

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİNAMİK SİSTEMLERİN BOND GRAF MODELİ VE
ENPORT SİMÜLASYONU**

Arif GÜLTEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

Bu tez,..... tarihinde , aşağıda belirtilen jüri tarafından Oybirliği/ Oyçokluğu ile Başarılı / Başarısız olarak değerlendirilmiştir.

(İmza)

(İmza)

(İmza)

Danışman;
Yrd.Doç.Dr. Mustafa Poyraz

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DİNAMİK SİSTEMLERİN BOND GRAF MODELİ VE ENPORT SİMÜLASYONU

Arif GÜLTEN

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

1996, Sayfa: 42

Bu çalışmada, dinamik sistemlerin bond graf modelleri elde edilmiş ve bu modelleri kullanarak simülasyon yapan, ENPORT paket programı yardımıyla simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarının bir kısmı farklı simülasyon metodlarıyla elde edilen sonuçlarla, bir kısmı da deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Bond graf, ENPORT

SUMMARY

Masters Thesis

BOND GRAPH MODEL AND ENPORT SIMULATION OF DYNAMIC SYSTEMS

Arif GÜLTEN

**Firat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronical Engineering**

1996, Page: 42

In this work, bond graph models of dynamic systems are obtained and their simulation are realized by using ENPORT software which makes simulation by the help of these models. Some of the simulation results are compared to results, obtained from different simulation and some results are compared to experimental results.

KEY WORDS: Bond graph, ENPORT

TEŞEKKÜR

Bu çalışma sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa POYRAZ' a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	II
SUMMARY	III
TEŞEKKÜR	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
1.GİRİŞ	1
1.1 Sistem Modelleri	1
1.2 Bond Graflar	2
1.2.1 Tanım	2
1.2.2 Enerji Kapıları	2
1.3 Kozalite(Nedensellik)	6
1.4 Bond Graf Modelinin Elde Edilmesi	7
1.4.1 Gözlem metodu	7
1.4.2 İnşa metodu	10
1.5 Çeşitli Sistemlerde Bond Graf Modelini Elde Etmenin Yolları	12
1.6 Bond Graf Modelinden Durum Denklemerinin Elde Edilmesi	13
1.7 Anahtarlama Elemanlarının Bond Graf Modeli	16
1.8 Bağımlı Kaynakların Bond Graf Modeli	16
2. ENPORT SİMÜLASYONU	18
2.1 Genel Bilgi	18
2.2 Programın Çalışması	18
2.3 Menüler	18

3. ÖRNEKLER	22
3.1 Örnek 1	22
3.2 Örnek 2	26
3.3 Örnek 3	29
3.4 Örnek 4	33
3.5 Örnek 5	36
3.6 Örnek 6	39
4. SONUÇ	41
KAYNAKLAR	42
EKLER	43



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1	Paynter gösterimi	2
Şekil 1.2	Seri çok kapılılar	3
	(a) Fiziksel bağlantı	
	(b) Bond modeli	
Şekil 1.3	Paralel çok kapılılar	4
	(a) Fiziksel bağlantı	
	(b) Bond modeli	
Şekil 1.4	Transformatör	5
	(a) Elektriksel gösterim	
	(b) Güç grafi	
Şekil 1.5	Jirator	5
	(a) Elektriksel gösterim	
	(b) Güç grafi	
Şekil 1.6	Kozalitenin anlamı	6
Şekil 1.7	Çeşitli bond graf elemanlarının kozalite tanımlamaları	6
	(a) Çaba kaynağı	
	(b) Akış kaynağı	
	(c) 0-kapısı	
	(d) 1-kapısı	
Şekil 1.8	Transformatör ve jiratorde kozalite tanımlamaları	7
Şekil 1.9	Gözlem metodu örnek devresi	9
Şekil 1.10	Örnek devrenin gözlem metoduyla bond graf modelinin çıkartılması	9
Şekil 1.11	Bond grafda sadeleşme özellikleri	10
Şekil 1.12	İnşa metodu örnek devresi	11
Şekil 1.13	Örnek devrenin bond graf modelinin inşa metoduyla elde edilşinin gösterimi	12
Şekil 1.14	Örnek devre	14
Şekil 1.15	Örnek devrenin bond graf modeli	14
Şekil 1.16	Aktif bond	16
Şekil 1.17	Bağımlı kaynakların bond graf gösterimleri	17
Şekil 2.1	ENPORT programının adım adım çalışması	19
Şekil 3.1	Örnek 1' in devresi.	22
Şekil 3.2	Devrenin bond graf modeli	22

Şekil 3.3	(a) Kapasitör geriliminin değişimi (b) Bobin akımının değişimi	23
Şekil 3.4	(a) Kapasitör geriliminin değişimi (b) Bobin akımının değişimi	20
Şekil 3.5	V_c ' nin değişimi	26
Şekil 3.6	(a)Toplamsal yükselteç (b) Bond graf modeli	27
Şekil 3.7	Çıkış geriliminin değişimi (Enport)	28
Şekil 3.8	Çıkış geriliminin değişimi (Deneysel)	28
Şekil 3.9	Serbest uyarımlı DC motor	29
Şekil 3.10	Serbest uyarımlı DC motorun direnimsel frenlemesi	30
Şekil 3.11	Endüvi akımı ve rotor açısal hızının değişimi	31
Şekil 3.12	Serbest uyarımlı DC motorun bond graf modeli	31
Şekil 3.13	Endüvi geriliminin değişimi	32
Şekil 3.14	Endüvi direncinin değişimi	32
Şekil 3.15	Endüvi akımı ve rotor açısal hızının değişimi	33
Şekil 3.16	Örnek 4' ün devresi	33
Şekil 3.17	(a)Anahtarın açık olduğu durum (b)Anahtarın kapalı olduğu durum için bond graf modeli	34
Şekil 3.18	Kapasitör geriliminin değişimi (Enport)	35
Şekil 3.19	Kapasitör geriliminin değişimi (Pspice)	36
Şekil 3.20	Örnek 5' in devresi	36
Şekil 3.21	Örnek 5' in bond graf modeli	37
Şekil 3.22	I_L ve V_c ' nin değişimi (Enport)	37
Şekil 3.23	I_L ve V_c ' nin değişimi (Pspice)	39
Şekil 3.24	Mekanik sistem	39
Şekil 3.25	Mekanik sistemin bond graf modeli	40
Şekil 3.26	X_2 yerdeğiştirmesinin zamana göre değişimi	40

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1	Bond graf elemanlarının tanımları, gösterimleri ve kotalite tanımları	8
Tablo 1.2	Dinamik sistemlerin sınıflandırılması	12
Tablo 1.3	Kütle-indüktans benzeşimi	13



1. GİRİŞ

1.1. Sistem Modelleri

Sistem dinamiği çalışmalarında ilk adım sistemlerin modelini elde etmektir. Bir sistemin, fiziksel modeli çıkarılırken uygun kabuller yapılır ve sistemin idealize edilmiş elemanlardan oluştuğu varsayılır. Temel fizik kanunları yardımıyla da elemanların davranışlarını tanımlayan lineer veya nonlinear denklemler elde edilir (Matematik model).

Bir sistem tek bir enerji ortamında oluşabileceği gibi, çoğu zaman da birden çok fiziksel ortamın enerji alışverişi yapmak üzere bir fonksiyonu yerine getiren, karmaşık bir enerji ortamında olabilir (Elektromekanik, elektro-hidro-mekanik v.b.). Aynı enerji ortamında olan fiziksel sistemlerin çözümleri daha kolay olup, bu çözüm sistem elemanlarına ilişkin fiziksel yasaların uygulanmasıyla sağlanır (Kirchoff Yasası, Newton Yasası v.b.). Karmaşık yapılı sistemlerde ise, enerji ve enerjinin birbirine dönüşümü açısından bakılırsa, enerjitik sistemler (elektrik, mekanik v.b.) ortak karakterdeki fiziksel yasalarla tanımlanırlar. Farklı fiziksel elemanlar için birbirine benzer bağıntılar tanımlanabildiğinden, bunları oluşturan fiziksel bileşenler de birbirlerine benzer olurlar. Bu ortak fiziksel özellik sonucu dinamik sistemin türü ne olursa olsun, ortak fiziksel yasa ve ilkelerin kullanılmasıyla sistemin çözümü elde edilebilir (Poyraz, 1981).

Bu çalışmada kullanılan bond graf modeliyle sistemlerin matematiksel modelini elde etmek günümüzde kullanılan son yöntemlerden biridir. Bond graf konusundaki ilk çalışma 1961 yılında Prof. H.M.Paynter tarafından yapılmıştır (Paynter, 1961). Paynter tarafından "Bond Graph" olarak adlandırılan bu yöntemdeki ana düşünce güç aktarımı ve bu aktarımın graflar yardımıyla gösterilmesidir. Bond graf ismi Prof. Dr. Necdet Şen tarafından Türkçeye "Bağlaç Diyagramları" şeklinde tercüme edilmiştir. Bağlaç diyagramları esasında C.E. Shannon(1942) ve S.J. Mason(1953) tarafından bulunmuş olan işaret akış diyagramları tekniğinden esinlenerek düşünülmüş bir lineer graf tekniğidir.

Bond graf modeli özellikle karmaşık yapıdaki sistemlerin analizinde büyük kolaylık sağlar. Verilen karmaşık yapılı sistemlerin model ve simülasyonunu elde etmede gözleme dayalı bir yol olduğundan uygulanması kolaydır.

Karmaşık yapıya sahip bir sistem, kendisini oluşturan fiziksel bileşenlerin enerji domenleri ne olursa olsun aralarındaki enerji kapıları yardımıyla birleştirilerek modellenenir. Ayrıca programlamaya uygun bir metod olması da bond grafın önemli bir üstünlüğüdür. (Poyraz, Köksal, 1995)

Bond graf topolojisi, herhangi bir fiziksel sistemin bileşenleri arasındaki güç alışverişini gösteren enerji kapılarının kurdukları operasyonel diyagrama doğrudan doğruya bakarak sistemin iç ve uç değişkenleri cinsinden bir takım matris vektör bağıntıları kurulabilmesidir. Ayrıca her bir bond bileşeni ilgili olduğu fiziksel bileşenin iç ve uç değişkenini gösterdiğinden, n tane bond bileşeni olan bir bond graf modeli $2n$ tane akış bileşeni olan bir işaret akış diyagramına dönüştürülebilir.

1.2. Bond Graflar

1.2.1. Tanım

Bir bond en ilkel olarak Şekil 1.1' de görüldüğü gibi a ve b gibi iki alt sistem ya da iki enerji kapısı arasında a' yı b' ye bağlayan bir çizgi ile gösterilir. Bond graf konusundaki ilk çalışmayı yapan Paynter tarafından tanımlanan bu gösterim a 'dan b' ye veya b' den a' ya bir $P=e \cdot f$ gücünün aktarıldığı anlamına gelir. Bu gösterimde e' ye çaba değişkeni, f' ye ise akış değişkeni adı verilir. Ok yönü gücün yönünü gösterir ve bu yön akış ve çaba değişkenlerinden bağımsızdır. Şekil 1.1' deki gösterim ilkel bir gösterimdir. Bu gösterimin bir bond graf gösterimi olabimesi için kozalitelerlendirilmesi gerekmektedir.

$$a \xrightarrow[e]{e} b \quad a \xleftarrow[f]{e} b$$

Şekil 1.1 Paynter gösterimi

1.2.2 Enerji kapıları

Bir sistemin bond graf modelini oluşturabilmek için önce o sistemin bütün enerji kapıları belirlenir. Bond grafda tanımlanmış dokuz tane enerji kapısı mevcuttur. Bunlar 0, 1, Se, Sf, R, I, C, TR, GY dir. Se, Sf enerji üreten, R, I, C ise enerji tüketen elemanlardır. Se çaba kaynağını, Sf akış kaynağını, R direnci, I indüktansı, C de kapasitansı temsil eder. 0-kapısı paralel çok kapılı, 1-kapısı ise seri çok kapılı olarak tanımlanır.

1-kapısında tek bir akış değişkeni mevcuttur ve bu kapıda bondlardaki çaba değişkenlerinin toplamı sıfıra eşittir (Şekil 1.2). Şekil 1.2' de 1-kapısının elektriksel bir devredeki karşılığı gösterilmiştir. 1-kapısı için matematiksel ifadeler (1.1) ve (1.2)' de verilmiştir (Karnopp, Margolis, Rosenberg, 1990).

$$f_1(t) = f_2(t) = f_3(t) \quad (1.1)$$

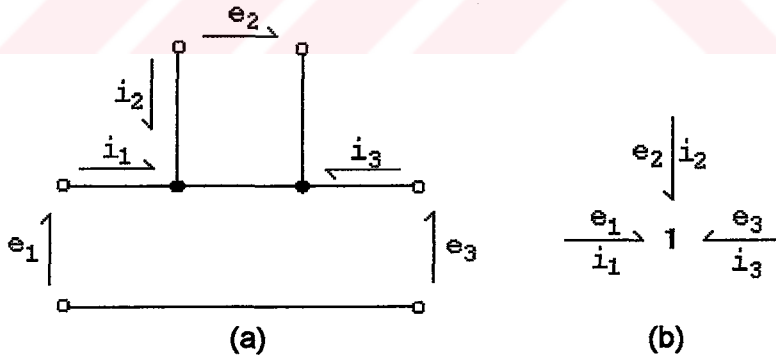
$$e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0 \quad (1.2)$$

Genel bir tanımlama yaparsak n tane bondun bağlı olduğu 1-kapısında;

$$\sum_{i=1}^n e_i = 0 \quad (1.3)$$

$$f_1 = f_2 = f_3 = \dots = f_n \quad (1.4)$$

bağıntıları geçerlidir.



Şekil 1.2 Seri çok kapılılar

(a) Fiziksel bağlantı (b) Bond modeli

Benzer şekilde 0-kapısında ise ortak bir çaba değişkeni mevcuttur ve 0-kapısına bağlı olan bondlardaki akış değişkenlerinin toplamı sıfıra eşittir. Şekil 1.3' de 0-kapısının elektriksel bir sistemdeki karşılığı verilmiştir.

0-kapısında geçerli olan matematiksel ifadesi; (Karnopp, Margolis, Rosenberg, 1990)

$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) \quad (1.5)$$

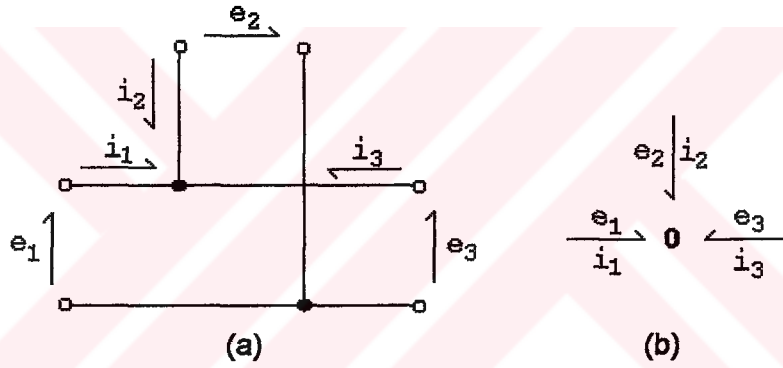
$$f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) = 0 \quad (1.6)$$

şeklindedir. n tane bondun bağlı olduğu 0-kapısı için;

$$\sum_{i=1}^n f_i = 0 \quad (1.7)$$

$$e_1 = e_2 = e_3 = \dots = e_n \quad (1.8)$$

ifade edilebilir.



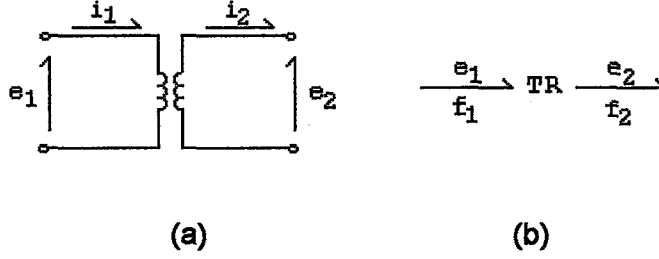
Şekil 1.3 Paralel çok kapılılar
(a) Fiziksel bağlantı (b) Bond modeli

Karmaşık yapıları sistemlerde birden fazla enerji modu bulunduğunda birden çok enerji dönüşümü var olabilir. Bu tür sistemlerde bir enerji modundan diğer enerji moduna enerji aktarımı vardır. Enerji aktarımında sistem değişkenleri belli bir oranda aynı değişkenlere dönüşüyorsa böyle bir fiziksel aktarım elemanına "fiziksel transformatör" adı verilir ve bond graf elemanı olarak -TR- ile gösterilir. Elektriksel transformatörün tanım bağıntıları (1.9) ve (1.10)'da verilmiştir;

$$e_1 = m \cdot e_2 \quad (1.9)$$

$$m \cdot f_1 = f_2 \quad (1.10)$$

Burada m dönüştürme oranıdır. Elektriksel transformatörün sembolü ve güç grafi Şekil 1.4' de görülmektedir.



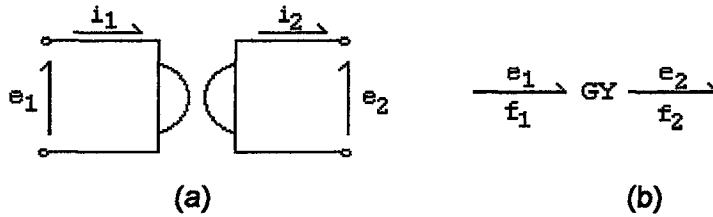
Şekil 1.4 Transformatör
(a) Elektriksel gösterimi (b) Güç grafi

Sistem değişkenlerinin bir enerji modundan diğer bir enerji moduna aktarılışı sırasında çaba değişkeni ile akış değişkeni arasında çaprazlama bir değişim oluyorsa, bu tip sistem elemanına "fiziksel jirator" adı verilir ve -JR- ile gösterilir. Elektriksel jiratorun tanım bağıntıları;

$$e_1 = r \cdot f_2 \quad (1.11)$$

$$r \cdot f_1 = e_2 \quad (1.12)$$

şeklindedir. Bu bağıntılarda r modül olarak adlandırılır. Şekil 1.5(a)' da elektriksel jiratorun gösterimi ve Şekil 1.5(b)' de ise bond graf modeli görülmektedir.

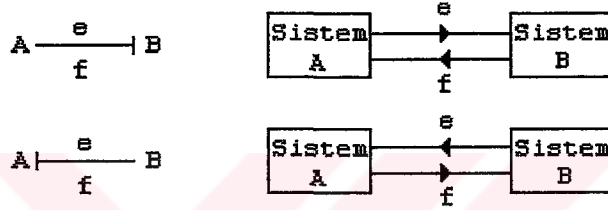


Şekil 1.5 Jirator
(a) Elektriksel gösterimi (b) Güç grafi

1.3. Kozalite(Nedensellik)

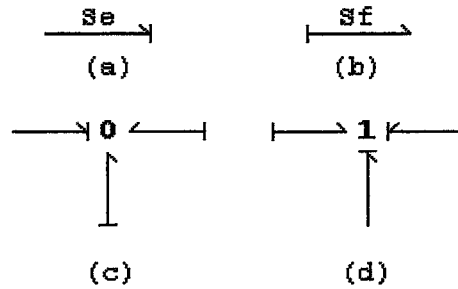
Şekil 1.1' de gösterim a' dan b' ye veya b' den a' ya bir gücün aktarımını temsil eden bir güç grafıdır. Bu güç grafına temsil ettiği sistemin özelliklerini yansıtan ve sistemin analizine yönelten yeni bir özellik eklemek gerekir ve bu da kozalite(nedensellik) olarak bilinir (Blundell, 1982).

Sebeup sonuç ilişkisinin graf üzerinde gösterilmesiyle grafın bir yerindeki herhangi bir niceliğin, grafın başka bir yerindeki niceliği etkilediği sonucunu çıkarabiliriz (Blundell, 1982).



Şekil 1.6 Kozalitenin anlamı

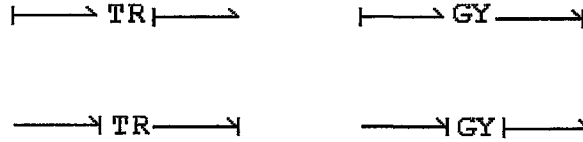
Bondlardaki kozalite belli kuralları izlemek zorundadır. Şekil 1.7'de çaba ve akış kaynaklarıyla, 0- ve 1-kapılarındaki kozalite şartları gösterilmiştir.



Şekil 1.7 Çeşitli bond graf elemanlarının kozalite tanımlamaları

(a)Çaba kaynağı (b)Akış kaynağı (c) 0-kapısı (d)1-kapısı

Enerji aktarıcılar (TF,GY) için de kozaliteler belli kurallara sahiptirler. Transformatör kozaliteyi aynı yönde iletir. Jiratör ise kozalitenin yönünü değiştirir. Yani jiratöre giren bir gerilim kozalitesi akım kozalitesi olarak çıkacaktır. (Şekil 1.8)



Şekil 1.8 Transformatör ve jiratörde kozalite tanımları

Bir sistemin bond graf modeli kozalitelenilirken ilk olarak enerji yayan ve depolayan elemanlar gözönüne alınmalıdır. Elektrik devresi için düşünürsek; dirençlerin kozalite seçimi serbesttir ve bağlı bulundukları enerji kapılarındaki diğer elemanlara göre kozalitelenilirler (Poyraz, 1981). Bond grafda tanımlanmış elemanların tanım bağıntıları ve kozalitelenilmiş gösterimleri Tablo 1.1' e görülmektedir.

1.4. Bond Graf Modelinin Elde Edilmesi

Bir sistemin bond graf modelini elde etmek için gözlem ve inşa olmak üzere iki ayrı yöntem kullanılabilir.

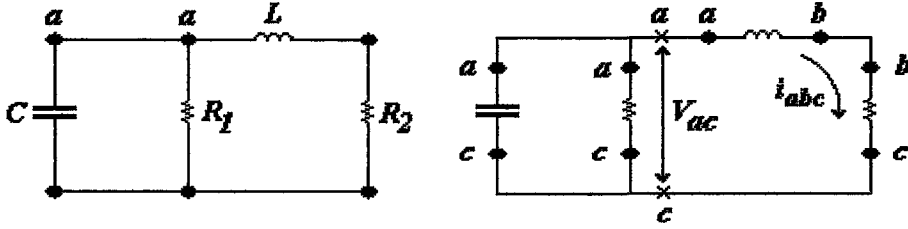
1.4.1. Gözlem metodu

Verilen bir sistemin bond graf modelini elde edebilmek için pratik bir metod olduğundan öncelikle gözlem metodu kullanılır. İlk olarak sistemdeki 1- ve 0-kapıları ile enerji modları arasındaki TR, JIR' ler belirlenir. Sistemdeki kaynak elemanları ile diğer elemaların hangi 1- ve 0-kapılarına bağlı olması

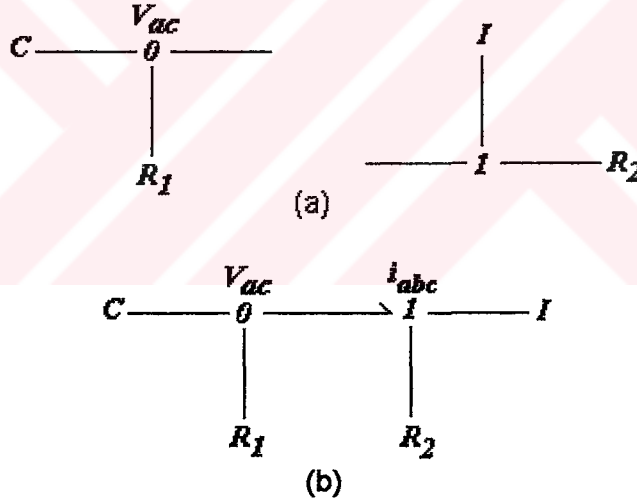
Elemanın Adı	Bond Graf	Polaritelenmiş Bond Graf	Tanım Bağintısı
Çaba Değişkeni			$e(t) = E(t)$
Akış Değişkeni			$f(t) = F(t)$
Direnç			$e = \Phi_R(f)$
Kapasite			$e = \Phi_C^{-1}(\int e dt)$ $f = \frac{d}{dt}[\Phi_C(e)]$
İndüktans			$f = \Phi_L^{-1}(\int e dt)$ $e = \frac{d}{dt}[\Phi_L(f)]$
Transformatör			$e_1 = m \cdot e_2 \quad f_2 = m \cdot f_1$ $f_1 = f_2/m \quad e_2 = e_1/m$
Jirator			$e_1 = f_2 \cdot r \quad e_2 = r \cdot f_1$ $f_1 = e_2/r \quad f_2 = e_1/r$
0-Kapısı			$e_1 = e_2 = e_3$ $f_1 = -(f_2 + f_3)$
1-Kapısı			$f_1 = f_2 = f_3$ $e_1 = -(e_2 + e_3)$

Tablo 1.1 Bond graf elemanlarının tanımları, gösterimleri ve kozalite tanımları

gerekiyorsa oraya yerleştirilir. Böylece gözleme dayanan polaritesiz model kurulmuş olur. Bu model üzerinde kaynak elemanlarının bond çizgisi üzerindeki yarım oklarının yönü 0- ve 1-kapılarına doğru seçilir. Pasif bileşenlerin yarım oklarının yönleri ise, 0 ve 1-kapılarından bu bileşenlere doğrudur. (Poyraz, 1981)



Şekil 1.9 Gözlem metodu örnek devresi



Şekil 1.10 Örnek devrenin gözlem metoduyla bond graf modelinin çıkartılması

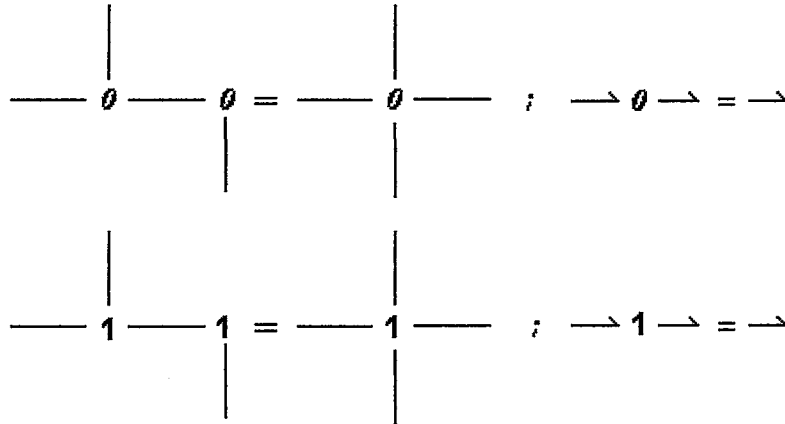
Şekil 1.9' daki elektriksel sistemin bond graf modelinin gözlem metoduyla elde edilişi Şekil 1.10' da adım adım gösterilmiştir. Başlangıç olarak aynı potansiyele sahip noktalar tespit edilir. Örneğin; devredeki C ve R_1 elemanları paralel olduğundan aynı gerilime sahiptir. R_2 ve L elemanları ise aynı akıma sahiptir, dolayısıyla seridir. Bu iki durum için bond graf karşılığı Şekil 1.10' da görülmektedir. V_{ac} ve i_{abc} ' nin referans alınan yönleri gözönüne alındığında

enerjinin 0-kapısından sistemin kalan kısmına, yani 1-kapısına doğru aktığı sonucu çıkar. İki kapı birleştirilerek bond graf modeli Şekil 1.10(b)' deki gibi elde edilir.

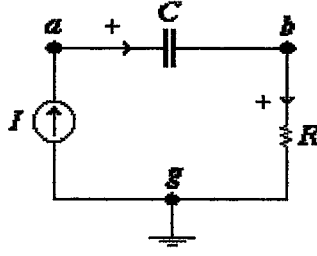
Bu metodun uygulandığındaki problem paralel ve seri bağlantıların çabucak görülememesidir. Fakat pratikte bu yöntem kullanılarak birçok devrenin bond graf modeli indirgenebilir ve elde edilebilir.

1.4.2. İnşa metodu

İnşa metodunun herhangi bir sisteme uygulandığında belirli bir yol izlenir. Bu metod elektriksel bir devre için uygulanırken sırasıyla şu işlemler gerçekleştirilir. Öncelikle devrede farklı potansiyeldeki düğümler için 0-kapısı yerleştirilir. 0-kapılarının arasına 1-kapıları konur ve bu kapılara düğümler arasındaki elemanlara (C, I, R, Se, Sf) karşılık gelen bondlar bağlanır. Bağlanan bondlara yön tayin edilir. Devre görünebilen bir sıfır potansiyeline sahipse, bunu temsil eden 0-kapısı ve buna bağlı olan bütün bondlar grafdan çıkartılır. Görünebilen bir sıfır potansiyeli mevcut değilse, herhangi bir 0-kapısı seçilir ve aynı işlemler bu kapı için yapılır. Son olarak bond graf tekniğinin Şekil 1.11' deki sadeleşme özellikleri kullanılarak model sade bir hale getirilir.

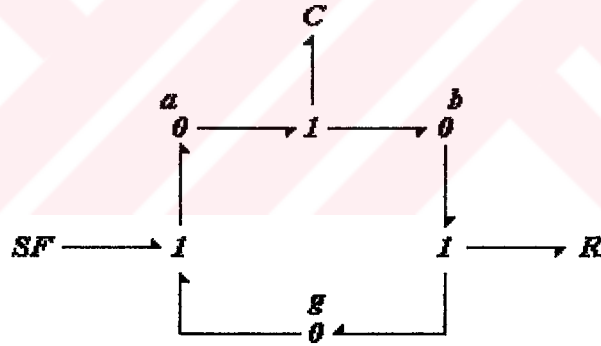


Şekil 1.11 Bond grafda sadeleşme özellikleri

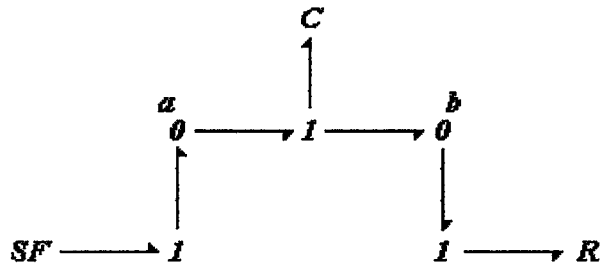


Şekil 1.12 İnşa metodu örnek devresi

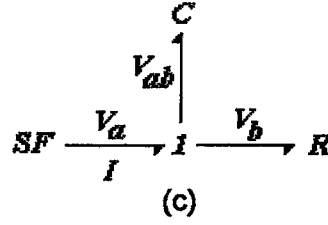
Bu yöntemin Şekil 1.12' deki devreye uygulanışı Şekil 1.13' de adım adım gösterilmiştir. Öncelikle her iki uçlunun uçlarına birer düğüm düşünülür ve 0-kapısı yerleştirilir. Bu düğümler arasına her iki uçlu eleman 1-kapısıyla bağlanmır.(Şekil 1.13(a)) Daha sonra referans düğüme karşılık gelen 0-kapısı kaldırılır. (Şekil 1.13(b)) Son olarak sadeleşme özellikleri kullanılarak devrenin bond graf gösterimine ulaşılır.(Şekil 1.13(c))



(a)



(b)



Şekil 1.13 Örnek devrenin bond graf modelinin, inşa metoduyla elde edilşinin adım adım gösterilmesi

1.5. Çeşitli Sistemlerde Bond Graf Modelini Elde Etmenin Yolları

Bir sistemin bond graf modelini elde etmek için 0- ve 1-kapılarının belirlenmesi gereklidir. Elektriksel olmayan sistemlerde bu kapıların belirlenmesinde zorluklar çıkabilir. Bunun için akış değişkeninin ortak noktaları 1-kapısı olarak, çaba değişkeninin ortak noktaları ise 0-kapısı olarak belirlenmelidir. Tablo 1.2' de çeşitli sistemlerdeki çaba ve akış değişkenlerinin sınıflandırılması görülmektedir.

Enerji Domeni	Akış Değişkeni	Çaba Değişkeni	Integral Akış Değişkeni	Integral Çaba Değişkeni
Elektrik	Akım I	Gerilim V	Yük	Akı
Mekanik (Öteleme)	Kuvvet F	Hız V	Momentum P	Yer Değiştirme X
Mekanik (Dönme)	Dönme Momenti T	Dönme Hızı	Açısal Momentum	Açısal Yer Değiştirme
Akışkan	Debi Q	Basınç P	Hacim V	Basınç Momentumu
Isıl	Isı Akış Hızı q	Isı T		

Tablo 1.2 Dinamik sistemlerin sınıflandırılması

Mekanik sistemde hız kaynakları 0-kapılarına, kuvvet ve moment kaynakları da 1-kapılarına bağlanır. Elektrik ve hidrolik sistemlerde akış değişkeni tipi kaynaklar 0-kapılarına, çaba değişkeni tipi kaynaklar ise 1-kapılarına bağlanır. Kurulan bond graf modeli üzerinde; mekanik sistemler için sıfır hız noktaları ile yer hızı, sıfır kabul edilerek bond grafdan çıkartılır. Elektrik sistemlerde de yer potansiyeli ile sıfır potansiyeli noktaları, hidrolik sistemlerde ise atmosfer basıncında olan noktalar bond grafdan çıkartılır. Ayrıca üzerinde başka eleman bulundurmeyen 1- ve 0-kapıları, daha önce verilen sadeleşme özelliklerinden faydalanılarak bond grafdan çıkartılır ve indirgenmiş bond graf modeli elde edilir. (Poyraz, 1981)

Bond graf tekniğinin elektrik, mekanik, hidrolik ve diğer sistemlere uygulanışında kontrol sistemlerindeki kütle-indüktans benzeşiminden yararlanılır. Bu benzeşim Tablo 1.3' de görülmektedir.

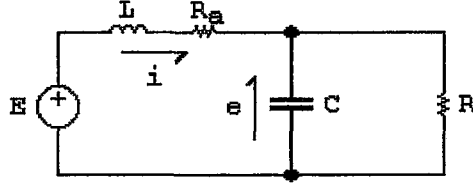
Ötelemeli Mekanik	Dönmeli Mekanik	Elektrik	Hidrolik
Kuvvet F	Dönme Momenti	Gerilim V	Basınç P
Hız V	Açısal Hız ω	Akım I	Debi Q
Kütle M	Dönel Kütle I	İndüktans L	Hacim V
Yay $1/K$	Dönel Yay $1/K$	Kapasitans C	İnertans L_b

Tablo 1.3 Kütle-indüktans benzeşimi

1.6. Bond Graf Modelinden Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

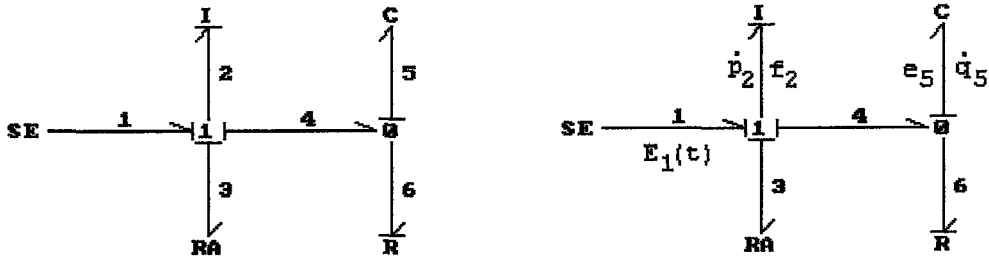
Bond graf modeli üzerine bir matematik model kurarken, graf üzerindeki 1- ve 0-kapıları belirlenir. Her 1- ve 0-kapısının alabileceği çaba ve akış

değişkenleri uygun notasyonlarla belirtilir. Sistem yapısına göre bağımlı 1- veya 0- noktaları gözönüne alınmayarak diğer 1- ve 0- noktaları için uygunluk ve süreklilik denklemleri yazılır. Böylece çaba ve akış değişkenleri ile sistemin durum değişkenlerini temsil eden denklem takımı elde edilir. (Poyraz, 1981)



Şekil 1.14 Örnek devre

Bond graf modeli elde edilmiş bir sistemin durum denklemleri sistematik bir yolla çıkartılır. Sistem küçük boyuttaysa veya karmaşık değilse durum uzay denklemleri kolaylıkla elde edilir. Fakat sistemin karmaşık olduğu durumda belli bir yol izlemek gerekir. Örneğin; Şekil 1.14' deki devrenin bond graf modeli Şekil 1.15' deki gibi bulunmuş ve durum denklemlerinin çıkartılması adım adım gösterilmiştir. (Rosenberg, Karnopp, 1983)



Şekil 1.15 Örnek devrenin bond graf modeli

Şekil 1.15' deki bond graf modelinde p_2 bobinin akışını, q_5 ise kapasitörün yükünü temsil etmektedir.

İlk olarak durum değişkenlerimiz p_2 ve e_5 ile çaba ve akış değişkenleri arasındaki ilişkiyi yazarsak;

$$f_2 = \frac{p_2}{I_2} \quad (1.13)$$

$$e_5 = \frac{q_5}{C_5} \quad (1.14)$$

elde edilir. 1-kapısı için gerilimler arasındaki bağıntı;

$$\dot{p}_2 = E_1(t) - e_3 - e_4 \quad (1.15)$$

olarak yazılabilir. 0-kapısı için bütün gerilimler eşit olduğundan e_4 gerilimi yerine e_5 gerilimini yazabiliriz. Bu durumda;

$$\dot{p}_2 = E_1(t) - \frac{R_3 \cdot p_2}{I_2} - \frac{q_5}{C_5} \quad (1.16)$$

denklemini elde edilir. 0-kapısı için ise akımlar arasındaki bağıntı;

$$\dot{q}_5 = f_4 - f_6 = f_2 - \frac{e_6}{R_6} = f_2 - \frac{e_5}{R_6} \quad (1.17)$$

şeklinde olur. (1.13) denklemini (1.17) denkleminde yerine konursa;

$$\dot{q}_5 = \frac{p_2}{I_2} - \frac{q_5}{R_6 \cdot C_5} \quad (1.18)$$

elde edilir. (1.18) ve (1.16) denklemleri düzenlenirse durum denklemleri (1.19) ve (1.20)' deki gibi olur.

$$\dot{p}_2 = -\frac{R_3}{I_2} \cdot p_2 - \frac{1}{C_5} \cdot q_5 + E_1(t) \quad (1.19)$$

$$\dot{q}_5 = \frac{1}{I_2} \cdot p_2 - \frac{1}{R_6 \cdot C_5} \cdot q_5 + 0 \cdot E_1(t) \quad (1.20)$$

Burada durum değişkenleri p_2 ve q_5 giriş ise $E(t)$ ' dir.

$$X = \begin{bmatrix} p_2 \\ q_5 \end{bmatrix} \quad U = [E_1(t)]$$

1.7. Anahtarlama Elemanlarının Bond Graf Modeli

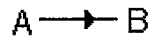
Bond grafda çeşitli anahtarlama elemanlarının(tristör, röle, diyot v.b.) modellenmesinde farklı metodlar uygulanır. Örneğin en çok kullanılan anahtarlama elemanlarından olan diyodun modellenmesinde, bazı otoriteler diyodun akım-gerilim karakteristiği olan $i=f(u)$ ' yu lineer olmayan R elemanı kullanarak modellemeyi tavsiye ederler. R direncinin değeri açık (on) konumunda çok küçük veya sıfırdır. Diyot kapalı (off) iken de bu direncin değeri yüksektir. (Buisson1993)

İkinci bir metod ise, anahtarlama elemanlarını modüle edilmiş ransformatörlerle birleştirilen R elemanlarıyla modellenmesidir. Modülasyon oranı anahtarın durumuna bağlı olarak iki ayrı değer alır.

Diğer bir çözüm ise, anahtarlama elemanlarını çaba veya akış kaynakları kullanarak modellemektir. Açık (on) pozisyonda diyot küçük değerli bir (0,6 V) çaba kaynağıyla, kapalı (off) pozisyonda ise yine küçük değerli bir negatif akış kaynağıyla modellenebilir. İdeal anahtarlar için bu kaynakların değerleri sıfır olur. (Buisson1993)

1.8. Bağımlı Kaynakların Bond Graf Modeli

Bağımlı kaynaklar olarak adlandırılan devre elemanları devredeki herhangi bir akımın ya da gerilimin etkilediği türde kaynaklardır. Örneğin; bir bağımlı gerilim kaynağının gerilimi sistemde uzak bir noktadaki diğer bir akım veya gerilim tarafından etkilenebilir. Etki tek yönlüdür ve bir sinyal yoluylaadır. Herhangi bir geri etki mevcut değildir. Yani tek yönlü bir iletişim sözkonusudur.

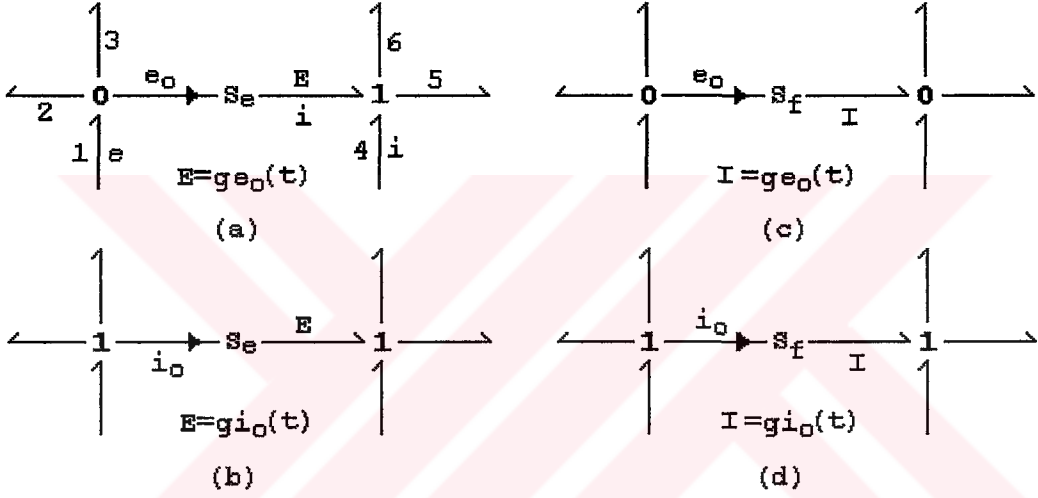


Şekil 1.16 Aktif bond

Aktif bond sinyal akış şemaları veya blok diyagramlardaki bir sinyal gibidir. Tam bir ok ile gösterilir ve bu notasyon blok diyagramlardan alınmıştır.

Normal bir bond çaba ve akış olmak üzere iki sinyale sahiptir. Fakat aktif bir bond tek bir yönde iki sinyalin sadece biriyle ilişkilidir.

Örneğin Şekil 1.17' deki gerilim bağımlı gerilim kaynağı sistemin herhangi bir yerindeki bir gerilim tarafından kontrol edilmektedir. Aktif bond 0-kapısından geldiği için gerilim e_0 , e_1 , e_2 ve e_3 ile aynı gerilimdir. Bununla birlikte aktif bond bir güce sahip değildir. Çünkü e_0 ' a karşılık gelen akımı ihmal edilebilir olarak düşünülebilir. 0-kapısındaki akım toplamı sadece i_1 , i_2 ve i_3 ' ü içerir. Diğer taraftan kaynak sonlu E-i gücüne sahiptir. Bu durumda bağımlı kaynağın dahili bir güce sahip olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 1.17 Bağımlı kaynakların bond graf gösterimleri

- (a) Gerilim bağımlı gerilim kaynağı (b) Akım bağımlı gerilim kaynağı (c) Gerilim bağımlı akım kaynağı (d) Akım bağımlı akım kaynağı

2. ENPORT SİMÜLASYONU

2.1. Genel Bilgi

Bond graf modeli elde edilmiş bir sistemi simüle etmek için çeşitli paket programlar mevcuttur. ENPORT' da bunlar arasında yer alır ve yaygın olarak kullanılır.

ENPORT blok diyagram veya bond graf modelini esas alarak simülasyon yapan bir paket programdır. Bond grafla ilk simülasyon IBM bilgisayarları üzerinde ENPORT programı kullanılarak yapılmıştır (Karnopp ve Rosenberg, 1968). Program zamanla daha da ilerletilerek çeşitli versiyonları çıkarılmıştır. Bu çalışmada ENPORT programının 4.2. versiyonu kullanılmıştır. Bu versiyon 286, 386 ve daha üstü IBM veya IBM uyumlu PC' lerde çalıştırılabilir. Bunun yanısıra 512 KB hafıza, grafik renk adaptörü (CGA, VGA, EGA) ve yaklaşık 1.2 MB disk alanı gibi özelliklere sahip olan tüm bilgisayarlarda kullanılabilir.

2.2. Programın Çalışması

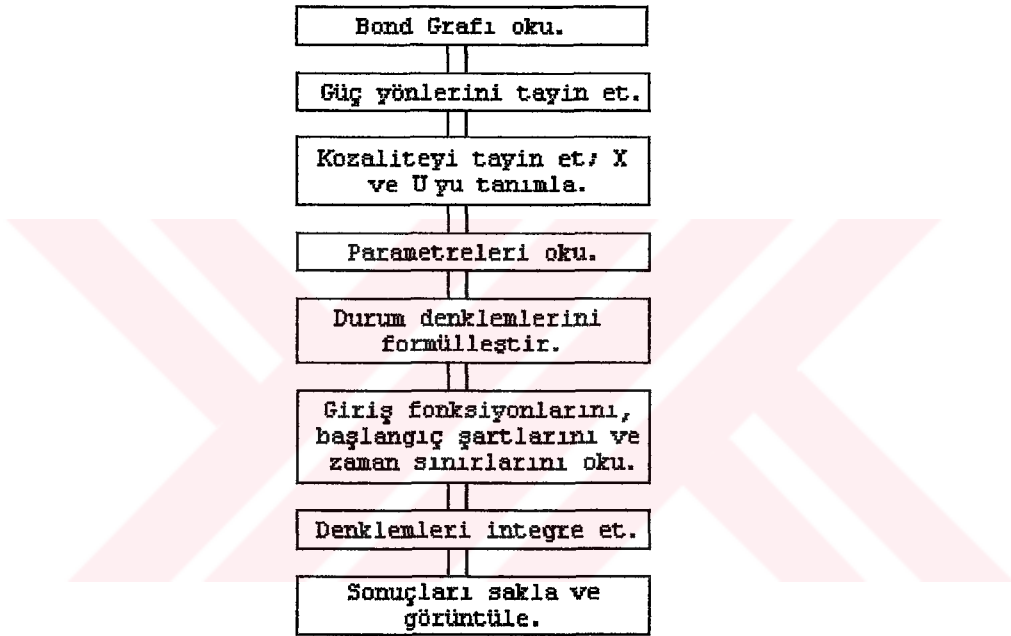
Bond graf modelinden faydalanarak simülasyon yapan programlar çalışırken kendi içerisinde belli bir yolu takip ederler. ENPORT' un çalışırken izlediği yol Şekil 2.1' de gösterilmiştir (Rosenberg, Karnopp.1983). Sıralanan adımların gerçekleşebilmesi için programa bond grafın, parametrelerin, giriş fonksiyonlarının, başlangıç şartlarının, zaman sınırlarının ve diğer bilgilerin girilmesi gereklidir. İşte bu bilgiler ENPORT' da çeşitli menüler altında yapılır. Bu menüler; File, Graph, Equation, Analyse, Solve, Display, Utils, Leave olmak üzere sekiz tanedir.

2.3. Menüler

File: Bu menü altında yeni bir model oluşturmak için (New model) opsiyonu seçilir veya 'load from file' opsiyonu ile mevcut modellerden herhangi

biri yüklenir. Yine bu menünün altında, model hakkında çeşitli bilgilerin yazılabileceği (edit description) bir seçenek de mevcuttur.

Model dosyaları .ENP uzantılı metin dosyalarıdır ve \ENPORTPC\MODEL dizini içerisinde saklanırlar. Dışarıdan .ENP uzantılı yeni bir model eklendiğinde (Add new file name) seçeneği işaretlenerek bu modelin programa tanıtılması gerekir. Aksi halde model program tarafından yüklenmez. Yine bu menü altında, (Delete file) seçeneği kullanılarak herhangi bir model dosyası silinebilir.



Şekil 2.1 ENPORT programının adım adım çalışması

Graph: Bir sistem grafi bu menü altında oluşturulur. Add seçeneği kullanılarak düğümler ve bu düğümler arasına yerleştirilecek bağlantılar eklenir. Çıkarılacak düğüm ve bağlantılar için ise (Delete) seçeneği kullanılır.

Dokuz tane standart bond graf düğüm tipi mevcuttur. Bunlar Se, Sf, C, I, R, TF, GY, 0, 1' dir. Ayrıca sekiz tane de standart blok mevcuttur. Bunlar ise Source, Sink, Distributor, Summer, Gain, Integrator, Function, Transfer Function' dır. Blok düğümlerini diğer tip düğümlerden ayırt etmek için dikdörtgen çerçeve içerisinde gösterilir.

Düğüm, bond ve sinyallere çeşitli isimler verilir. Bu isimler verilirken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Düğüm isimleri bir harfle başlamalı ve en fazla 8 karakter olmak üzere alfanümerik karakterlerden oluşmalıdır. Bağlantı elemanları ise ya bondlar ya da sinyallerdir. Sinyal isimleri bir harfle başlamalı, en fazla 6 alfanümerik karakterden oluşmalıdır. Bond isimleri için harfle başlama zorunluluğu yoktur ve en fazla 5 alfanümerik karakterden ibaret olmalıdır.

Equation: Sistem grafi graph menüsü altında oluşturulduktan sonra grafin bir veya birden fazla denkleme sahip olabilen her düğümü, kısmi olarak ya da tamamen tanımlanmalıdır. Belli düğüm tipleri kısmi olarak veya tamamen tanımlı denklemlere sahiptir. Diğerleri ise kullanıcı tarafından giriş yapılarak tanımlanır. Denklemleri tanımlamak için (Edit equations) opsiyonu seçilir ve düğümler burada isteğe göre tanımlanır. Denklemlerin tanımında kolaylık sağlaması için isimlendirilmiş parametreler kullanılabilir. Bu parametreler sabit olarak girilir. Sistem farklı parametreler için çözdürüleceği zaman denklemlerin yeniden tanımlanması yerine, kullanılan isimli parametrelerin değerleri değiştirilir ve bu da kullanıcıya büyük kolaylık sağlar. Sistem denklemleri .SEQ uzantılı bir dosyaya yazılabilir ve bu dosyalar \ENPORTPC\SEQ dizini içerisinde saklanır.

0, 1, Dist, Sink, Integrator düğüm tipleri graf tarafından tanımlanan denklemlere sahiptir. C, I, R denklemlerini tanımlamak gerekir. Aynı şekilde Se, Sf, SRC düğümleri de kullanıcı tarafından tanımlanmalıdır. TF, GY düğüm tipleri için ise sadece modül değerlerinin belirtilmesi yeterli olur.

Analyse: Bu menü altında lineer olmayan bir modeli lineerleştirmek ve özdeğerlerle özvektörlerini hesaplatmak için gerekli opsiyonlar mevcuttur. Modelin lineer olması durumunda bile durum uzay modeli matrisleri A, B, C, D' yi oluşturmak için model lineerleştirilmelidir. Lineerleştirilmiş bir modelin A, B, C, D matrisleri ile özdeğerleri ve özvektörleri menüden seçilerek görülebilir. Ayrıca istendiğinde .ABC uzantılı bir dosyaya isim de vermek suretiyle \ENPORTPC\ABC dizini içerisinde saklanabilir.

Solve: Bir modelin çözümü için değişik aşamalardan geçilmesi gerekir. İlk basamak diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılacak sayısal analiz metodunun belirlenmesidir. Bu amaçla programda mevcut olan Dört Adımlı Runge-Kutta, Euler, Stiff, Nonstiff sayısal analiz metodlarından biri seçilir. Analizin başlangıç ve bitiş zamanları ile sonuçların saklanacağı aralık girilir. Son aşama olarak da çözüm yaptırılır. Ayrıca durum değişkenlerine başlangıç şartları da bu menü altında verilir.

Display: Çözdürülen sistemdeki bir ya da birden fazla değişken (en fazla 6) ya grafik olarak çizdirilebilir ya da tablo formunda görüntülenebilir. Tablo halinde görüntülenen veriler aynı şekilde bir dosyaya yazılabilir ve \ENPORTPC\SEQ dizini içerisinde saklanabilir. Bu dosyalar kullanılarak ,GRAPHER, ASEASY gibi programların özelliklerinden yararlanmak suretiyle çizimler yapılır ve istenilen şekilde düzenlenir.

Utils: ENPORT 'un çeşitli özelliklerinin ve sınırlarının hakkında bilgilerin mevcut olduğu menüdür. Programda yüklü olan modelin de bazı özelliklerini (düğüm sayısı, bond sayısı, denklem sayısı v.b.) bu modelin altında görebiliriz. Bir sistem çözdürülürken herhangi bir hata meydana geldiğinde bu hatayı ayıklamak için Debugging opsiyonu da mevcuttur. Ayrıca grafik renk adaptörlerinin seçimide bu menü altında yapılır.

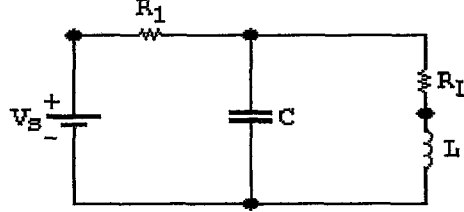
Leave: Programdan ayrılıp DOS ortamına dönmeyi sağlar.

Programda girilen modellerin üst sınırları ise şöyle sıralanır. En fazla 100 düğüme, 100 bağlantıya, 60 isimli parametreye, 220 denkleme, 440 toplam denklem girişine, 440 toplam denklem parametresine, 15 durum değişkenine, 15 kaynak girişine, 20 çıkışa sahip bir model için çözüm yapılabilir.

Bond graf modeli elde edilmiş herhangi bir sistemi ENPORT programı ile simüle etmek için izlenecek yol ise şöyledir. Bond graf modeli Graph menüsü altındaki çizim özellikleri kullanılarak elde edilir. Daha sonra Equation menüsü ile denklemlerin tanımlamaları yapılır. Sistemin durum uzay gösterimi elde edilmek isteniyorsa Analyse menüsü altında lineerleştirme seçeneği kullanılır.Çözüm kısmında Solve menüsü kullanılarak çözdürülmek istenilen aralık ve başlangıç şartları girilir .Çözümünden sonra da değişkenlerin grafikleri Display menüsü kullanılarak elde edilir. Programın kendisine ait grafik çizim kısmı eksenlere sayısal değerler yazma özelliğine sahip olmadığından çeşitli çıktıların gösteriminde kullanılmamış, verilerin ölçekli çizimi için GRAPHER programından faydalanılmıştır.

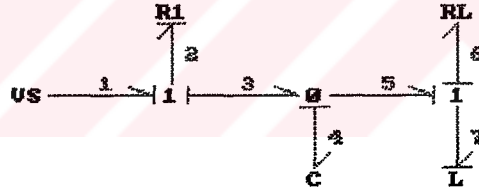
3. ÖRNEKLER

3.1. Örnek 1



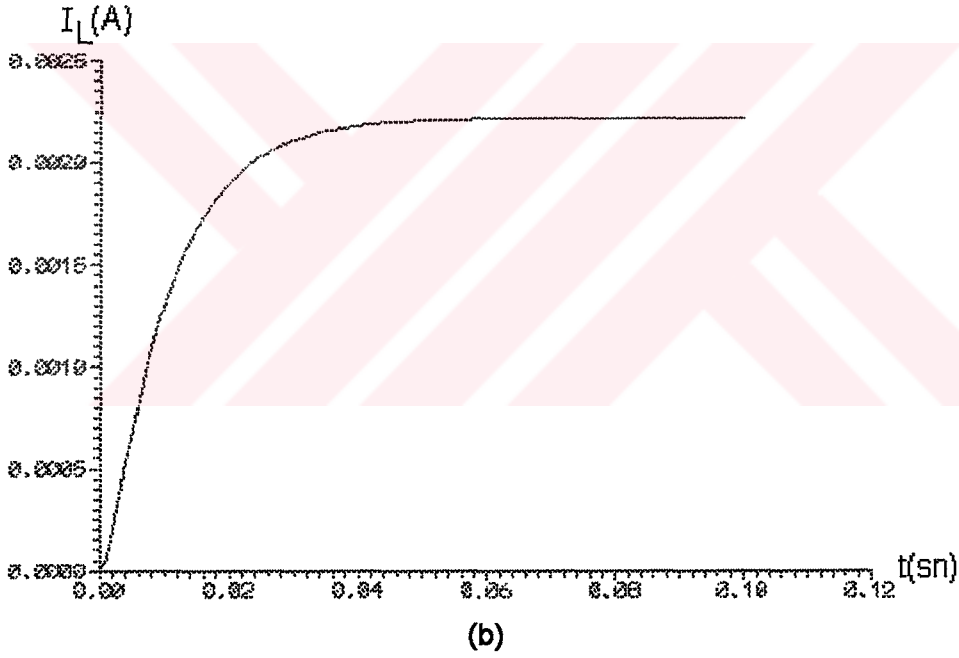
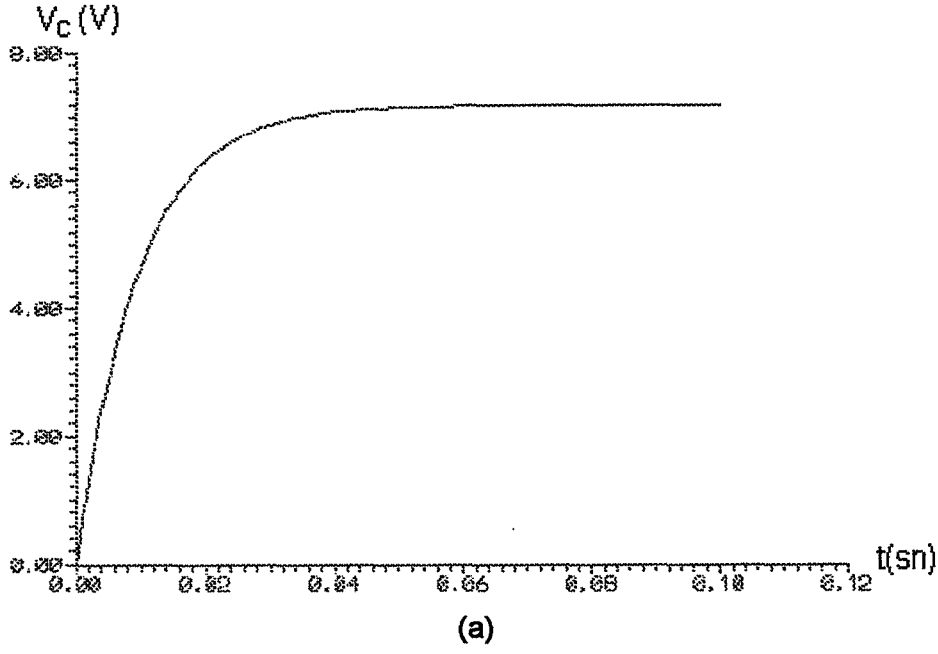
Şekil 3.1 Örnek 1'in devresi

Bu devrenin öncelikle ENPORT ile analizi yapılmıştır. Bu analiz için gerekli olan bond graf modeli Şekil 3.2' deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.2 Devrenin bond graf modeli

Elde edilen bond graf modeli $V_S=20,5V$, $R_1=6\text{ K}\Omega$, $C=4,956\text{ }\mu F$, $R_L=3,24\text{ K}\Omega$, $L=4,12\text{ H}$ değerleri için ENPORT ile çözdürülerek, veriler GRAPHER programı kullanılarak çizdirilmiştir. Kapasitör geriliminin ve bobin akımının değişimi Şekil 3.3' de görülmektedir.



Şekil 3.3 (a)Kapasitör geriliminin değişimi (b)Bobin akımının değişimi

ENPORT' da durum değişkenleri kapasitör yükü ve bobin akısı cinsinden elde edilmektedir. Devrenin durum değişkenleri işlem yaparak çekilirse;

$$\frac{dQ_c}{dt} = -\frac{Q_c}{R_1 \cdot C} - \frac{\phi_L}{L} + \frac{V_s}{R_1} \quad (3.1)$$

$$\frac{d\phi_L}{dt} = \frac{Q_c}{C} - \frac{R_L \cdot \phi_L}{L} \quad (3.2)$$

Devre elemanlarının daha önce kullanılan değerleri yerine konursa denklem (3.3) ve (3.4) elde edilir.

$$\frac{dQ_c}{dt} = -33.62927 \cdot Q_c - 0.242718 \cdot \phi_L + 1.6666E - 03 \cdot V_s \quad (3.3)$$

$$\frac{d\phi_L}{dt} = 201775.625 \cdot Q_c - 786.4 \cdot \phi_L \quad (3.4)$$

Bu durumda devrenin özdeğerleri $| \lambda I - A | = 0$ ' dan

$$\lambda_1 = -105,562$$

$$\lambda_2 = -714,4672$$

olarak bulunur. $(A - \lambda_1 \cdot I) \cdot x = 0$ ve $(A - \lambda_2 \cdot I) \cdot x = 0$ dan özvektörler elde edilir ve matris formunda yazılırsa

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 296,363 & 2805 \end{bmatrix}$$

Kapasitör gerilimi ve bobin akımının zamana göre değişimleri ise;

$$V_c(t) = 7,188 - 7.3 \cdot e^{-105,562 \cdot t} + 0,114 \cdot e^{-714,4672 \cdot t} \quad (3.5)$$

$$I_L(t) = 2,2186 \cdot 10^{-3} - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-105,562 t} + 3,8463 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-714,4672 t} \quad (3.6)$$

şeklinde elde edilir.

Durum denklemlerin katsayı matrisleri A ve B ve çıkış denklemlerinin katsayı matrisleri C ve D ile özdeğerler, özvektörler ile ilgili bilgileri içeren ENPORT programına ait çıktılar EK 1' de verilmiştir.

Aynı devrenin PSPICE ile analizi için yazılan program aşağıda görülmektedir.

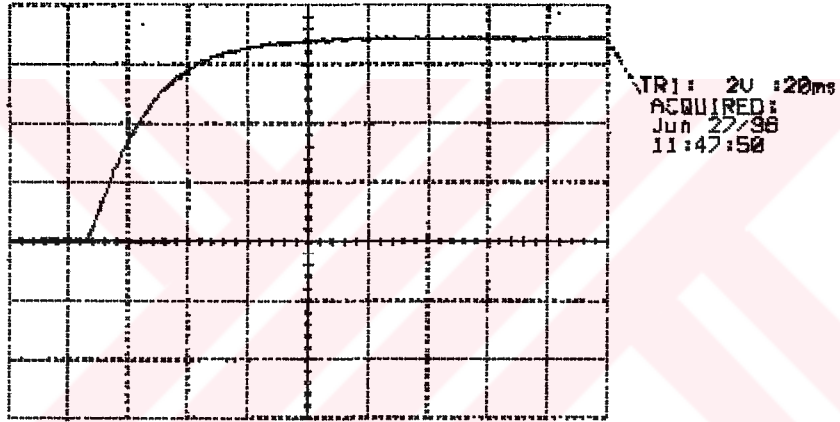
```
Vs 1 0 20.5
R1 1 2 6K
C 2 0 4,956UF
RL 2 3 3,24K
L 3 0 4,12H
.TRAN 1MS .1s UIC
.PRINT TRAN V(C), I(L)
.PROBE
```

.END

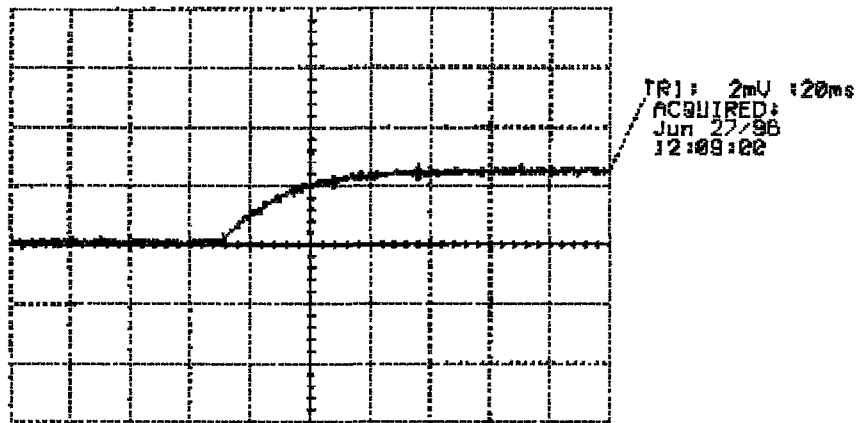
ENPORT ve PSPICE ile elde edilen verileri analitik sonuçlarla karşılaştırmak için bazı değerler aşağıda listelenmiştir.

Zaman	Analitik	Enport	Pspice
2.000E-02	6.3040600	6.3041E+00	6.305E+00
2.100E-02	6.3926144	6.3927E+00	6.398E+00
2.200E-02	6.4722972	6.4724E+00	6.474E+00
2.300E-02	6.5439973	6.5441E+00	6.549E+00
2.400E-02	6.6085143	6.6086E+00	6.610E+00

Deneysel sonuç için aynı devre kurularak hafızalı osiloskop ile I_L V_C ' nin değişimi Şekil 3.4' deki gibi elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.4 (a) Kapasitör geriliminin değişimi (b) Bobin akımının değişimi

Devredeki elemanların nonlinear karakterde olması durumunda ise bond graf modelinde herhangi bir değişiklik olmayacak sadece devre elemanları program mantığına uygun şekilde tanımlanacaktır.

Örnek 1' deki devrede, elemanlardan herhangi birinin nonlinear olduğu üç farklı durum için kapasitans üzerindeki gerilim Şekil 3.5.' de ayrı ayrı çizdirilmiştir.

Nonlinear kapasitans için

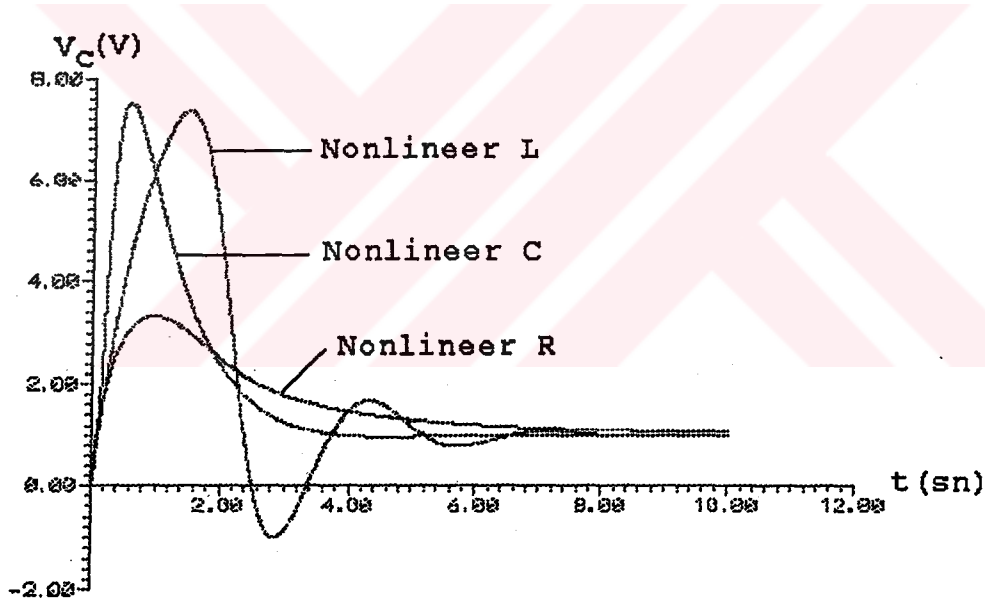
$$C(q)=1/q, R_1=1\Omega, R_L=1/9\Omega, L=1H, V_s=10V$$

Nonlinear bobin için

$$i_L=p^5/k, k=9^4, R_1=1\Omega, R_L=1/9\Omega, C=1F, V_s=10V$$

Nonlinear direnç için

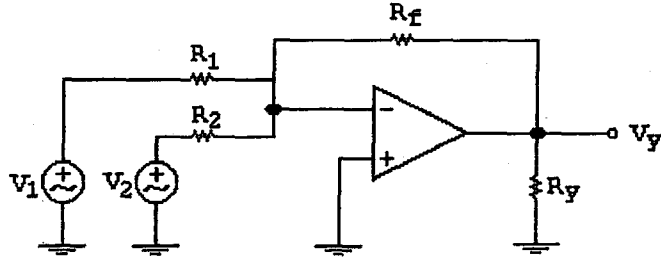
$$i_1 = \frac{V_1^{4.5}}{2187}, R_L=1/9\Omega, L=1H, C=1F, V_s=10V$$



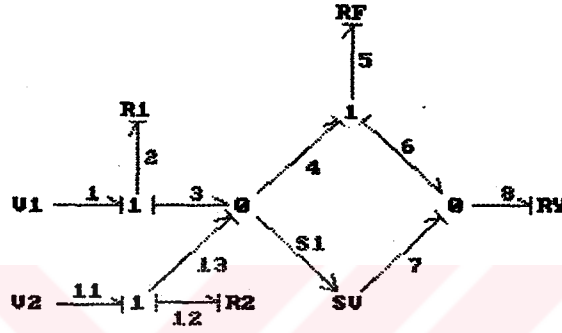
Şekil 3.5 Kapasitör geriliminin değişimi

3.2. Örnek 2

Bu örnekte ise Şekil 3.5' de görülen toplamsal yükselteç bir opampın bond graf modeli elde edilmiş ve analizi yapılmıştır. Devrenin bond graf modeli Şekil 3.6' da görülmektedir.



(a)



Şekil 3.5 (a)Toplamsal yükselteç
(b)Toplamsal yükseltecin bond graf modeli

$V_1 = 4 \cdot \sin(100 \cdot t)$, $V_2 = 2 \cdot \sin(100 \cdot t)$, $R_1 = 100K\Omega$, $R_2 = 100K\Omega$, $R_f = 100K\Omega$, $R_y = 100K\Omega$ değerleri için çıkış geriliminin değişimi Şekil 3.7' de görülmektedir. ENPORT' a ait grafik çizim özelliğiyle elde edilen çıktılar ise EK 2' de verilmiştir.

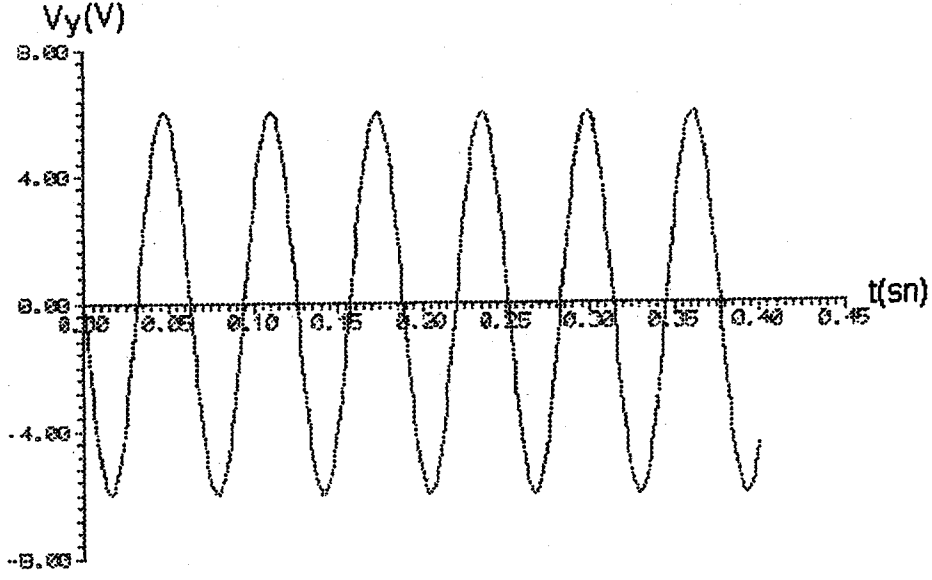
Toplam alıcı yükselteç bir opamp için çıkış gerilimi;

$$V_y = -\left(\frac{R_f}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R_f}{R_2} \cdot V_2\right) \quad (3.7)$$

dir. Buradan çıkış gerilimi teorik olarak;

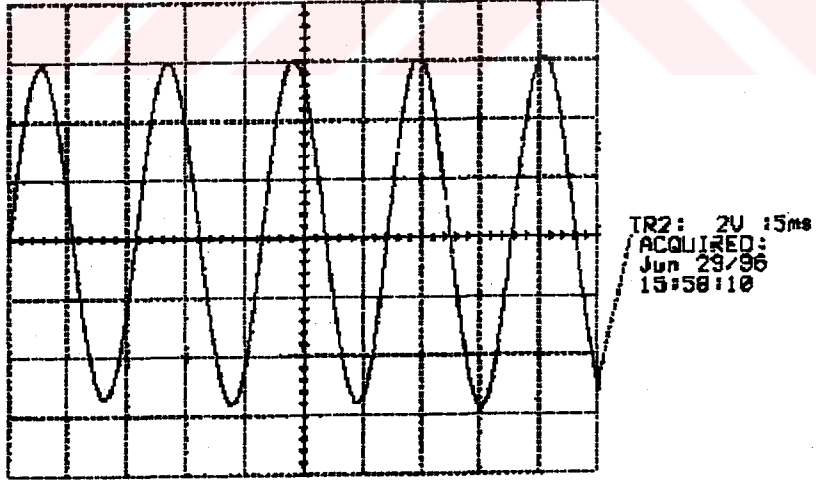
$$V_y = -6 \cdot \sin(100 \cdot t) \quad (3.8)$$

şeklindedir.



Şekil 3.7 Çıkış geriliminin değişimi (Enport)

Aynı değerler kullanılarak devrenin deneysel çalışması hafızalı osiloskop yardımıyla yapılmış ve çıkış gerilimi Şekil 3.8' deki gibi elde edilmiştir.



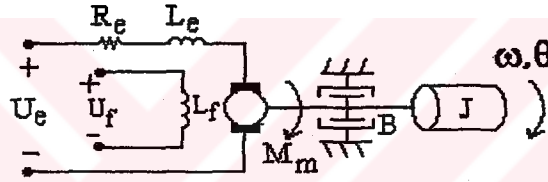
Şekil 3.8 Çıkış geriliminin değişimi(deneysel)

3.3. Örnek 3

Serbest uyarımlı bir doğru akım motorunun frenlemesinin iki ayrı metodla analizi bu örnek için gerçekleştirilmiştir.

Sabit serbest uyarmalı doğru akım makinasının denklemlerini lineer olarak yazabilmek için aşağıdaki ihmal ve varsayımları yapmak gerekmektedir.

1. Fırçalar nötr konumdadır.
2. Endüvi reaksiyonu ihmal edilmektedir.
3. Doyma ihmal edilmektedir.
4. Makina parametreleri sabit olup ısı ve akımla değişmemektedir.
5. Tüm kayıplar hıza bağlı değildir. Bunlar endüvi direnci içinde gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Serbest uyarımlı DC motor

Bu varsayımlar ve Şekil 3.9' daki tanımlamalarla serbest uyarmalı doğru akım makinasının denklemleri şöyledir; (Poyraz, Özdemir, Gülten 1995)

$$U_e(t) = I_e(t) \cdot R_e + L_e \cdot \frac{dI_e(t)}{dt} + E_e(t) \quad (3.9)$$

$$E_e(t) = K \cdot \omega(t) \quad (3.10)$$

$$M_m(t) = K \cdot I_a(t) \quad (3.11)$$

$$M_m(t) - M_y = J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + B \cdot \omega(t) \quad (3.12)$$

(3.10) denklemi (3.9)' da (3.11) denklemi de (3.12)' de yerine konularak elde edilen denklemler düzenlenirse;

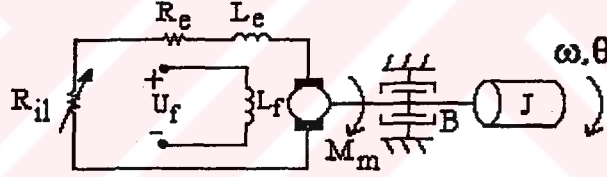
$$\frac{dI_e(t)}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot U_e(t) - \frac{R_e}{L_e} \cdot I_e(t) - \frac{K}{L_e} \cdot \omega(t) \quad (3.13)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{1}{J} \cdot M_y + \frac{K}{J} \cdot I_e(t) - \frac{B}{J} \cdot \omega(t) \quad (3.14)$$

elde edilir. Bu denklemler $I_e(t)$ ve $\omega(t)$ 'ya göre çözdürülürse serbest uyarımlı doğru akım makinasının yol verme durumu için $I_e(t)$ ve $\omega(t)$ 'nın çözümüne ulaşılır.

Doğru akım motorunun frenlemesi üç değişik methodla yapılmaktadır. Bunlar; direnimle frenleme, faydalı frenleme ve ters akımla frenlemedir. Bu çalışmada direnimle frenleme methodu kullanılmıştır.

Serbest uyarımlı doğru akım motorunun direnimle frenlemesi normal motor bağlantısında değişiklik gerektirir. Motor çalışmadan direnimle çalışmaya geçiş için Şekil 3.10' daki gibi uyarma sargısının şebeke ile olan bağlantısı korunurken, endüvinin şebeke ile olan bağlantısı kesilir ve değeri ayarlanabilen kademeli bir direnç üzerinden kapatılır.



Şekil 3.10 Serbest uyarımlı DC motorun direnimle frenlemesi

BASIC dili ile yapılan programda normal çalışma için yazdığımız denklemler dört adımlı Runge-Kutta Metodu ile çözdürülmüş ve motor yol alıp endüvi akımı ve rotor açısal hızı kalıcı duruma eriştikten sonra programa frenleme için gerekli olan ;

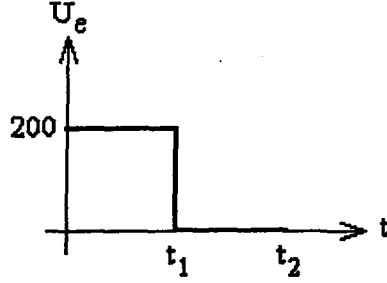
$$U_e(t) = 0 \quad (3.15)$$

$$R_e = R_e + R_{il} \quad (3.16)$$

değişiklikleri eklenmiş ve aynı dört adımlı Runge-Kutta Metodu ile çözüme devam edilmiştir. Aynı zamanda I_e ve ω 'nın değişimi $L_e=0.03$ H, $J=0.4$ rad/sn², $R_a=2$ Ω, $B=0.4$ rad/sn, $M_y=10$ Nm, $U_e=200$ V, $K=2$ Nm/A veya V/rad/sn motor

elektriksel karşılıkları bulunmuştur. Yani eski tür analogi yardımıyla J bobin B direnç olarak tanımlanmıştır.

Frenleme için ayrı bir bond graf modeli kurmadan programdaki bazı tanımlamalardan faydalanılmıştır. Örneğin endüvi gerilimi Şekil 3.13' deki gibi tanımlanmıştır.(Poyraz, Özdemir, Gülten 1995)

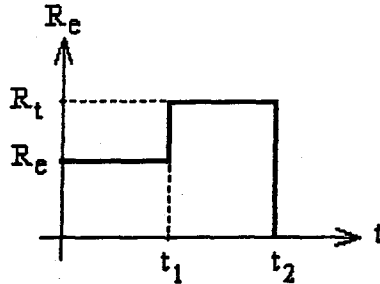


Şekil 3.13 Endüvi geriliminin değişimi

Aynı şekilde endüvi direnci de seri bir direnç bağlanarak artırıldığında R_{il} , bağlanan seri direnç olmak üzere endüvi devresi için toplam direnç;

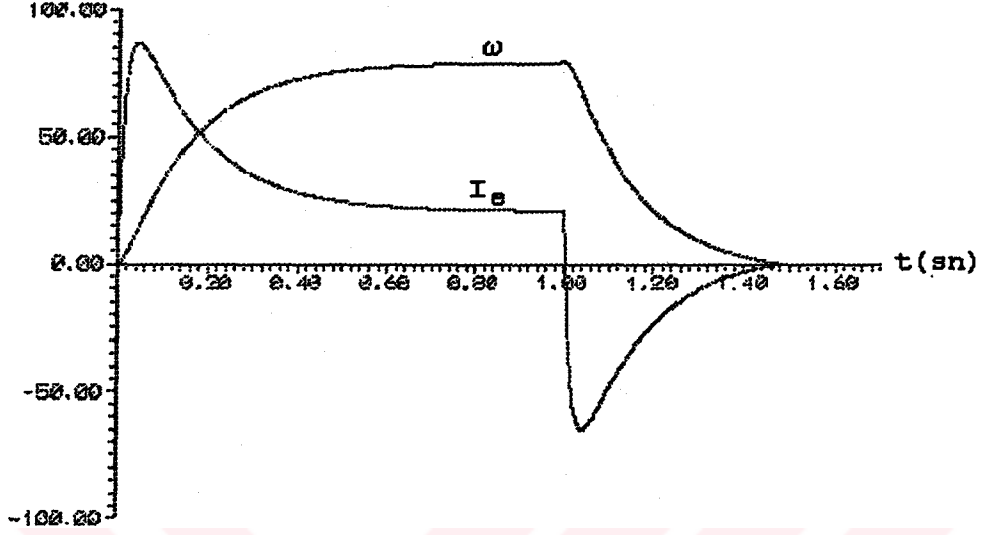
$$R_t = R_e + R_{il} \quad (3.17)$$

olur. Bu durumda seri direnci armatür direncine ekleyerek Şekil 3.14' deki gibi bir tanımlama yapabiliriz.



Şekil 3.14 Endüvi direncinin değişimi

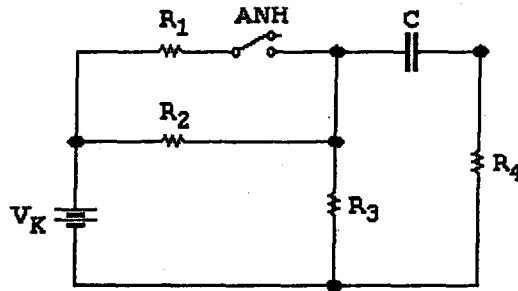
Bu tanımlamalar yapılarak endüvi akımının ve rotor açısal hızının değişimi Şekil 3.15' deki gibi elde edilmiştir (Poyraz, Özdemir, Gülten 1995).



Şekil 3.15 Endüvi akımı ve rotor açısal hızının değişimi

3.4. Örnek 4

Bu örnekte ise anahtarlı bir devre, bond graf modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Şekil 3.16' daki devrede anahtar uzun bir süre açık pozisyonda bekletilmiş $t=1$. sn' de kapatılmış ve $t=2$. sn' de tekrar açılmıştır.

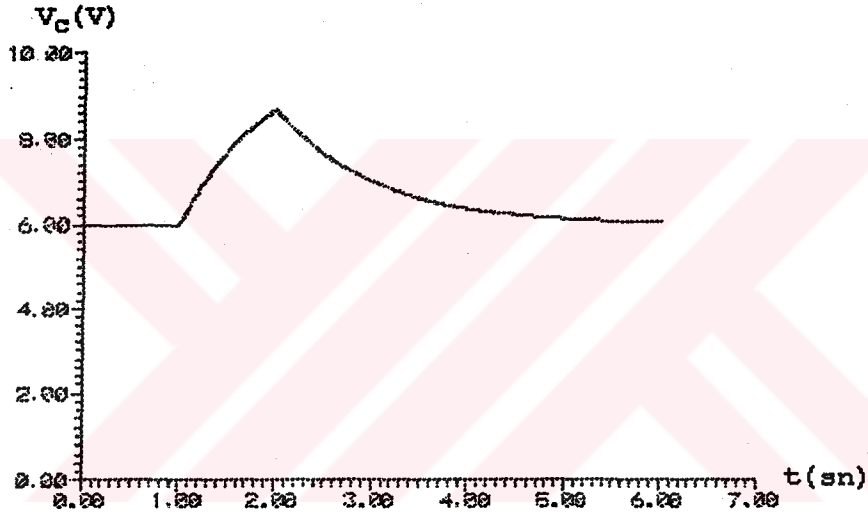


Şekil 3.16 Örnek 4' ün devresi


```

S1 2 3 5 0 SMOD
R3 3 0 3K
C 3 4 250UF IC=6
R4 4 0 1.6K
VSWITCH 5 0 PWL(0 0 .9999s 0 1s 3 1.9999 3 2 0 6 0)
.MODEL SMOD VSWITCH ( Ron=5M Roff=10E+9 Von=25M Voff=0.0 )
.TRAN 10MS 6S UIC
.PRINT TRAN V(C)
.PROBE
.END

```



Şekil 3.18 Kapasitör geriliminin değişimi (Enport)

Ayrıca devredeki kapasitör geriliminin zamana göre değişimi anahtarın her iki durumu için elde edilirse;

$$V_C(t) = 10 - 4 \cdot e^{-(10/9) \cdot t} \quad 1 < t < 2 \quad (3.18)$$

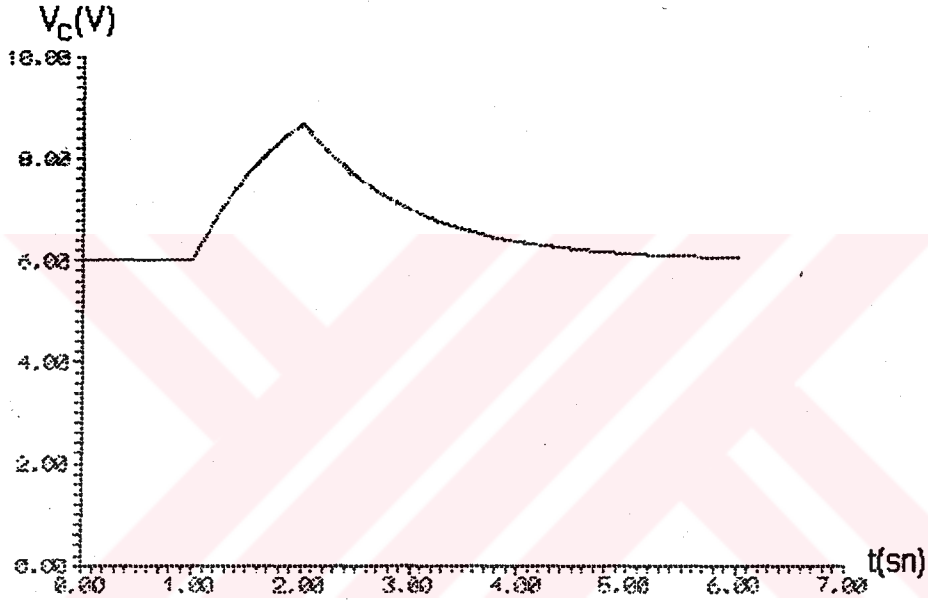
$$V_C(t) = 6 + 2.683228 \cdot e^{-t} \quad 2 < t < 6 \quad (3.19)$$

ENPORT ve PSPICE ile elde edilen verileri teorik sonuçlarla karşılaştırmak için bazı değerler aşağıda listelenmiştir.

Zaman	Analitik	Enport	Pspice
3.000E-01	7.1338749	7.1339E+00	7.131E+00
3.010E-01	7.1370578	7.1371E+00	7.134E+00

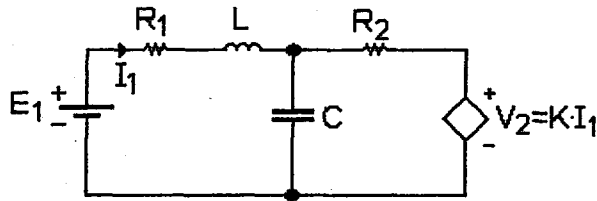
Zaman	Analitik	Enport	Pspice
3.020E-01	7.1402369	7.1402E+00	7.137E+00
3.030E-01	7.1434126	7.1434E+00	7.140E+00
3.040E-01	7.1465845	7.1466E+00	7.143E+00
3.050E-01	7.1497536	7.1498E+00	7.146E+00

Bu devre için PSPICE kullanılarak elde edilen veriler yine GRAPHER programı yardımıyla Şekil 3.19' daki gibi çizdirilmiştir. PSPICE programına ait grafik çizim özelliği kullanılarak elde edilen çıktılar ise EK 3' de verilmiştir.



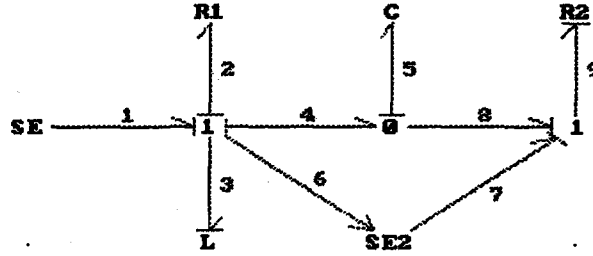
Şekil 3.19 Kapasitör geriliminin değişimi (Pspice)

3.5. Örnek 5

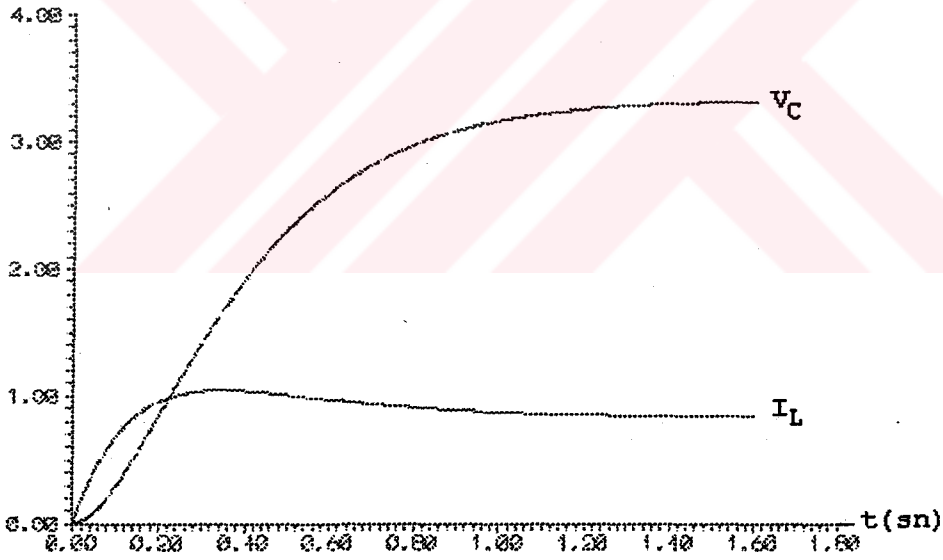


Şekil 3.20 Örnek 5' in devresi

Şekil 3.20' deki bağımlı kaynaklı devrenin bond graf modeli Şekil 3.21' de görülmektedir. Bu model ENPORT programına girilerek $R_1=8\Omega$, $L=1H$, $R_2=2\Omega$, $C=0.25F$, $K=2$, $E_1=20V$ değerleri için devrenin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bobin akımı ve kapasitör gerilimi için simülasyon sonuçları Şekil 3.22' de verilmiştir.



Şekil 3.21 Örnek 5' in bond graf modeli



Şekil 3.22 I_L ve V_C nin değişimi(Enport)

Devrenin analitik çözümü için durum değişkenleri;

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{R_1}{L} \cdot I_L - \frac{1}{L} \cdot V_C + \frac{1}{L} \cdot E_1 \quad (3.20)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = \left(1 + \frac{K}{R_2}\right) \cdot \frac{1}{C} \cdot I_L - \frac{1}{R_2 \cdot C} \cdot V_C \quad (3.21)$$

Daha önce verilen değerler kullanılırsa V_C ve I_L nin değişimi

$$I_L(t) = \frac{5}{6} + \frac{5}{2} \cdot e^{-4t} - \frac{10}{3} \cdot e^{-6t} \quad (3.22)$$

$$V_C(t) = \frac{10}{3} - 10 \cdot e^{-4t} + \frac{20}{3} \cdot e^{-6t} \quad (3.23)$$

şeklinde elde edilir.

Aynı devrenin PSPICE analizi için yazılan program ise aşağıda verilmiştir.

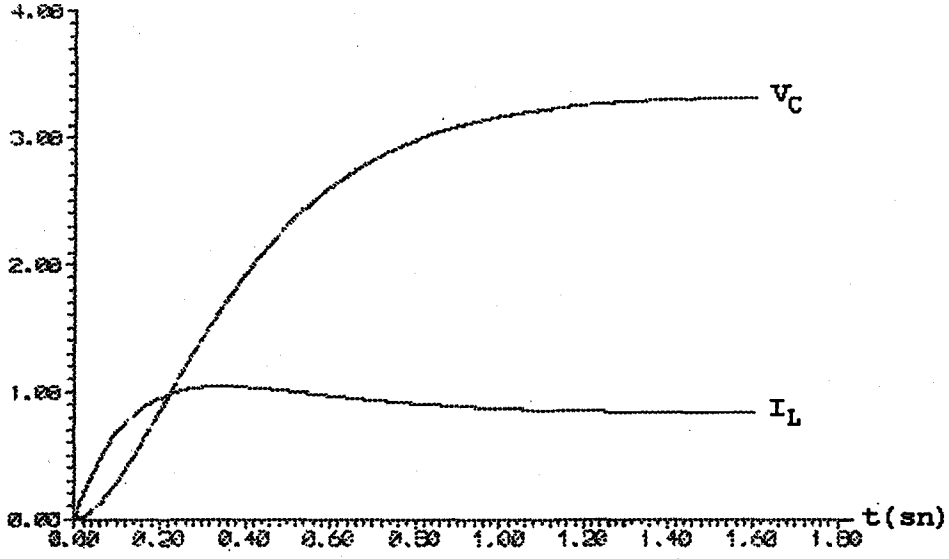
Simülasyon sonuçları da Şekil 3.23' de görülmektedir.

```
V 1 0 20
R1 1 2 8
L 2 3 1
C 3 0 0.25
R2 3 4 2
H1 0 4 v 2
.TRAN 1ms 1.6s
.PRINT tran v(C),I(L)
.PROBE
.END
```

Her iki simülasyon sonucuyla analitik çözümü karşılaştırabilmek için çeşitli zaman değerlerindeki veriler listelenmiştir.

Zaman	Analitik	Enport	Pspice
6.000E-02	0.4743150	4.7432E-01	4.736E-01
6.100E-02	0.4803761	4.8038E-01	4.798E-01
6.200E-02	0.4863854	4.8639E-01	4.859E-01
6.300E-02	0.4923432	4.9234E-01	4.921E-01
6.400E-02	0.4982499	4.9825E-01	4.982E-01
6.500E-02	0.5041057	5.0411E-01	5.043E-01
6.600E-02	0.5099112	5.0991E-01	5.098E-01

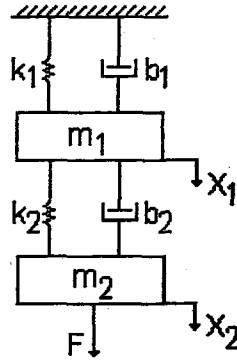
Bu örneğe ait ENPORT' daki denklem tanımlamaları programın özelliğinden faydalanılarak dosyaya kaydedilmiş ve EK 4' de verilmiştir.



Şekil 3.23 I_L ve V_C nin değişimi(Pspice)

3.6. Örnek 6

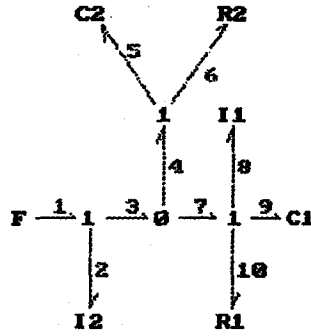
Şekil 3.24' de görülen mekanik sistemin ENPORT ile analizini yapmak için bond graf modeli Şekil 3.25' deki gibi elde edilir.



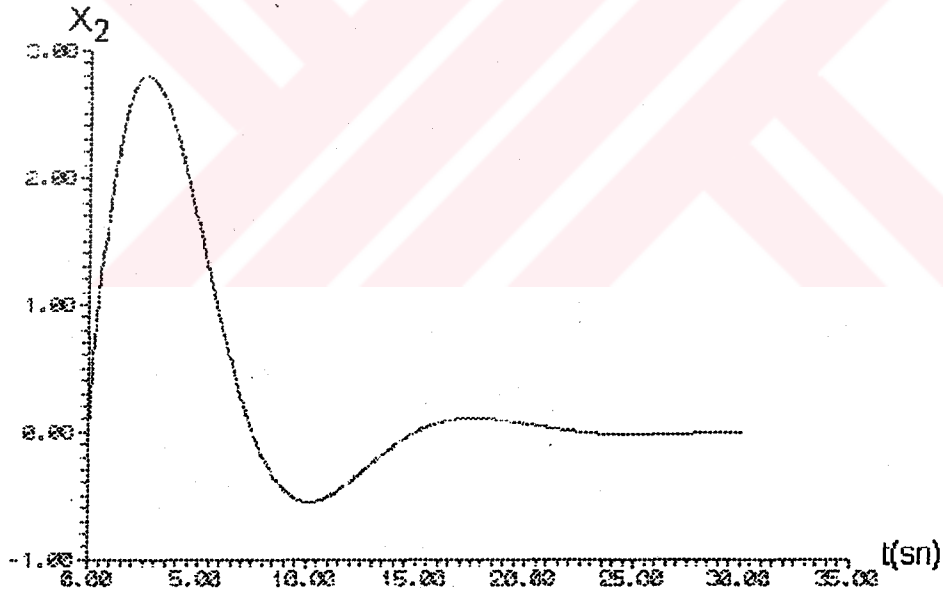
Şekil 3.24 Mekanik sistem

Mekanik sistemin denklemleri ENPORT' da tanımlanırken kütle-indüktans benzeşiminden yola çıkılmıştır. Bu sistemde $k_1=1$ N/m, $k_2=20$ N/m, $b_1=2$

$N \cdot sn/m$, $b_2=3 N \cdot sn/m$, $m_2=3 \text{ kg}$, $m_1=1,5 \text{ kg}$, $F=10 \text{ N}$ değerleri kullanılarak sistemin simülasyonu gerçekleştirildiğinde, m_2 kütlesine ait yerdeğiştirmenin zamana göre değişimi Şekil 3.26' daki gibi elde edilir.



Şekil 3.25 Mekanik sistemin bond graf modeli



Şekil 3.26 X_2 yerdeğiştirmesinin zamana göre değişimi

4. SONUÇ

Bu çalışmada çeşitli sistemlerin bond graf modeli elde edilerek ENPORT programıyla simülasyonu yapılmıştır. Ayrıca bu sistemlerin simülasyon sonuçları ya başka bir simülasyon metodu kullanılarak elde edilen sonuçlarla ya da analitik veya deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırmalardan, kullanılan sayısal analiz metoduna da bağlı olarak çok yakın sonuçlar (yaklaşık % 0,06 lık hatayla) elde edildiği görülmüştür. Karmaşık ve nonlineer karakterdeki sistemlerde bond graf modeli ve ENPORT programının avantajı açık bir şekilde görülmektedir. Özellikle birden fazla enerji modu içeren sistemlerin analizinde bond graf metodunun getirdiği kolaylık büyük avantaj sağlamaktadır.

Analizi yapılan örnekler arasında anahtar içeren devreler, serbest uyarımlı doğru akım motoru, opamp'lı devreler de yer almaktadır. Anahtar içeren devrelerin simülasyonunda, anahtarın her konumu için ayrı bond graf modeli girilmiş ve tanımlanan zaman aralığında çözdürülmüştür. Bir konumdan diğer konuma geçişte durum değişkenlerinin son değerleri yeni durumun başlangıç şartı olarak girilmiştir. Daha sonra durum ve çıkış değişkenlerine ait çıktılar, programın kendi içerisinde birleştirilerek GRAPHER programına aktarılmış ve cevaplar zamanın fonksiyonu olarak çizdirilmiştir.

KAYNAKLAR

ROSENBERG R. C. , Karnopp D.C. , 'Introduction to Physcal System Dynamics' , (1983)

POYRAZ M. , 'Enzim Reaksiyon Sistemlerinin Otomatik Kontrol ve Sistem Analizi Yöntemleri ile Model ve Simülasyonu' , (1981)

KARNOPP D. C. , MARGOLIS D. L. , ROSENBERG R. C. , 'System Dynamics' , (1990)

BLUNDELL A. , 'Bond Graphs for Modelling Engineering Systems', (1982)

YILDIRIM S. , 'Elektrik Devrelerinin Analizinde Bond Graf Modeli ve Simülasyonu' , (1983)

KARNOPP D. C. , ROSENBERG R. C. , 'Analysis and Simulation of Multiport Systems' , (1968)

BUISSON J. , 'Analysis of Switching Devices with Bond Graphs' , Journal of Franklin Institute , Vol. 330 , No. 6, pp. 1165-1175, (1993)

POYRAZ M. , ÖZDEMİR M. , GÜLTEN A. , 'DC Motorun Frenlemesinde Bond Graf Modelinden Yararlanarak ENPORT Simülasyonu' , Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, Sayfa 426-429, (1995)

PAYNTER H.M. , 'Analysis and Design of Engineering System' , (1961)

GRANDA J.J. , 'Computer Generation of Physical System Differential Equations Using Bond Graphs' , Vol. 319 , pp. 243-255 , (1985)



EK 1

```

*****
*
*          SYSTEM MATRICES File written by ENPORT
*
* Model: MODEL000   File: EK1.ABC       Date: 07/04/96
*
* Default model title
*
*****

```

	States	Inputs	Outputs
Q4	0.00000E+00	E1	Q4
P7	0.00000E+00		

The A matrix:

	1	2
1	-3.36293E+01	-2.42718E-01
2	2.01776E+05	-7.86408E+02

The B matrix:

	1
1	1.66667E-04
2	0.00000E+00

The C matrix:

	1	2
1	1.00000E+00	0.00000E+00

The D matrix:

	1
1	1.00000E+00

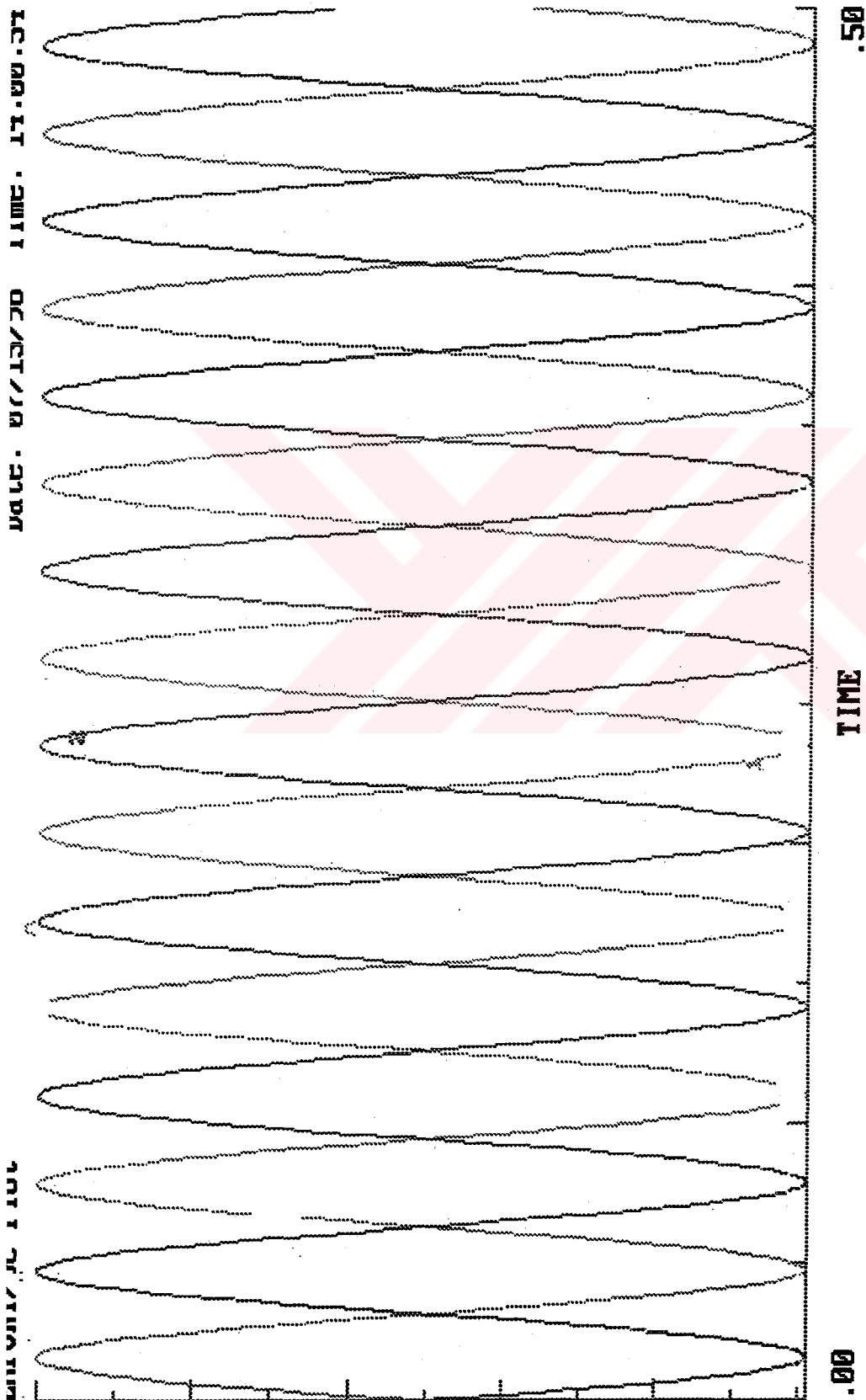
The eigenvalues:

	Real	Imaginary
1	-1.05561E+02	0.00000E+00
2	-7.14476E+02	0.00000E+00

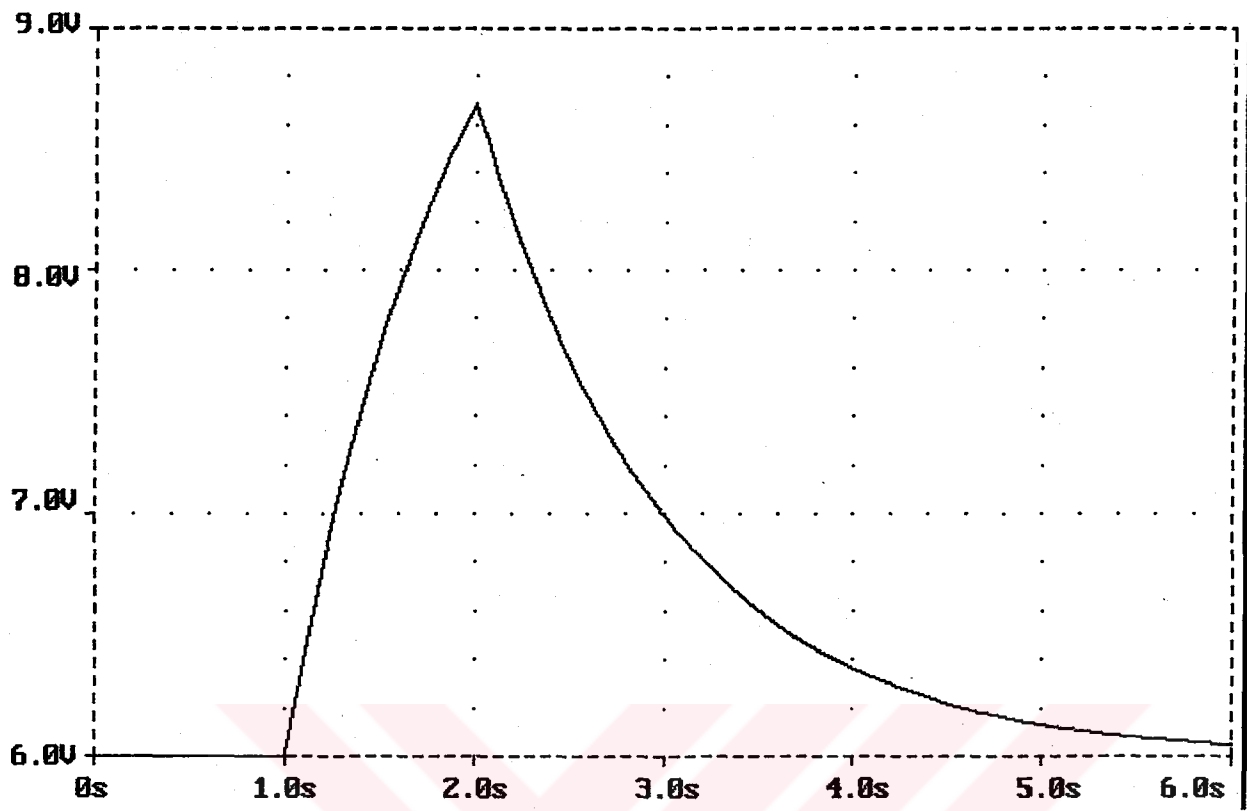
The eigenvectors:

	Real 1	Real 2
1	9.38066E-04	4.14967E-04
2	2.78005E-01	1.16402E+00

EK 2



E2	E9	2
2.00E+00	6.00E+00	
-2.00E+00	-6.00E+00	



EK 3

EK 4

```

*****
*
*      SYSTEM EQUATIONS File written by ENPORT
*
*      Model: MODEL000   File: EK4.SEQ   Date: 07/15/96
*
*      Default model title...
*
*****

```

The Named Parameters:

```

1 R1      8.00E+00
2 R2      2.0000E+00
3 K      -2.00000E+00
4 L      1.00000E+00
5 C      0.25000E+00

```

The System Equations:

```

E1 = 2.00000E+01
E2 = R1 * F2
F3 = (1./L) * P3
P3 = INTEGRAL( E3 )
F1 = F3
F2 = F3
F4 = F3
A6 = F3
E3 = 1.0 * E1
    * -1.0 * E2
    * -1.0 * E4
E4 = E5
E8 = E5
F5 = 1.0 * F4
    * -1.0 * F8
E5 = (1./C) * Q5
Q5 = INTEGRAL( F5 )
F7 = F9
F8 = F9
E9 = 1.0 * E7
    * +1.0 * E8
F9 = (1./R2) * E9
E7 = K * F4

```