s}{d} \right) \left[\left(\frac{s}{d} \right)^2 + \frac{2}{R_3 C_1} \left(\frac{s}{d} \right) + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_1^2} \right]$$

geçiş işlevinin, çalışma çarpanı d ile nasıl değiştiği Şekil 2b'de hem kuramsal hem de deneysel yöntemlerle çizilmiştir. Şekil 2c'de ise kullanılan dönemli anahtarların nasıl yapıldığı gösterilmiştir. Şekil 2b'den de görüleceği gibi kuramsal ve deneysel sonuçlar uyum içinde olup aralarındaki fark az da olsa şu nedenlere dayanmaktadır: 1) Anahtarların düşüncel olmayışı; sıfırdan farklı çıkış ve düşüş sürelerine ek olarak anahtarlar, kapalı durumda sıfır olmayan, açık durumda da sonsuz olmayan dirençler gösterirler. 2) Kuramsal sonuçlar anahtarlama sıklığının yüksek olduğu varsayımıyla elde edilmiş yaklaşık sonuçlar olup ancak bu sıklık sonsuza vardığında tam olarak gerçekleştirilebilirler. 3) Devre öğeleri, üzerlerinde gösterilen değerlerden farklı olabilir.

Şekil 2d'de ise, gerçekleştirilen bant geçiren dur-geç süzgecin tepe sıklığının ve nitelik çarpanı Q 'nun, d çalışma çarpanı ile değişimleri gösterilmiştir. Deneysel ve kuramsal sonuçlar arasındaki farklılık yine yukarıdaki nedenlere dayanmaktadır. Bu şekilde, göze çarpan bir nokta devrenin nitelik çarpanının anahtarlama ile değişmediğidir; bu ise bant genişliğinin ve tepe sıklığının d ye aynı biçimde bağlılığından ileri gelmektedir.

4. SONUÇ

Bu yazıda hızlı çalışan dönemli anahtarları içeren devrelerle zamanla değişmeyen geçiş işlevlerinin nasıl gerçekleştirilebileceği kısaca gösterilmiş ve ayrıntılara girmeden dur-geç süzgeçler tanıtılmıştır. Bu tür anahtarları kullanarak bazı devre öğelerinin değerlerinin çarpıldığına ve bunun tümleşik devre yapımındaki önemine değinilmiş, ayrıca bu yöntemin çevreye daha az duyarlı devreler oluşturduğu belirtilmiştir. En önemli elektronik olarak ayarlanabilen ve dur-geç süzgeçlerde olduğu gibi geçiş işlevlerinin tam bir sıklık 31-çuklemesini yapabilen devrelerin, bu anahtarlar kullanılarak gerçekleştirilebildiği gösterilmiştir.

Buraya dek sözü edilen iyi yanlarına karşın; bu tür devreler, çıktılarında anahtarlama sıklığını ve bu sıklığın katlarını bulunduran gürültüye neden olurlar. Fakat bu gürültü, süzgecin çıktısına,

* Bu süzgeç yazarın doktora çalışmalarına ilişkin olarak Gebze'deki TBTA Marmara Araştırma Enstitüsü'nde gerçekleştirilmiştir.

kesim sıklığı anahtarlama sıklığının altında bulunan kaba bir RC alçak geçiren süzgeç koymakla önlenebilir.

Dur-geç süzgeçlerin diğer bir kötü yanı da, etkin öğeler kullanıldığında, örneğin indüktanslar benzetim yoluyla gerçekleştirilirken, ortaya çıkar [4, 15]. Hele kullanılan etkin öğeler açık ve kapalı devre kararsızlıkları gösteriyorsa, bu bir zorluk yaratır. Böyle durumlarda ise yavaşla-geç süzgeçler (*brake-go filters*) [10, 16] kullanılır. Bu süzgeçler dur-geç süzgeçler gibi iki durumlu çalışır. Geç durumunda aralarında bir fark olmamakla birlikte, diğer durumda yavaşla-geç süzgecin deviniği tümüyle durdurulmamış olup yalnızca belirli bir oranda yavaşlatılır. Onun için GEÇ durumunda süzgeci gösterimleyen denklemlerden (1a), YAVAŞLA durumunda, bu denklemdeki A ve B matrislerini belirli bir $b (0 < b < 1)$ yavaşlatma katsayısı ile çarpmakla elde edilen biçime dönüşür. Uygulamada bu dönüşüm, devredeki bazı dirençleri anahtarlama yapıları. Kullanılan anahtarların

sıfır olmayan kapalı durum ve sonsuz olmayan açık durum dirençlerinin devre içindeki diğer dirençlerle birleştirilebilir olması ise çözümlene ve tasarımı yönünden kolaylık sağlar.

Bir yavaşla-geç süzgecin geçiş işlevi,

$$H_o(s) = H(s, d, b) = H(s/K) \quad (6)$$

olarak bulunabilir [17]. Burada $K = d + b(1 - d)$ olup b açık ve kısa devre kısıtlamalarından dolayı $0 < b < 1$ alanının sifıra yakın yerinde seçilemeyeceğinden, bu süzgeçlerin ayarlama alanı genellikle (4) denkleminde bulunandan daha azdır.

Dönemli anahtarları içeren devreler, bu yazıda tanıtılmaya çalışılanlardan çok daha fazladır. Bunlar da, sayısal imlerin işlendiği devreleri bir yana bırakırsak, N-yollu süzgeçler ve özsalınımlı geçiş devreleri olmak üzere iki ana bölümde toplanabilir [18]. Dönemli anahtarların bu alandaki uygulamaları ise daha sonraki yazılarda tanıtılmaya çalışılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] *Trick, T.N.* "An equivalence between fast periodic-switched systems and time-invariant systems", IEEE Trans. Circuit Theory, Cilt CT-20, s.324-325, Mayıs 1973.
- [2] *Sun, Y. ve I.T.Frisch,* "Resistance multiplication in integrated circuits by means of switching", IEEE Trans. Circuit Theory, Cilt CT-15, s.184-192, Eylül 1968.
- [3] *Lin, H.C., W.R.Davis ve Y.Sun,* "Active and passive multiplication of RLC time constants for subaudio frequency integrated filters", IEEE Region 6-th Ann. Conf., Cilt 1, s.1-9, Aralık 1966.
- [4] *Hirano, K. ve S.Nishimura,* "Active RC filters containing periodically operated switch.es", IEEE Trans. Circuit Theory, Cilt CT-19, s.253-260, Mayıs 1972.
- [5] *Kaehler, J.A.* "Periodic-switched filter networks - A means of amplifying and varying transfer functions", IEEE J. Solid-State Circuits, Cilt SC-4, s.225-230, Ağustos 1969.
- [6] *Bruton, L.T. ve R.T.Pederson,* "Time-multiplexed active filters", J. Solid-State Circuits, Cilt SC-7, Haziran 1972.
- [7] *Orfei, R. ve G.V.Pallottino,* "Networks containing periodically operated switches: A state-space approach", Int. J. Circuit Theory and Appl., Cilt 1, Aralık 1973.
- [8] *Koksal, M. ve Y.Tokad,* "On the number and the locations of switch.es to freeze the states of RC and RL networks", Proceedings of the Third International Symposium on Network Theory, Bölüm 7, s.299-306, Split, Yugoslavia, Eylül 1-5, 1975.
- [9] *Zadeh, L.A.* "Frequency analysis of variable networks", Proc. IRE, Cilt 38, s.291-299, Mart 1950.
- [10] *Koksal, M.* Analysis and Applications of Linear Circuits Containing Periodically Operated Svitches: Doktora tezi, ODTÜ Elk. Müh. Bölümü, Ankara, Mayıs 1975.
- [11] *Cantarano, S. ve G.V.Pallottino,* "Approximate Results for Networks Containing Periodically Operated Svitches", Proc. IEEE (Lett.), Cilt 57, s.2070, Kasım 1970.
- [12] *Orfei, R. ve G.V.Pallottino,* "State-space Analysis of Networks Containing Periodically Operated Svitches", Laborato di Ricerca e Tecnologia per lo Studio del Plasma Nello Spazio, Consiglio Nazionale delle Ricerche, ROMA LPS-72-22, Temmuz 1972.
- [13] *Mazumder, N.C., L.H.Hulley ve E.C.Bell,* "A Synthetic Approach to Svitching for Filte: Tuning", Int. J. Electronics, Cilt 35, s.769-787, 1973.
- [14] *Koksal, M. ve Y.Tokad,* "Equivalence Between Fast-periodic Svitched Networks and Time-invariant t Networks", Proceedings of the fifth Iranian Conference on Electrical Engineering Cilt 2, s.1599-1609, Shiraz, Ekim 27-30, 1975.
- [15] *Heinlein, W.E., K.H.Moehrman, ve U.H.Holmes,* "Double-tuned M-path Band-pass Filters Using a Single Gyrator", IEEE Trans. Circuit Theor (Corresp.), Cilt CT-18, s.728-729, Kasım 1971.
- [16] *Bruton, L.J. ve R.T.Pederson,* "Tunable RC-active Filters Using Periodically Svitched ConductanceB", IEEE Trans. Circuit Theory, Cilt CT-20, s.294-301, Mayıs 1973.
- [17] *Koksal, M. ve Y.Tokad,* "Equivalence Between Fast-periodic Svitched Networks and Time-invariant Networks", TIBIAK Marmara Araştırma Enstitüsü Elektronik Araştırma Ünitesi, Gebze Ünite tçi Rapor No: UI-75/13, Mayıs 1975.
- [18] *Koksal, M.* "Use of Periodically Operated Svitches in Electrical Networks", TIBIAK Marmara Araştırma Enstitüsü, Elektronik Araştırma ünitesi, Gebze, ünite tçi Rapor No: UI-75/07, Mart 1975.