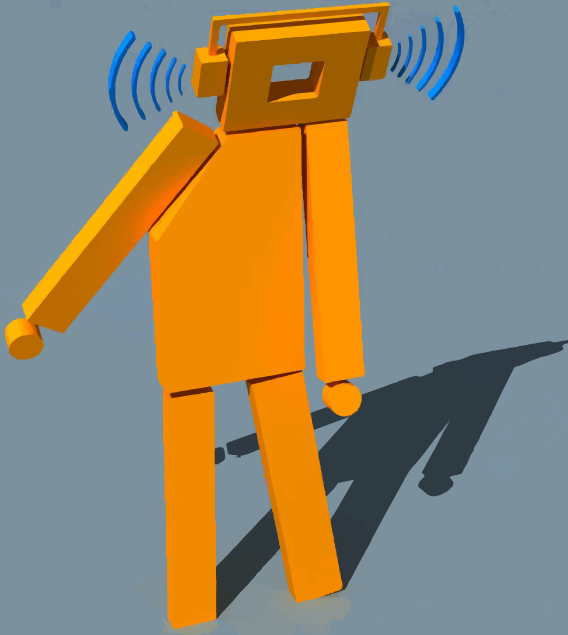


E-KİTAP



ELEKTRİK VE ELEKTRONİK DEVRELER VE ANALİZİ

MEHMET BODUR



TMMOB
ELEKTRİK MÜHENDİSLERİ ODASI

ANKARA
EYLÜL 2012



TMMOB
ELEKTRİK MÜHENDİSLERİ ODASI

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK DEVRELER VE ANALİZİ

MEHMET BODUR

ANKARA
EYLÜL 2012

Bilgisayar Mühendisliğine Yönelik

Elektrik ve Elektronik Devreler ve Analizi

Mehmet Bodur

Şubat-Mayıs 2012

İçindekiler

İçindekiler	iii
-------------	-----

Şekiller	ix
----------	----

Yazarın Önsözü	xiii
----------------	------

I DA Devreleri	xv
----------------	----

1 Temel Kavramlar	1
1.1 Metrik Birim Sistemi ve Hata	1
1.2 Elektrik enerjisinin önemi:	3
1.3 Enerji, İş, Güç	4
1.4 Yük, Yalıtkan, İletken ...	6
1.5 Akım, gerilim ve güç	7
1.6 Direnç ve Ohm Kanunu	11
1.6.1 Ohm Kanunu	11
1.7 Dirençte harcanan güç	13
1.7.1 Etiket gücü	13
1.8 Uygulamada İletken ve Direnç	14
1.8.1 İletkenlerin direnci	14
1.8.2 Elektronikte kullanılan dirençler	16
1.8.3 Standart Direnç değerleri	18
1.9 Direnç Devreleri ve Devre Kanunları	18
1.9.1 Yön ve Polarite İşaretleri	21
1.9.2 Açık, Kapalı ve Kısa Devre ve Devre Akımı	21
1.9.3 Seri bağlı devre elemanları	22

1.9.4	Paralel bağlı elemanlar	25
1.9.5	Seri dirençli devreler	27
1.9.6	Akım ile Gerilimin Ölçülmesi	28
1.10	Problemler	29
2	Seri Devreler ve KVL	33
2.1	Dirençlerin Seri Bağlanması	33
2.2	Seri Bağlı Gerilim Kaynakları	34
2.3	Kirşof Gerilim Kanunu (KVL)	36
2.4	Gerilim Bölücüler	39
2.5	Seri devrelerde güç ve enerji aktarımı	40
2.6	Problemler	41
3	Paralel Direnç devreleri ve KCL	43
3.1	Dirençlerin Paralel Bağlanması	43
3.2	Paralel Dirençlerin eşdeğeri	44
3.3	KCL ve devre çözümleme	44
3.4	Paralel Dirençlerde Akım Bölünmesi	45
3.5	Problemler	46
4	Paralel ve Seri Devreler	49
4.1	Eşdeğer Yöntemi	49
4.2	Yıldız-Üçgen Eşdeğeri	51
4.3	Gerilim-Akım Kaynağı Eşdeğeri	53
4.4	Akım Kaynaklı Direnç Devreleri	54
4.5	KVL ve KCL kullanarak çözümleme	55
4.6	Çevrim Gerilimleri Yöntemi	56
4.7	Düğüm Akımları Yöntemi	59
4.8	Problemler	60
5	Devre Teoremleri	63
5.1	Tevenin ve Norton Eşdeğerleri	63
5.2	Maksimum güç aktarma teoremi	64
5.3	Superpozisyon Teoremi	66
5.4	Problemler	69

II	AA Devreleri	71
6	Kondansatör ve RC devre analizi	73
6.1	Seri ve paralel kondansatörler	75
6.2	RC devrede kalıcı durum analizi	76
6.3	RC devrede geçici dönem ve zaman sabiti	76
7	Bobin ve RL devre analizi	79
7.1	Manyetik alan	79
7.2	Elektromanyetik alan ve endüktans	79
7.3	Endüktans	80
7.3.1	Endüktans ve Kapasitans dual benzerliği	81
7.3.2	Bobinde depolanan enerji	82
7.4	Seri ve paralel bobinler	82
7.5	RLC devrelerde kalıcı devre analizi	83
7.6	RL devrelerde zaman sabiti	84
7.7	Problemler	84
8	Alternatif Akım ve Gerilim	87
8.1	Sinüs eğrisi ve parametreleri	87
8.2	AA Güç Kaynakları ve Güç Aktarımı	89
8.3	AA Güç, Direnç ve Eşdeğer Gerilim	94
8.4	Transformatör (Trafo)	97
8.5	Sinüs eğrisinin açısal eksende gösterimi	101
8.6	Problemler	102
9	AA güç kaynaklı devreler	103
9.1	AA kaynaklı direnç devreleri	103
9.2	Sinüs eğrisinin vektörel (fazör) gösterimi	104
9.3	AA devrede Empedans ve Reaktans	106
9.3.1	Kondansatörün empedans ve reaktansı	106
9.3.2	Kapasitif devrede güç	108
9.3.3	Bobinin empedans ve reaktansı	108
9.3.4	Endüktif devrede güç	109
9.3.5	Empedans ve reaktans ilişkisi	110
9.4	Eşdeğer empedans ve AA devreler	110
9.4.1	Seri RC devre	110

9.4.2	Seri RL devre	111
9.5	AA kaynaklı paralel RC ve RL devreler	114
9.5.1	Paralel RC devre	114
9.5.2	Paralel RL devre	115
9.5.3	Seri RLC devre	116
9.6	Seri RLC devrede seri rezonans	117
9.6.1	Rezonansta kalite faktörü	118
9.7	Paralel RLC devreleri	118
9.8	Seri-paralel RLC devreleri	119
9.9	Üç fazlı güç	120

III Yarıiletken Devreler ve Analizi 125

10 Diyot Devreleri 127

10.1	Yarıiletken Diyot	127
10.1.1	p ve n tipi madde	127
10.1.2	p-n bağlantı	128
10.1.3	Diyot	129
10.1.4	Zener Diyot	130
10.1.5	Fotovoltaik Diyot	130
10.2	Diyot modelleri	131
10.2.1	İdeal Diyot Modeli:	131
10.2.2	Geniş Sinyal Diyot Modeli	131
10.2.3	Tam Diyot Modeli	132
10.3	Diyotlar ve Gerilim Doğrultma	133
10.3.1	Trafo ve yarım dalga doğrultucu	134
10.3.2	Kondansatorlü süzücü devre	135
10.3.3	Tam Dalga Doğrultucu	136
10.3.4	Zener diyotlu düzeltici	138
10.3.5	Yarıiletken entegre düzelticiler	140
10.4	Voltaj Kırpıcı ve Katlayıcı Diyot Devreleri	141
10.4.1	Diyotlu Voltaj Kırpıcılar	142
10.4.2	Zener Diyotlu Kırpıcılar	142
10.5	Voltaj katlayıcı diyot devresi	144
10.5.1	Yarım dalga katlayıcı	144

10.5.2	Tam dalga katlayıcı	144
10.5.3	Üçe ve dörde katlayıcı	145
10.6	Özel Amaçlı Diyotlar	145
10.6.1	LED Diyod	146
10.6.2	LASER Diyod	147
10.7	Problemler	148
11	Transistörler	151
11.1	Bipolar bağlantı transistörü	151
11.1.1	p-n-p ve n-p-n bağlantı	151
11.1.2	n-p-n Eğilimlendirme	152
11.2	BJT parametreleri	153
11.2.1	Akım kazancı	153
11.2.2	Transistörün DA modeli	154
11.2.3	Kollektör karakteristik eğrileri	154
11.2.4	Emiter ortak DA yük doğrusu	155
11.3	Yük doğrusunu kararlılaştırma ve gerilim kazancı	158
11.4	Sık kullanılan BJT devreleri	162
11.4.1	Emiter takipçi devresi	162
11.4.2	Darlington katı	163
11.4.3	B-sınıfı yükselteç	164
11.4.4	C ve D sınıfı yükselteçler	164
11.4.5	Osilatör devreleri	165
11.5	Farksal Yükselteçler	166
11.6	Diğer transistör çeşitleri	166
11.7	Problemler	167
12	İşlemsel Yükselteç Devreleri	169
12.1	İdeal Opamp	169
12.2	Giriş sinyal modları ve CMMR parametresi	170
12.2.1	Tek taraflı farksal mod	170
12.2.2	Çift taraflı farksal mod	171
12.2.3	Ortak mod	171
12.2.4	Ortak mod dışlama oranı	172
12.3	Opamp ile aritmetik işlemler	172
12.3.1	İki gerilimi karşılaştırmak	172
12.3.2	Gerilimi sabit değerle çarpmak	174

12.3.3	Gerilimlerin toplamı ve farkı	176
12.3.4	DAC devreleri	177
12.4	Entegral ve Türev devreleri	181
12.4.1	Entegral alan opamp	181
12.4.2	Türevleyici opamp devresi	183
12.5	Problemler	185
Kaynakça		187
Kaynakça		187
IV Ekler		189
A	Matematiksel Bağıntılar	191
A.1	Matris ve Vektör İşlemleri	191
A.2	Sanal Uzay Vektörleri	192
B	Bilgi sayfası	195
B.1	DA devreler	195
B.2	AA Devreler	198
Dizin		201

Şekil Listesi

1.2.1	Pil kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.	4
1.3.1	Mekanik iş	5
1.4.1	Zıt yükler birbirini çeker	6
1.5.1	Akımın yönü	8
1.6.1	Ohm kanununda akım ve gerilimin yönleri	11
1.6.2	Devre Çiziminde Direnç Sembolleri	12
1.8.1	Elektronikte kullanılan dirençlerden bazıları ve dört bantlı renk kodu örnekleri	17
1.9.1	Devre elemanlarının sembolleri	19
1.9.2	Kapalı Devre	22
1.9.3	Açık, kapalı ve kısa devre örneği	22
1.9.4	Devre değişik çizilse de aynı akım yolu üzerindeki dirençler seri bağlıdır.	23
1.9.5	Potansiyel hesabı örnek devresi	23
1.9.6	Gerilim iki nokta arasındaki potansiyel farkıdır.	24
1.9.7	Devre-1	25
1.9.8	Devre-2	26
1.9.9	Seri Dirençli Devre	27
1.9.10	Ampermetrenin Bağlanması	28
1.9.11	Voltmetrenin bağlanması	29
2.2.1	Düz ve Ters Yöndeki Seri Gerilim Kaynakları	35
2.3.1	Örnek KVL Devresi ve gerilimlerin polaritesi.	38
3.1.1	Paralel bağlı iki direnç.	43
3.3.1	Üç dirençli paralel devre	45
3.4.1	İki paralel dirençli devre	46
4.1.1	Seri-paralel devre örneği	50
4.1.2	İkinci seri-paralel devre örneği	51
4.2.1	Üçgen-Yıldız eşdeğer devreleri	52

4.2.2	Yıldızlı Devre	52
4.3.1	Eşdeğer güç kaynakları	54
6.2.1	RC devre	76
6.3.1	RC devrede geçici dönem	76
6.3.2	Birinci derece zaman sabitli üstel artış	77
7.2.1	Sağ el kuralı ve Manyetik devre	80
7.3.1	Hava göbekli, demir göbekli ve değişken ferit bobin sembolleri.	81
7.6.1	RL devrede akımın üstel artışı	84
8.1.1	Sinüs eğrisi ve Alternatif güç kaynağı sembolü	87
8.1.2	Farklı fazda sinus eğrileri. A eğrisi $\sin(\omega t + 0)$, B eğrisi $\sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$	89
8.2.1	Elektromıknatıs bir bobin ve demir göbekten oluşur	91
8.2.2	Manyetik alana dik hareket eden iletkende elektrik gerilimi endüklenir.	91
8.2.3	DC motor veya DC jeneratör bir manyetik alanda dönebilen bobinden oluşur.	93
8.2.4	AA jeneratörde komutator yerine bilezikler kullanır. AA senkron motor olarak ta çalışabilir.	94
8.2.5	AA jeneratörün elektriksel frekansı dönüş hızına ve kutup sayısına bağlıdır.	95
8.4.1	Transformatorun yapısı	98
8.4.2	Transformator sembolü. Noktalar gerilimin faz yönünü gösterir.	99
8.4.3	Trafoda ikincil devre yükünün birincil devredeki eşdeğer etkisi	100
8.5.1	Sinüs eğrisi	101
9.1.1	AA kaynaklı direnç devreleri	103
9.3.1	Kondansatör ve bobinli AC devreler	107
9.4.1	Seri RC devre ve empedans fazoru	110
9.4.2	Seri RL devre ve empedans fazoru	112
9.5.1	AC gerilime paralel RC devre ve akım fazorları . . .	114
9.5.2	AC Gerilime paralel RL devre ve akım fazorları . . .	115

9.5.3	Seri RLC devre ve gerilimlerin fazoru	116
9.6.1	Seri RLC devresinde voltajların frekansa bağlı yarılog- aritmik grafiği	118
9.7.1	Paralel RLC rezonans devresi (paralel tank)	119
9.8.1	Seri paralel RLC rezonans devresi ve eşdeğeri	120
9.9.1	Üç faz stator sargılı jeneratör ve çıkış gerilimleri	121
9.9.2	Sincap kafesli üç faz asenkron motor.	122
10.1.1	Diyotta deplesyon bölgesi ve bariyer geriliminin oluş- ması	129
10.1.2	Tipik silikon $p-n$ diyot karakteristiği. $-V_z$ geriye kırılma gerilimidir. İleri eğilimde bağlantı gerilimi 0.7 voltur.	129
10.1.3	Diyot sembolleri	130
10.1.4	Çeşitli diyot paketleri	130
10.1.5	Solar Panel seri bağlı fotovoltaiik hücrelerden oluşur ve her hücre 0.5 V gerilim üretir.	131
10.2.1	İdeal Diyot modeli	132
10.2.2	Pratikte diyot modeli	132
10.2.3	Tam diyot modeli	133
10.3.1	Güç kaynağının ana birimleri	134
10.3.2	Yarım dalga doğrultucu	134
10.3.3	Kıpırtının kondansatörle süzülmesi	135
10.3.4	Orta uçlu trafolu tam doğrultucu	137
10.3.5	Diyot köprülü tam doğrultucu	137
10.3.6	Zenerli düzeltici kıpırtıyı 25mV a düşürür.	139
10.3.7	Entegre Düzelteçli Güç Devresi	141
10.4.1	Kırpıcı devre	142
10.4.2	Zener Modeli ve Zener Diyotlu Kırpıcı	143
10.5.1	Yarım dalga katlayıcı	144
10.5.2	Tam dalga katlayıcı	145
10.5.3	Üçe ve dörde katlayıcılar	145
10.6.1	LEDler ve LED sembolü	146
10.6.2	LED VI karakteristikleri	147
10.6.3	7-Segment Sayısal Gösterge	147

11.1.1	Planar epitaksiyel bipolar transistor yapısı ve sembolu. NPN transistörde ok emitere doğru, PNPde baza doğrudur.	151
11.1.2	Kollektor Emiter devresi	152
11.1.3	Ortak Emiter Devresi	152
11.2.1	nnp BJT ideal DA modeli	154
11.2.2	Tipik BJT karakteristik eğrileri	155
11.2.3	Yük doğrusu ve çalışma bölgesi sınırları	156
11.3.1	Yük doğrusu üzerinde giriş ve çıkış sinyalleri	162
11.4.1	Emiter takipçi devresi	163
11.4.2	Darlington transistör çifti	163
11.4.3	B-sınıfı puşpul çıkış katı	164
11.4.4	Kolpit osilatör devresi	165
11.5.1	Farksal giriş katlı donatım yükselteci	166
12.1.1	Opamp sembolleri ve Paketleri	170
12.1.2	İdeal ve Gerçek Opamp model parametreleri	170
12.2.1	Çift taraflı farksal mod	171
12.2.2	Ortak mod devresi	172
12.3.1	LM324 opamp	173
12.3.2	Terslemeyen opamp yükselteç ve tampon	174
12.3.3	Tersleyen opampli yükselteç	175
12.3.4	Opampli gerilim çıkarma devresi	176
12.3.5	Toplayıcıyla yapılan Sayısal Analog Dönüştürücü.	178
12.3.6	R-2R Merdivenli Terslemeyen Sayısal Analog Çevirici	179
12.3.7	Tersleyen R-2R Merdivenli Sayısal Analog Çevirici	180
12.4.1	Entegral alan opamp devresi	181
12.4.2	Entegral alıcı opamp devresi	182
12.4.3	Türevleyici opamp devresi	184

Yazarın Önsözü

Çağımızda bilginin önemi ön plana çıktığından bilgi üretme ve işlemenin özel bir yeri oluştu. Geçmişte elektrik mühendisliğinin içinde sayısal devreler ve programlama alanı olarak yer alan bu dal artık gelişmesini hız kesmeksizin sürdüren bir mühendislik alanı oldu. Bilgisayar mühendisliğindeki bu olağanüstü gelişme sonucu bilgisayar mühendislerinden beklenenler de büyük değişime uğradı. Yıllar içinde bilgisayar mühendisliği programlarından beklenenler donanım yoğun tasarım ve problem çözme yeteneklerinden yazılım ve haberleşme sistemleri tasarım yeteneklerine doğru yöneldiğini gözledik. Bu yönelişi IEEE ve ACM gibi dünyaca tanınmış mesleki organizasyonların oluşturduğu bilgisayar mühendisliği programı müfredat taslaklarından izlemek mümkündür.

Bugün elektrik ve elektronik devre analizi ve tasarımı üzerine yabancı ve türkçe yayınlar bulunmaktadır. Genellikle elektrik mühendisliği lisans programlarına yönelik bu eserler arasında bir elektrik mühendisinden beklenen tasarım yetenekleri geliştirmeye yönelik olanlar da bulunmaktadır. Mühendislik alanında önemli bir yetkinlik belirleyicisi olan Accreditation Board of Engineering and Technology kuruluşunca yetkinliği tanınan çoğu bilgisayar mühendisliği programları gibi bölümümüz ingilizce bilgisayar programında da bu çeşit tasarıma yönelik ders kitapları takip edilmektedir. Ancak ABET'in bilgisayar mühendisliği eğitiminde elektrik ve elektronik devre derslerinin tasarım ağırlıklı olması gibi bir zorlamada bulunmaması, tasarım yeteneklerinin gerçekten mesleğin icra edileceği programlama ve gömülü bilgisayar sistemleri ağırlıklı olmasını beklemesi bizlere elektrik devreleri dersinin amaçlarını gözden geçirme şansı verdi. Böylece dersin yeri de tasarımdan ziyade disiplinler arası çalışma yeteneğinin kazandırılması yönüne kaydırıldı.

Elinizdeki kitap bölümümüzde türkçe bilgisayar mühendisliği programına yönelik olarak, bilgisayar mühendisi adaylarına elektrik mühendisliğindeki devre analiz ve tasarım alanlarının temel terminolojisini, temel kavramlarını ve temel analiz yöntemlerini vermeye yöneliktir. Kitap elektrik devre teorileri ve analiz yöntemlerinin yanı sıra elektronik devre elemanlarının en yaygın kullanımlarını da bir döneme sıkıştırarak biçimde kapsamaktadır. Derse paralel olarak işlenecek laboratuvar saatlerinde her konuyla ilgili bir deneyin hem ISIS ile devre diyagramı üzerinde benzeşimi hem de aynı devrenin bir elektronik yapboz tahtasında gerçekleştirilerek sinyal üretici, güç kaynağı, AVOMETRE ve osiloskop gibi araçlarla ölçülmesi sağlanmalıdır.

Kitaptaki konuların sıralanmasında elektrik ve elektronikle hiçbir ilgisi olmayan, elektrik ve manyetiği sadece birinci sınıf fizik derslerinden tanıyan,

doğrusal cebir ve analiz derslerinden entegral ve türevi bilen bir öğrenci profili dikkate alınmıştır. Ders konuları üç kısım altında toplam oniki bölümde düzenlenmiştir. Dersi döneme yayarken her bölümü bir haftada ele almak mümkündür. Ancak konuların bir kısmının amacı soru çözmek değil yalnızca daha ileri konuları anlayabilmek için gerekli kavramları geliştirmektir. Bölümlerden 1.8, 8.2, 11.4, 11.6, 12.2 bu nedenle kaleme alınmıştır.

Bu kitap akademik amaçlı dağıtılan Lyx-2 yazılımı kullanılarak pdf^LA^TE^X ile dizilmiştir. Şekillerin bir bölümü kaynakça içinde yer alan çeşitli kitaplardan yararlanarak türkçeleştirilmiştir. Devre şematikleri ISIS içinde hazırlanmış, grafikler ise MatLab aracılığıyla oluşturulmuştur. Kitaptaki örneklerin sağlanmasında 2011-12 Bahar dönemi öğrencilerinin de katkısı olmuştur. Kitabın eklerinden matematik bağıntılar öğrencilerin yoğun soruları üzerine eklenmiştir. Bilgi sayfası ise öğrencilerin ezbere yönelmelerini önlemek üzere ara ve son sınavlarda soru kağıtlarına eklenmiştir.

Son olarak kitabın yazılışında gerekli zamanı ve enerjiyi ayırabilmemi sağlayan, çeşitli konularda fikirleriyle destek olan başta ailem ve bölümümdeki meslek arkadaşlarıma teşekkür eder kitabın okuyuculara yararlı olmasını dilerim.

Dr. Mehmet Bodur

Kısım I

DA Devreleri

Bölüm 1

Temel Kavramlar

1.1 Metrik Birim Sistemi ve Hata

Metrik sistemde uzunluk metre, ağırlık kilogram, zaman ise saniye biriminde kullanılır. Bir değerin birimi olarak yazılırken metre “m”, kilogram “kg”, saniye ise “s” ile kısaltılır.

Metrik mühendislik birim katsayıları Çok büyük ve çok küçük değerleri kolay anlaşılabilir biçimde yazabilmek için birim katsayısı¹, diğer deyişle birim çarpanı kullanılır. Katsayılar binin üstlerini ifade eder. Her bir katsayının okurken kullanılacak adı ve birimin önüne yazarken kullanılacak bir kısaltması vardır.

Tablo 1.1.1: Metrik Birim Katsayıları

	Büyük katsayılar				
Kısaltma	P	T	G	M	k
Okunuş	peta	tera	giga	mega	kilo
Değer	10^{15}	10^{12}	10^9	10^6	10^3

	Küçük katsayılar				
Kısaltma	m	μ	n	p	f
Okunuş	mili	mikro	nano	piko	femto
Değer	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}

Büyük katsayılı birimden küçüğe dönüştürmek için kesir noktası üç basamak sağa kaydırılır. Aynı miktarı bir sonraki küçük birimle yazdığınızda bin kat büyük bir sayı bulursunuz. Küçük katsayılı birimden büyüğe dönüştürürken kesir noktasını sağa kaydırın. Aynı

¹ unit prefix

miktarı bir sonraki büyük katsayılı birimle yazdığınızda sayı bin kat küçülür.

Örnek 1.1. $0.47 \text{ km} = ? \text{ m}$; $1.7 \text{ m} = ? \mu\text{m} = ? \text{ km}$;

$$10,000 \text{ pm} = ? \mu\text{m} = ? \text{ mm}$$

Çözüm:

$$0.47 \text{ km} = 470 \text{ m} ; 1.7 \text{ m} = 1700000 \mu\text{m} = 0.0017 \text{ km};$$

$$10,000 \text{ pm} = 0.01 \mu\text{m} = 0.00001 \text{ mm}$$

Metrik birimlerle aritmetik: Toplama ve çıkarma yapmadan önce birim katsayılarını birbirine eşitlemek gerekir.

Örnek 1.2. $10\ 000 \text{ g} + 22 \text{ kg} = ?$;

Çözüm:

$$10\ 000 \text{ g} + 22\ 000 \text{ g} = 32\ 000 \text{ g} ,$$

$$\text{ya da } 10 \text{ kg} + 22 \text{ kg} = 32 \text{ kg} ,$$

Örnek 1.3. $200 \text{ ?g} + 1.0 \text{ mg} = ?$

Çözüm:

$$200 \mu\text{g} + 1,000 \mu\text{g} = 1,200 \mu\text{g}$$

$$\text{ya da } 0.200 \text{ mg} + 1.0 \text{ mg} = 1.2 \text{ mg}$$

Hata, Kesinlik, Duyarlık Deneyisel belirsizlik bütün ölçümlerin ayrılmaz parçasıdır. Hata² gerçek değerle ölçülen değer arasındaki farktır. Kesinlik³ bir ölçümde hatanın hangi boyutlarda olabileceğini belirtir. Duyarlık⁴ ise tekrarlanabilirlik derecesini belirtir.

Örneğin elimizde tam doğru ölçen A cetvelimiz, bir de kullanımı kolay B cetvelimiz olsun. A ile 1.862 metre ölçtüğümüz boyumuzu B ile beş kere ölçsek ve tablodaki değerleri bulsak, ölçümlerimizin ortalaması 1.851 çıkar.

²error

³accuracy

⁴sensitivity

ölçüm #	B ölçümü (m)	ortalamadan farkı
1	1.854	0.003
2	1.848	0.003
3	1.852	0.001
4	1.851	0.001
5	1.850	0
ortalama	1.851	0.0016

B cetveliyle yapılan ölçümlerin A cetveline göre hatası

$1.862 - 1.851 = 0.011\text{m} = 11\text{mm}$ 'dir.

Ölçüm kesinliği yüzde olarak

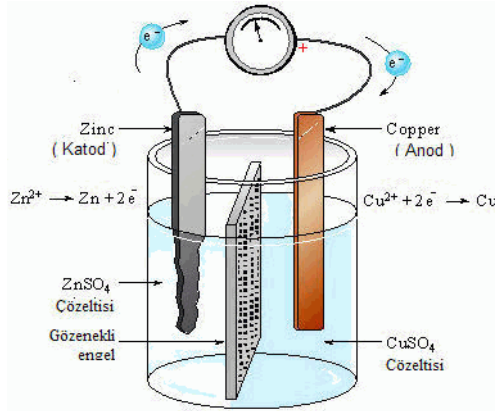
$0.011 / 1.862 = 0.006 = \% 0.6$ çıkar.

B cetveliyle alınan ölçümlerin duyarlık derecesi yapılan ölçümlerinin ortalamadan farkının ortalamasıyla belirlenir. Bu beş ölçüm için duyarlık $0.008 / 5 \text{ m} = 1.6 \text{ mm}$ çıkar.

1.2 Elektrik enerjisinin önemi:

Elektronların birbirini itmesi ve yer değişimiyle oluşan elektrik enerjisi günlük yaşamımızda evimizde, çalışma hayatımızda, haberleşmede, aydınlanmada, ısıtma ve soğutmada, enerji naklinde, taşımacılıkta ve endüstride mekanik ve kimyasal üretim yöntemleri gibi enerjinin yoğun olarak gerektiği her yerde ve bilgi işlemde geniş kullanım alanları bulunan bir enerji türüdür.

Elektrik enerjisinin dönüşümü: Enerjinin sakınımı kanunu evrenin ve termodinamiğin birinci kanunu olarak bilinir. Enerji yoktan yaratılamaz ve var olan enerji yok edilemez. Elektrik enerjisi de buna iyi bir örnektir. Bir elektrik motoru elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. Bir jeneratör mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bir direnç üzerinde harcanan elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüştürür. Hatta direnç bir cam muhafaza içindeyse bu ısı direnç olarak kullanılan malzemeyi akkor derecesinde ısıtarak enerjiyi kısmen görebileceğimiz ışık enerjisine dönüştürür. Bir pil veya bir pil bataryası kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür (Şekil 1.2.1). Elektroliz ve elektro-kaplama işlemlerinde ise elektrik enerjisi kimyasal enerjiye dönüşür.



Şekil 1.2.1: Pil kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.

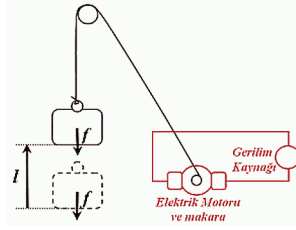
Elektrik enerjisiyle bilgi taşıma ve işleme: Elektrik devresindeki duyaç⁵ elemanlar devrenin aktaracağı enerji miktarını etkiler. Devrenin öbür ucundaki alıcı elemanlar bu değişimi görüntü ya da ses gibi duyularımızı harekete geçirecek işaretlere dönüştürerek duyaçtaki bilgiyi algılamamızı sağlar. Bilgi taşıyan devre değişkenine *sinyal* denir. Sinyal biçimindeki bilgi devrenin enerji durumu ile geçici bir süre saklanabilir ve çeşitli devreler aracılığıyla işlenerek birleştirilebilir ve ayrıştırılabilir.

1.3 Enerji, İş, Güç

Kimyasal, mekanik, elektriksel herhangi bir değişimi sağlamak *iş*⁶ ile mümkündür ya da bu dönüşüm işi yapacak *enerji* nin ortaya çıkmasını sağlar. Şekil 1.3.1'de görüldüğü gibi, f kuvvetine karşı alınan dl yolunun sonucunda $dw = f dl$ kadar mekanik iş oluşur. Yol boyunca alınan integralle toplam güç $w = \int f dl$ olarak bulunur. Sabit bir F kuvvetine karşı gidilen $L = \Delta l$ kadar yol $W = FL$ kadar işe karşılık gelir. Metrik birim sisteminde uzunluk metre (m), kuvvet Newton (N), iş Jul (J) biriminde kullanılır.

⁵sensor

⁶work



Şekil 1.3.1: Mekanik iş kuvvete karşı gidilen yol için harcanan enerjidir. Elektrik devresi enerjinin naklini kolaylaştırır.

Güç: Bir süreç boyunca sürekli iş (veya enerji) aktarılıyorsa birim sürede aktarılan işe güç⁷ denir. Güç birimi Jul/saniye kısaca J/s olarak yazılır.

Örnek 1.4. Bir asansör 100 kiloluk kabini 10 m/s² yerçekimi ivmesine karşı her saniyede 0.5 m yukarı kaldıracak şekilde kabini 100 kg $\times$ 10 m/s² kuvvete karşı $d = 0.5$ m yukarı kaldırma sonucu bir saniyede yaptığı iş ne kadardır.

Çözüm: Yapılan iş $100\text{kg} \times 10\text{m/s}^2 \times 0.5\text{ m} = 500\text{ J}$ olur. Yükselen asansör üzerine aktarılan işin çoğunu kabinin potansiyel enerjisi olarak toplar. İşin bir bölümü sürtünme benzeri etkiler nedeniyle ısıya dönüşerek kabinin ve asansör motorunun sıcaklığının artmasına neden olur. Gücün tümü asansör kabinini yükseltmeye gidiyorsa kabin yükselirken her saniye 500 J iş yapılır ve asansörü yükselten güç 500 J.s^{-1} olarak bulunur.

Maddenin sıcaklığını yükseltebilmek için de enerji gerekir. Isıl enerji⁸ birimi kalori⁹ (cal) olarak kısaltılır, ve 1 cal 4.2 J eder. Örneğin bir gram suyu bir derece ısıtabilmek için bir kalori enerji gereklidir.

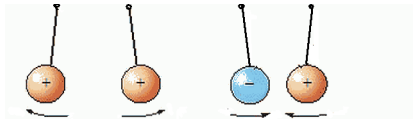
⁷power

⁸thermal energy

⁹calori

1.4 Yük, Yalıtkan, İletken, Yarı-iletken ve Gerilim Kaynağı

Elektrik yüklü parçacıklar: Maddenin atomlarını oluşturan temel parçacıklardan çekirdekte yer alan protonlar artı yüklü, çekirdeğin çevresindeki orbitlerde yer alan eksi yüklü parçacıklara elektron denir. Zıt yüklü parçacıklar birbirini çeker ve aynı yüklü parçacıklar birbirini iter (Şekil 1.4.1). Çekme ve itme kuvveti yük miktarıyla orantılı, aralarındaki uzaklığın karesiyle ise ters orantılıdır. Uzayın herhangi bir noktasındaki birim yük üzerine düşen elektriksel kuvvete elektrik alanı denir. Elektrik enerjisi yüklerin bu alana karşı yer değiştirmesinin bir sonucudur. Bir yük kuvvete karşın bir mesafe boyunca yer değiştirirse iş oluşur. Voltaj bu iş ile tanımlıdır. Çevremizde elektron ve proton dışında kararlı yapıda başka yüklü atom parçası yoktur.



Şekil 1.4.1: Zıt yükler birbirini çeker, ve aynı yükler birbirini iter.

Yüklerin korunumu kanunu tabiattaki yüklerin yoktan oluşturulamayacağı ve varsa yokedilemeyeceğini ancak ve ancak tanecikler halinde iletebileceğini gösterir.

Çevremizdeki hidrojen atomunun çekirdeği tek bir protondan oluşur. Bir protonun artı yükü tam olarak bir elektronun eksi yükünü yok edecek kadar olduğundan çevresindeki elektronuyla hidrojen atomu yüksüz niteliktedir. Benzeri şekilde daha ağır atomların da elektronları ile çekirdeğindeki protonlar denkse yüksüz davranırlar.

Serbest elektronlar: Bir atomun çekirdek yapısına bağlı olarak dış yörüngesinde en çok sekiz elektron bulunabilir. Dış yörüngede sekiz elektronu bulunan atomlar doymuş dış yörüngeli yapılarıyla en kararlı enerji düzeyindedir. Elektronlarını bırakmak ve dışarıdan elektron almak için çok yüksek enerji gerektirirler. Bu enerjiye sahip

elektronlar serbest elektron olur. Elektrik enerjisinin iletilmesinde yalnızca serbest elektronlar katkıda bulunur.

İletken: Bakır, alüminyum ve demir gibi serbest valens elektronları olan maddeler elektronlarını çok daha düşük bir enerji ile komşu atomlara verebilir ya da onlardan elektron alabilir. Kristallerinde atomların serbest elektronları ortak kullandığı bu çeşit maddeler elektrik akımını iyi iletir ve *iletken*¹⁰ olarak betimlenir. Altın, bakır, alüminyum gibi metaller çok iyi iletkenidir. Bunların yanısıra bütün diğer metaller de oldukça iyi iletkenidir.

Yalıtkan: Atomlar moleküler bağ kurarak dış yörüngesindeki elektronları çok kararlı enerji düzeylerine ulaştırabilir. Serbest elektronları çok az olan moleküller elektrik akımını az iletir, veya ölçülemeyecek derecede az iletkenlere hiç iletmiyor da denir. Bu çeşit cam, kauçuk, pamuk, yağ ve hava gibi maddelere *yalıtkan*¹¹ denir.

Yarı iletken: İletkenlik ve yalıtkanlık uç noktalarındaki özelliklerdir. Elektronları çok kararlı olan ya da çok kolay elektron alışverişi yapabilen atomik ve moleküler yapıların yanı sıra germanyum, silisyum, ve karbon gibi dışarıdan uygulanan etkilerle ya elektron alabilecek ya da daha kararlı duruma geçebilecek olan yapılar da vardır. Bu çeşit maddelere *yarıiletken* maddeler denir. Elektronik devre elemanlarının çoğu bu çeşit yarı iletken ortamlarda oluşturulur.

1.5 Akım, gerilim ve güç

Elektrik yükü birimi: Elektronlar eksi yüklü¹² taneciklerdir ve birbirlerini iterler. Gümüş nitrat çözeltisi içinde bir metalik elektrot kullanılarak elektrottan geçen elektron sayısı bulunabilir. Gümüş nitrat ($AgNO_3$) tuzunun sudaki çözeltisindeki Ag^+ iyonları kimyasal

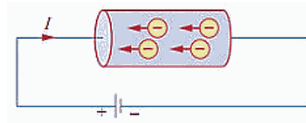
¹⁰conductor

¹¹insulator

¹²charge

özellikleri sonucu elektron alışverişi yaparak metalik gümüş (Ag) atomlarına dönüşür. Bu şekilde belli bir sürede kaç serbest elektronun Ag oluşturduğunu elektrotta toplanan gümüş ağırlığından ölçmek mümkündür. Benzer şekilde tuzlu sudaki elektrotların su (H_2O) moleküllerini ayrıştırmasıyla ortaya çıkan H_2 gazını ölçerek te H_2 oluşumuna kaç elektronun katıldığını bulabiliriz. Serbest pozitif yük sayısı q değişkeniyle, zamanla da değişmiyorsa Q ile gösterilir.

Elektrik akımı: Elektrik akımı¹³ i , devredeki elektron hareketinin ters yönde oluşturduğu elektron eksilmesi hareketidir. Elektrik akımı artı yükün akış hızıdır. Hareket edebilen elektronlar ise eksi yüklü taneciklerdir. Bu nedenle devredeki $-\frac{dq}{dt}$ elektron akışı elektronların aktığı yönde $i = -\frac{dq}{dt}$ kadar elektrik akımına neden olur. Eksi işareti akımın elektron akışına ters yönde olduğunu gösterir. Şekil 1.5.1'de bir devredeki elektrik akımın ve elektronların akış yönleri görülüyor. Elektrik akımını *Amper* (A) ile ölçeriz. Bir amper bir saniyede tam bir Kulomb elektrik yükünün aktığını belirtir. Bir amper akım geçen bir katot elektrotta Gümüş-Nitrat ($AgNO_3$) çözeltisinden toplanan gümüş miktarı tam olarak 6.24×10^{18} gümüş atomudur.



Şekil 1.5.1: Akımın yönü. Bir iletken de gerilim kaynağının etkisiyle elektronlar hareket eder. Akım elektron hareketine ters yönde akar.

Devreden geçen toplam yük miktarı akımın zamana göre integraliyle bulunur. $q = \int i dt$ integrali i akımı zamana bağlı olarak değişmiyorsa $\Delta q = i \Delta t$ olarak hesaplanır. Δq ile Δt ve za-

¹³current

mana bağımlı olmayan i büyük harfle Q , T , ve I ile gösterildiğinde bağıntı $Q = I T$ biçimini alır.

Elektrik yükü *Kulomb* (C) birimiyle ölçülür. Bir Kulomb yaklaşık 6.24×10^{18} elektronun yüküne eşittir. Bu kadar çok elektronun bir madde üzerinde protonlarla denkleşmeden yer alması genellikle mümkün olmaz. Laboratuvar ortamlarında sıklıkla pikoKulomb ($\text{pC} = 10^{-12}\text{C}$), nanoKulomb ($\text{nC} = 10^{-9}\text{C}$) veya mikroKulomb ($\mu\text{C} = 10^{-6}\text{C}$) gibi çarpanlı birimler kullanılır. Örneğin bir elektronun yükü $-1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C} = -1.602 \cdot 10^{-7} \text{ pC} = -1.602 \cdot 10^{-10} \text{ nC}$ 'dir.

Charles Augustin Coulomb (1736–1806): Adı yük birimine verilen Coulomb Fransa doğumlu askeri mühendistir. Emekli olunca kendini bilimsel çalışmalara adanmış ve yükler arasındaki kuvvetin uzaklığın karesiyle ters orantılı olduğunu göstermiştir.

Andre-Marie Ampere (1775–1836) elektrodinamiğin kurucusu olan bir Fransız fizikçisi ve Amper birimine adını veren bilim adamıdır. 1820'li yıllarda elektromagneti bulmuş ve akımı ölçmek için bugünkü döner göstergeli ampermetreye benzer bir düzenek kurmuştur.

Gerilim veya Voltaj: Elektronlar birbirini iterek serbest elektron yoğunluğunun çok olduğu iletkenlerden az olduğu iletkene doğru bir elektron hareketine neden olur. Serbest elektron yoğunluğu farklı olan iletkenler arasında bu harekete neden olan elektrik gerilimi farkına kısaca *gerilim farkı*¹⁴ ya da *voltaj* diyoruz ve *Volt* (V) birimiyle ölçülendiriyoruz.

İki iletken arasındaki voltaj veya gerilim farkı, u , bir iletken diğerine q Kulomb yük geçtiğinde iletilen w miktardaki enerjiyle tanımlanır. Bir iletken diğerine bir Kulomb yük geçtiğinde devrenin uçlarındaki gerilim farkı devrenin iletmiş olduğu Jul biriminden enerjiye eşittir. Zamanla değişmeyen gerilim farkını U , enerjiyi ise W ile göstereceğiz.

$$U = \frac{W}{Q}, \text{ ya da birimlerin kullanımıyla açıklarsak:}$$

$$\text{Volt} = \text{Jul} / \text{Kulomb} = \text{Newton-metre} / \text{Kulomb}$$

Akım bir devre elemanının içinden geçer, oysa gerilim elemanın iki ucu arasında oluşur. Bu nedenle akım *elemandan geçen değişken*¹⁵,

¹⁴potential

¹⁵through variable

gerilim ise *uçtan-uça değişken*¹⁶ olarak anılır.

Alessandro Antonio Volta (1745–1827): Gerilim Birimine adı verilen Alessandro Antonio Volta elektrik bataryasını icad ederek ilk sürekli akımı oluşturan ve daha sonra da kapasitörü bulan İtalyan fizikçisidir. İtalyadaki Como'da bir asil ailenin oğlu olan Volta elektrik deneylerine 18 yaşlarında başlamış ve 1800lerin başında yayınlarıyla elektrik devre teorisini başlatmıştır.

İdeal gerilim kaynağı ne akım geçerse geçsimiki ucu arasındaki gerilim değişmeyen devre elemanıdır. Pratikteki gerilim kaynakları pil veya jeneratör gibi başka enerji türlerini elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır ve ancak belli akım sınırları içinde çalışırken sabit gerilim sağlayabilir.

Güç aktarımı: Güç birimi olan Watt kısaca W ile gösterilir. I sabit akımı yalnızca $T = 1$ saniye akarsa geçen yük $Q = I \cdot 1$ Kulomb, böylece aktarılan iş $W = U \cdot I \cdot 1$ W-s olacaktır. Bu durumda aktarılan güç ise $P = U \cdot I$ W olur.

İş ve enerji aktarımı: Bir devre elemanının uçları arasında u voltluk gerilim farkı varken elemandan gerilimin artı ucundan eksi ucuna geçen q Kulomb yük elemana $w = u \cdot q$ Jul iş aktarır. Yük eksi uçtan artıya doğru geçiyorsa bu kez devre elemanından devreye $w = u \cdot q$ Jul iş aktarılmış olur.

İş birimi olarak kullanılan Watt.saniye kısaca W-s ile gösterilir. Watt-saniye küçük bir birimdir ve elektronik devre elemanlarının gücü için sıkça kullanılır. Sıkça kullanılan diğer iş birimleri arasında Watt.saatt (kısaca W-h) ve kiloWatt saat (kW-h) sayılabilir. $1 \text{ W-h} = 3600 \text{ W.s}$, ve $1 \text{ kW.h} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ W.s}$ değerindedir.

Örnek 1.5. 230V şebeke geriliminden 2A akım çeken cihazın bir günde harcadığı enerjiyi bulun.

Çözüm: Cihazın gücü $P = 2A \cdot 230 \text{ V} = 460 \text{ W}$, ve 24 saatte harcadığı enerji $W = 460 \times 24 = 11040 \text{ W.h}$ olur. Bu değeri elektrik sayaçlarının kullandığı kW.h biriminde $W = 11.04 \text{ kW.h}$ olarak yazabiliriz.

¹⁶across variable

Örnek 1.6. 12 V sabit gerilim verebilen bir batarya 0.5A akım ile 2 günde tüketiyor.

- (a) Bataryanın tükeninceye dek verdiği gücü ve enerjiyi bulun.
 (b) Batarya aynı toplam enerjiyi 0.1A akım vererek kaç saatte tüketir?

Çözüm: (a) Bataryanın verdiği güç

$P=0.5A \times 12V = 6 \text{ W}$ olarak hesaplanır. Toplam enerji ise

$W = 6W \times 2\text{gün} \times 24\text{saat/gün} = 288 \text{ W.h}$ bulunur.

(b) $288 \text{ W.h} = 0.1A \times 12V \times K$ denkleğinden

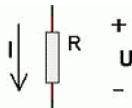
$K = 280 / (12 \times 0.1) = 233 \text{ h}$ elde edilir.

1.6 Direnç ve Ohm Kanunu

Metallerin iletkenliğinin göreceli olduğunu, ve bazı metallerin diğerlerinden daha iyi iletken olduğunu görmüştük. İletkenliği az olan maddeler aynı gerilim farkı altında elektron hareketine karşı belirgin bir direnç gösteriyorken iyi iletken maddeler elektronların serbestçe akmasına izin verir. Bu şekilde iletkenliği az olan maddeleri elektrğin akmasına tam istediğimiz derecede direnç gösterecek biçime getirerek istediğimiz R değerini elde ederiz. Bir direnç üzerindeki gerilim farkına karşı içinden akan akım nedeniyle devreden enerji çeker. Bu enerji genellikle direncin ısınması yoluyla ortama döner.

1.6.1 Ohm Kanunu

Üzerinden akan akım (i) iki ucu arasındaki gerilim farkı (u) ile doğru orantılı olan devre elemanına *direnç*, $u = R i$ bağıntısındaki R orantı katsayısına *direnç değeri* denir. Zamanla değişmeyen akım I ve gerilim U şekil 1.6.1'deki yönlerde seçilmişse $U = R I$ olur.



Şekil 1.6.1: Ohm kanununda akım ve gerilimin yönleri

Bir direnç eğer bir volt gerilim altında tam bir amper akıma neden olursa direncin değerine bir *Ohm* (Ω) diyoruz. Direncin üzerinde gerilim farkı $U=1V$ (volt) iken üzerinden akan akım $I=1A$ (Amper) ise o direncin değeri $R=1\Omega$ (Ohm) olur. Direncin tersine ($1/R$) iletkenlik G denir. İletkenliğin birimi $\mathcal{U}$ (mhO) ile veya S (Siemens) ile gösterilir. Ancak iletkenlik devre analizinde nadiren kullanılır. $U = R I$ bağıntısı iletkenlik kullanılarak $G = \frac{I}{U}$ veya $I = G U$ olarak yazılabilir.

Ohm için kullanılan sembol yunan alfabesinin Ω harfidir ve *Omega* olarak okunur. Direnci düşük elemanlar yüksek olanlara göre daha iletkendir. 1 ile 100 Ω arasındaki küçük dirençler yaygın olarak güç devrelerinde kullanılırken, 1000 ile $10^{10}\Omega$ arasındaki dirençler daha çok elektronik devrelerde kullanılır. Devre şemasında direnç Şekil 1.6.2de görüldüğü gibi zigzag çizgi ya da uzun dikdörtgen kutu biçiminde gösterilir.



Şekil 1.6.2: Devre Çiziminde Direnç Sembolleri

Yüksek değerli dirençleri kolay okuyabilmek ve yazabilmek için 1000 katsayısı kilo (k) olarak, 1000000 katsayısı ise Mega (M) olarak gösterilir. Kilo ile Mega da eski Yunanca sözcüklerdir.

$$1000\Omega = 1 \times 10^3\Omega = 1k\Omega;$$

$$1000000\Omega = 1 \times 10^6\Omega = 1 M\Omega; 1\Omega = 1 \times 10^{-6}M\Omega$$

$$1\Omega = 1 \times 10^{-3}k\Omega = 1 \times 10^{-6}M\Omega.$$

Örnek 1.7. 100 Ohm direnç kaç kOhm eder ?

$$\textbf{Çözüm: } 100 \Omega = 100 \times 10^{-3} \times 10^3 \Omega = 100 \times 10^{-3} k\Omega = 0.1 k\Omega$$

Örnek 1.8. 5.60 kOhm kaç MOhm eder ?

$$\begin{aligned} \textbf{Çözüm: } 5.60 k\Omega &= 5.60 \times 10^3 \Omega = 5.6 \times 10^{-3} \times 10^3 \times 10^3 \Omega \\ &= 5.6 \times 10^{-3} \times 10^6 \Omega = 0.0056 M\Omega \end{aligned}$$

1.7 Dirençte harcanan güç

Bir elemanın üzerindeki u gerilimi ve geçirdiği i akımından ötürü devreden elemana $p = i u$ kadar güç aktarılır. Direnci R olan eleman Ohm kanununa göre $u = R i$ bağıntısı nedeniyle $p = u^2/R = i^2 R$ kadar güç harcar. Zamanla değişmeyen i , ve u değerleri eğer I ve U ile gösterilirse R dirençli devre elemanının gücü $P = IU = (U/R) \times U = U^2/R$ elde edilir. Benzer şekilde $U = I \times R$ bağıntısı ile $P = I \times I \times R = I^2 \times R$ bulunur.

Örnek 1.9. Şekil 1.6.1'deki dirençten 10 saniye boyunca $I = 5$ A akım geçiyor. Direnç üzerine $U = 20$ V gerilim farkı okunuyor. Dirence aktarılan toplam işi ve gücü bulunuz.

Çözüm: Aktarılan iş: $W = U I T = 20 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} \cdot 10 \text{ s} = 1000 \text{ W s}$, güç: $P = U \cdot I = 20 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = 100 \text{ W}$ bulunur.

Örnek 1.10. 30W güç harcayan bir direncin üzerinde 120 V gerilim okunuyorsa geçen akımı bulunuz.

Çözüm: $P = U I$ bağıntısını düzenlersek $I = P/U$ olur. Dirençten geçen akım $I = 30 \text{ W} / 120 \text{ V} = 0.25 \text{ A}$ bulunur.

1.7.1 Direncin etiket gücü (Nominal gücü)

Etiket gücü direncin teknik tanımında verilen koşullarda sürekli çalışabileceği en yüksek güçtür. Bir direncin etiket gücü (nominal güç) birim zamanda yayabileceği ısı ile sınırlıdır. Küçük boyutlu bir direnç büyüğe göre daha az ısı yayabileceğinden etiket gücü daha azdır. Direnç etiket gücünün üzerinde çalıştırılırsa çıkan ısı kısa sürede elektriksel özelliklerini bozar. Piyasadaki en küçük tip baskılı devre dirençlerinin etiket gücü 0.125 W ($= 1/8 \text{ W}$) kadardır. Yaygın kullanılan daha güçlü dirençlerin etiket gücü $1/4 \text{ W}$, $1/2 \text{ W}$, 1 W , 2 W ve 5 W olarak sayılabilir. Daha güçlü dirençler genellikle baskılı devre haricinde kullanılır. Dirençler güç ortalaması etiket gücünü geçmeyecek biçimde kısa süreler için etiket gücünün kat kat üstündeki anlık güçlerde çalışabilir. Bu bakımdan direncin maksimum gücü ve etiket gücü farklı kavramlardır.

Örnek 1.11. 100Ω $1/4$ W etiket değerli direnç en fazla kaç voltluk DA gerilime dayanabilir?

Çözüm: Direnç üzerinde $P = U^2/R$ olduğuna göre
 $U^2 = P \times R = 25$ ve $U = 5$ V bulunur.

Örnek 1.12. Etiket gücü $1/4$ W olan 100Ω direnç 100 mA akıma dayanabilir mi?

Çözüm: Direnç üzerinde $P = I^2 \times R$ olduğuna göre
 $P = 0.1 \times 0.1 \times 100 \text{ W} = 1 \text{ W}$ güç olduğundan $1/4$ W etiket güçlü direnç 1 W güce dayanamaz ve yanar.

Örnek 1.13. 240 V ile beslendiğinde nominal 480W 'lık ısı sağlayan bir ısıtıcı direnç elemanın

- (a) devreden çekeceği akımı bulunuz.
- (b) Elemanın direncini bulunuz
- (c) Bir litre suyu bir derece ısıtılmak için 4.2 kJ enerji gerekir. 480 W-s gücündeki eleman 10 litre suyu kaç dakikada 10 dereceden 60 dereceye ısıtır?
- (d) gerilim 120 Volta düşerse ısınma süresi kaç dakikaya çıkar.

Çözüm: (a) $P = U I$ bağıntısından başlarsak
 $I = P/U = 480\text{W} / 240\text{V} = 2\text{A}$ bulunur.
 (b) Direnci $R = U/I = 240 \text{ V} / 2\text{A} = 120 \Omega$ bulunur.
 (c) 10 litre suyu 50 derece ısıtmak için $50 \times 10 \times 4.2 \text{ kJ} = 2100 \text{ kJ}$ enerji gerekir. Bu enerjiyi 480W-s veren eleman toplam $T = 2100 \text{ kJ} / 480 \text{ W} = 4375$ saniyede ya da $4375/60 = 73$ dakikada üretir.
 (d) $P = U^2/R$ bağıntısı sonucu güç
 $120\text{V} \times 120\text{V} / 120\Omega = 120\text{W}$ a düşer. Enerji sabit kalıp güç dörtte bire düşünce süre $T = E/P$ gereği dört kat artarak
 $2100000/120/60 = 292$ dakikaya (=4 saat 52 dakika) çıkar.

1.8 Uygulamada İletken ve Direnç

1.8.1 Boyutları bilinen bir iletkenin direnci

Özdirenç (Specific resistance): Bir iletkenin direnci, iletkenin boyuna (L), kesit alanına (S), ve öz direncine (ρ) göre değişir. 1

metre uzunluğunda ve 1 mm^2 kesit alanında bir iletkenin direncine iletkenin *özdirenci* ρ denir (yunan alfabesinde ρ , ro okunur). İletkenin direnci uzunluğu ile doğru orantılı, kesit alanı ile ters orantılıdır.

$$R = \frac{L}{S}\rho \quad (1.8.1)$$

Özdirenc iletkenin cinsine göre değişir. Aynı boyutlardaki bir bakır ile bir alüminyum iletkenin dirençleri birbirinden farklıdır. Tablo 1.8.1da çok kullanılan iletkenlerin özdirençleri görünüyor.

Tablo 1.8.1: Metallerin özdirençleri

İletken	Özdirenci
Gümüş	0.016
Bakır	0.017
Altın	0.023
Alüminyum	0.028
Demir	0.012

Örnek 1.14. Bakırın özdirenci $\rho=0.017\Omega$ olduğuna göre uzunluğu 10 metre, kesiti 0.1 mm^2 olan bakır telin direnci nedir?

Çözüm:

$$R = \frac{L}{S}\rho = \frac{10}{0.1}0.017\Omega = 1.7\Omega.$$

Örnek 1.15. Uzunluğu 200 metre, kesiti 3mm^2 olan alüminyum telin direncini hesaplayınız.

Çözüm: Alüminyumun özdirenci $\rho = 0.028\Omega$ dur.

$$R = \frac{L}{S}\rho = \frac{200}{3}0.028\Omega = 1.87\Omega \text{ bulunur.}$$

Örnek 1.16. Çapı $d = 3 \text{ mm}$ ve uzunluğu 200 m olan bakırdan yapılmış hattın direncini hesaplayınız.

Çözüm: Bakır için $\rho = 0.017$;

$$\text{Kesit alanı } S = \frac{\pi d^2}{4} = 7.06 \text{ mm}^2;$$

$$\text{Direnç } R = \frac{L}{S}\rho = \frac{200}{7.06}0.017\Omega = 0.48\Omega.$$

Sıcaklık katsayısı: Sıfır ile yüz derece arasında metallerin direnci sıcaklıkla değişme katsayısı T ye bağlı olarak sıcaklıkla artar. Metalin t_1 sıcaklığındaki direnci R_1 ise T katsayısı kullanılarak t_2 sıcaklığındaki direnci

$$R_2 = R_1 \frac{T + t_2}{T + t_1}. \quad (1.8.2)$$

olur.

İletken olarak çok kullanılan metallerin T katsayılarını Tablo 1.8.2de bulabilirsiniz.

Konstantan adı verilen 55 % bakır, 44 % Nikel und 1 % Mangan alaşımı direnci sıcaklıkla en az değişim gösteren alaşımdır. Telli direnç, reosta ve potansiyometreler genellikle konstantan telden sarılır.

Tablo 1.8.2: Metallerin sıcaklıkla direnç değişme katsayısı, T

Metal	T , direnç sıcaklık katsayısı
Kurşun	218
Gümüş	243
Bakır	235
Alüminyum	236
Çinko	250
Pirinç	650

Örnek 1.17. Bir alüminyum iletkenin 30 derecedeki direnci 10 ohm olduğuna göre bu iletkenin 100 derecedeki direncini hesaplayınız.

Çözüm Alüminyumun T katsayısı 236 dır. Formüle göre

$$R_2 = R_1 \frac{(236 + t_2)}{(236 + t_1)} = 10 \frac{(236 + 100)}{(236 + 30)} = 10 \frac{116}{266} = 4.36\Omega.$$

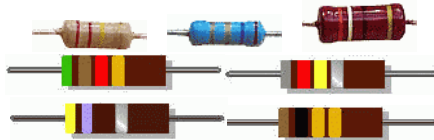
1.8.2 Elektronikte kullanılan dirençler

Dirençlerin Renk Kodları: Dirençlerin en önemli iki özelliği direncinin oda sıcaklığındaki omik değeri ile direncin gücüdür. Elektronik devrelerde kullanılan dirençlerin omik değeri direnç üzerine

ya rakamla (2W ve üzeri) ya da renk kodlarıyla yazılır (1W ve altı). Şekil 1.8.1'deki gibi renk bantları üç bant birarada, bir bant biraz daha ayrı olarak konmuştur. Üçlü grubun ilk iki rengi omik değerin rakamlarını kodlar. Üçüncü renk çarpan, daha ayrı duran dördüncü renk tolerans değeridir. Renklerin kodlanmış değerleri Tablo 1.8.3'deki gibidir.

Tablo 1.8.3: Direnc Renk Kodları Anahtarı

	bant-1	bant-2	bant-3	bant-4
renk	rakam-1	rakam-2	çarpan	tolerans
altın			0.01	5%
gümüş			0.1	10%
siyah	0	0	1	
kahve	1	1	10	1%
kırmızı	2	2	100	0.1%
portakal	3	3	1000	0.01%
sari	4	4	10 000	
yeşil	5	5	100 000	
mavi	6	6	1000 000	
mor	7	7	10 000 000	
gri	8	8	100 000 000	
beyaz	9	9	1000 000 000	
eksik			eksik	20%



Şekil 1.8.1: Elektronikte kullanılan dirençlerden bazıları ve dört bantlı renk kodu örnekleri

1.8.3 Standart Direnç değerleri

Direnç üreticileri her değerden direnç üretemez. Zaten dirençlerin değerleri malzemesine bağlı olarak sıcaklık ve zamana bağlı değer kayması gösterir. Örneğin 10k amaçlanarak üretilen direnç sıcaklık değiştiğinde 9.8k ile 10.2k arasında değişim gösterebilir. Üretici bu durumda direnci $10k \pm \%5$ olarak kodlayarak piyasaya sürer. %5 tolerans sağlayan bir direnç 9.5 ile 10.5 kOhm arasında bir değerde olabilir demektir. 10k dan sonraki %5'lik direncin 11.1 kOhm olması beklenir. Direnç renk kodunun ilk iki bandını 10 sayısından başlayarak %10 artışlarla bir dizi olarak yazarsak standart %5 toleranslı direnç dizisini (**10 11 12 13 15 16 18 20 22 24 27 30 33 36 39 43 47 51 56 62 68 75 82**) elde ederiz. Benzer şekilde %20 artışlarla giden diziye de %10 toleranslı dirençlerin standart dizisi (**10 12 15 18 22 27 33 39 47 56 68 82**) denir. Bu dizilerdeki sayıların herhangi bir çarpanla elde edilebilecek tüm direnç değerleri piyasada bulunur.

Sonu kahverengi bantla biten beş renk bantlı dirençler %1 toleranslıdır ve ilk üç bant değerini, dördüncü bant çarpanını, beşinci bant toleransını belirtir.

Örnek 1.18. Şekil 1.8.1'deki ilk üç direncin değerlerini okuyalım.

Çözüm: Dirençlerdeki renkleri kenara en yakın banttan başlayarak okuyalı, ikinci dirençteki renkler bordo mavi altın gümüş, üçüncüdekiyse turuncu beyaz siyah altındır.

$$\begin{aligned} & \text{Direnç 1: } R_1 = \{\text{kırmızı kırmızı sarı altın}\} 22 \times 10^4 \Omega \\ & = 220000 \Omega = 220 \text{ k}\Omega \pm \%5; \end{aligned}$$

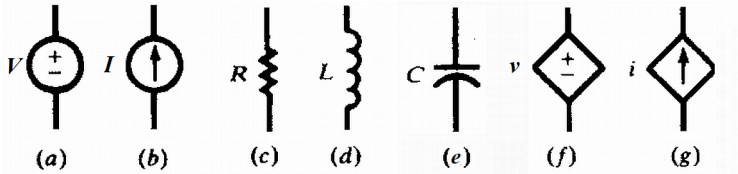
$$\begin{aligned} & \text{Direnç 2: } R_2 = (\text{kahverengi mavi altın gümüş}) 56 \times 10^{-2} \Omega \\ & = 56 / 100 \Omega = 0.56 \Omega \pm \%10; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Direnç 3: } R_3 = (\text{kahverengi beyaz siyah altın}) 39 \times 10^0 \Omega \\ & = 39 \times 1 \Omega = 39 \Omega \pm \%5; \end{aligned}$$

1.9 Direnç Devreleri ve Devre Kanunları

İdeal devre elemanı: Terminalleri arasında ölçülebilir karakteristik gerilim ve akım davranışları gösteren nesnelere *devre elemanı*

diyoruz. Sık kullanılan devre elemanlarını Şekil 1.9.1'de görüyoruz. Bağımsız gerilim ve akım kaynakları devreye sabit ya da periyodik akım veya gerilim sağlar. Bağımlı kaynakların akım ya da gerilimi devrede bir değişkene, örneğin bir koldaki akıma bağlı olarak değişebilir. Dirençlerin akımı gerilimiyle orantılıdır. Gerilimi akımın türeviyle orantılı olan ideal eleman *endüktör* olarak, orantı katsayısı da *endüktans* L olarak adlandırılır ve bobinlerdeki davranışı açıklar. Akımı gerilimin türeviyle orantılı olan ideal eleman *kondansatör* olarak, orantı katsayısı da *kapasitans* C olarak adlandırılır. Endüktans ve kapasitans ileri bölümlerde, bağımlı akım ve gerilim kaynaklarını ise elektronik devreleriyle göreceğiz.



Şekil 1.9.1: Devre elemanlarının sembolleri. (a) ve (b) bağımsız gerilim ve akım kaynakları, (c) direnç (d) bobin (e) kondansatör (f) ve (g) bağımlı gerilim ve akım kaynakları.

Gerçek hayattaki devre elemanlarının davranışı basit matematiksel ifadelerle tanımlanamasa da devre analizinin kolaylığı açısından biz devrelerimizdeki elemanların matematiksel bağıntılara tam olarak uyduğunu varsayabiliriz. Gerçek dünyada olmayan bu mükemmel devre elemanlarına *ideal devre elemanı* diyeceğiz. Örneğin gerçek hayatta dirençler elektrik geçince ısınır. Bu yüzden R değerleri değişir ve Ohm kanunundan saparlar. Oysa analiz ettiğimiz devrelerdeki ideal dirençlerin Ohm kanununa tam olarak uyduğunu varsayabiliriz.

Elektrik devresi: Bir elektrik devresi, yalıtkan bir ortamdaki çeşitli devre elemanlarının iyi iletkenler aracılığıyla uçlarından (terminallerinden) birbirlerine bağlanmasıyla oluşturulur. Bu bölümde ideal devre elemanlarını, devrelerini, ve devrelerin davranışını açıklayan temel kanunları göreceğiz.

En basit anlatımla elektrik devreleri çeşitli devre elemanlarının iletkenler kullanılarak uçlarından birbirine bağlanmasıyla oluşur. Bir elektrik devresinin durumunu devreden geçen akım ve devre elemanları üzerinde oluşan gerilim betimler. Devredeki gerilim kaynakları devrede akım akması için gereken enerjiyi sağlar.

Düğüm: Bir devrede birbirine ideal iletkenlerle bağlanmış bütün uçlara **düğüm** denir. *İdeal iletkenlerin üzerinde gerilim farkı her zaman sıfırdır ve bu yüzden düğümler arasındaki gerilim değerleri devrenin önemli değişkenlerindendir.*

Çevrim ya da devre döngüsü: Birbirine komşu düğümlerin sırayla dizilmesinden oluşan zincire **çevrim** ya da **devre döngüsü** denir.

Enerji nakli devre elemanları: Enerji aktarmayı amaçlayan bir elektrik devresi elektrikli aygıtların, elektrik üreteçleri ile belli bir yapı oluşturacak biçimde iletkenlerle birbirine bağlanmasıyla oluşur. Devredeki elemanları aşağıdaki temel gruplara ayrılabiliriz.

- ▷ **İletkenler** Bakır tel gibi yüksek iletkenlik özellikleri sayesinde devre elemanlarını terminallerinden bağlayarak terminal gerilimlerini birbirine eşitleyen iletkenler;
- ▷ **Üreteçler** Jeneratör veya bataryalar gibi başka enerji biçimlerini elektrik enerjisine çevirenler;
- ▷ **Alıcılar** Direnç, elektrik motoru, lamba gibi elektrik enerjisini başka enerji biçimlerine dönüştüren alıcılar
- ▷ **Enerji saklayan elemanlar** Kondansatör veya endüktörler gibi üzerinde elektrik enerjisi biriktirip geciktirerek geri verenler;
- ▷ **Ölçü aletleri** Akım ve gerilim gibi devre değişkenlerini ölçenler;

- ▷ **Anahtarlar** Sigorta (devre koruyucu) zil düğmesi, ışık düğmesi gibi gerektiğinde devreyi keserek devredeki güç iletimini durduran anahtarlar;
- ▷ **Aktif devre elemanları** Giriş terminallerinden ulaşan elektrik enerjisine bağlı olarak çıkış terminallerinden geçen elektrik enerjisini ayarlayabilir.

Bunlar arasında aktif devre elemanları elektronik dalının konusudur ve daha ileride ilgileneceğiz.

1.9.1 Yön ve Polarite İşaretleri

Gerilim ve akım yönlü değişkenlerdir. Gerilimin yönü (+) ve (-) ile gösterilir. Örneğin (+) uç A, (-) uç B ile markalanmışsa aradaki gerilimi V_{AB} ya da $-V_{BA}$ olarak tanımlayabiliriz. Gerilim gerçekte (+) ve (-) polaritede değilse negatif değer alır.

Akımın yönü ($\rightarrow$) ok ile gösterilir. Okun ucu pozitif yüklerin aktığı yöndedir. Eğer gerçekte ok yönünde değilse akım da negatif değer alır.

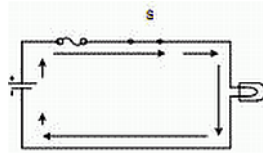
1.9.2 Açık, Kapalı ve Kısa Devre ve Devre Akımı

Güç iletecek elektrik devreleri üreteçlerden gelen gücü alıcılara aktarmak üzere kurulur.

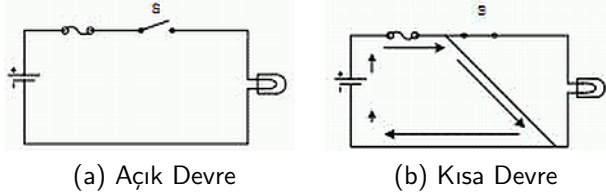
Açık devre: Devrede bir anahtar eleman varsa anahtar akımı kestiğinde güç alıcıya ulaşamazsa oluşan devreye *açık devre* diyoruz

Kapalı devre: Bir elektrik devresi üreteçten alıcıya amaçlanan güç aktarımını sağlayabiliyorsa devreye *kapalı devre* diyoruz.

Kısa devre: Devrede akımın bir anahtar veya bir iletken üzerinden alıcıya ulaşmadan kısa yoldan akarak tamamlanmasına kısa devre diyoruz.



Şekil 1.9.2: Kapalı Devre



Şekil 1.9.3: Açık, kapalı ve kısa devre örneği

Doğru Akım (DA): Akım terminaleri bağlayan iletkenlerden bir saniyede ters yönde geçen elektron miktarıdır ve Amper (A) biriminde ölçülür. Bir Amper, bir kesitten bir saniyede 6.25×10^{18} elektron akması olarak tanımlanır. Formülle gösterirsek $i = \frac{dq}{dt}$ ifadesinde q = elektrik yükü (C, Kulomb); i = Akım (A, Amper); t = zaman (s, saniye) dir. Yönü ve şiddeti zamanın fonksiyonu olarak değişmeyen, daima aynı yönde ve aynı şiddette akan akım *doğru akımdır* ve DA akım olarak kısaltılır. Doğru akım üreticiyle (DA kaynak) beslenen devrelerde doğru akım oluşması beklenir. Eğer $T = \Delta t$ süresindeki ortalama akıma I dersek, Δt süresinde geçen elektron miktarını $Q = \Delta q$ ile gösterdiğimizde formülümüz $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{Q}{T}$ olur.

Örnek 1.19. Kesitinden saniyede 12 Kulomb yük akan iletkenin geçirdiği akımı bulunuz.

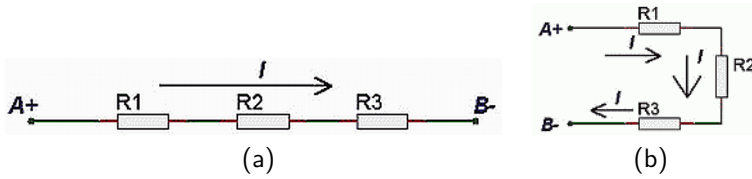
Çözüm:
$$I = \frac{Q}{T} = \frac{12 \text{ Kulomb}}{1 \text{ s}} = 12 \text{ A,}$$

1.9.3 Seri bağlı devre elemanları

Herhangi iki eleman birbirlerine birer ucundan ikisinden de aynı akım geçecek şekilde bağlı ise buna *seri bağlantı* denir. Elektron-

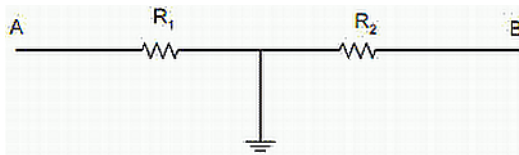
ların bir terminali diğerine bağlayan iletken den akışıyla iki elemandan da aynı akım gerçekleşir.

Birden çok direncin aynı akım hattı üzerine dizilmesi ile oluşan direnç grubuna *seri dirençler* diyoruz. Örneğin Şekil 1.9.4'de seri bağlı üç direnç görülüyor. Seri direnç grubuna bir gerilim kaynağı bağlanırsa seri bağlı bütün dirençlerin üzerinden ve gerilim kaynağından aynı akım geçer.



Şekil 1.9.4: Devre değişik çizilse de aynı akım yolu üzerindeki dirençler seri bağlıdır.

Seri bağlı elemanlar Gerilim (potansiyel) daima iki nokta arasında tanımlıdır. Ancak devreleri çözümlerken noktalarından birini ortak sıfır noktası kabul ederek bağlantı noktalarının bu ortak noktaya göre gerilimini hesaplamak devre çözümlmeyi kolaylaştırır. İdeal iletkenlerle birbirine bağlanan uçlarda elektrik yükü iletken den serbestçe her yöne ulaşacağından ortak noktaya göre bir tek gerilim değeri oluşur. Birbirine ideal iletkenlerle bağlanmış bütün uçlara **düğüm**, devremizdeki sıfır noktası kabul edilen ortak noktaya **toprak düğümü**, **referans düğümü** veya **ortak düğüm** denir. Toprak düğümünden diğer düğümlere olan gerilim farkları düğümün adıyla indekslenir.

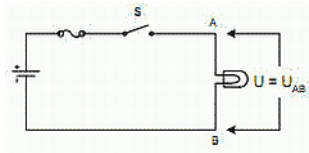


Şekil 1.9.5: Potansiyel hesabı örnek devresi

Örnek 1.20. (a) Şekil 1.9.5'deki dirençler seri bağlı mıdır? (b) A ve B noktaları toprağa karşı 30V ve 25V olarak ölçülüyorsa U_{AB} gerilimi ne kadardır.

Çözüm: (a) R_1 ve R_2 dirençleri birbirine seri bağlı olmaları için R_1 üzerinden geçen akımın tümünün R_2 den de geçmesi gerekir. Devredeki dirençler seri gibi görünse de iki direncin bağlandığı düğüm toprağa da bağlanmıştır ve R_1 üzerindeki akımın bir kısmı toprağa gidecektir. Bu nedenle dirençler seri bağlı değildir. (b) $U_{AB} = U_A - U_B = 30 - 25 = 5V$. Örnekteki U_{AB} gerilimi A 'dan B 'ye olan gerilim olarak ifade edilir.

Örnek 1.21. Şekil 1.9.6'deki B noktası toprak düğümü kabul edilirse U_A , U_B ve U_{AB} gerilimleri arasındaki bağıntıları bulunuz



Şekil 1.9.6: Gerilim iki nokta arasındaki potansiyel farkıdır.

Çözüm: U_A terimi A düğümünün toprak düğümüne göre potansiyelini; U_B terimi B Noktasının toprak düğümüne göre potansiyelini; $U = U_{AB}$ sembolleri A ve B noktaları arasındaki gerilimi göstermektedir. B toprak düğümü olduğundan $U_B = 0$ dır. U_A gerilimi aynı zamanda A düğümünün B düğümüne göre gerilimdir. $U_A = U = U_{AB} = U_A - U_B$ olur.

Elektrik Üreteci: Üreteç (kaynak) farklı enerji biçimlerini elektrik enerjisine çevirir. Bir batarya, kimyasal reaksiyon sonucu çıkan enerjiyi, bir elektrodundaki yükleri diğerine aktarmakta kullanır. Bataryanın anodundan (pozitif elektrodu) katoduna (negatif elektrodu) geçmeye zorlanan bu elektronlar bataryanın iki kutubu arasında bir gerilim farkı oluşturur.

Elektro-Motor Kuvvet: Bir üretcin devresinden hiç akım geçmezken iki ucu arasında ölçülen gerilim farkına Elektro-Motor-Kuvvet (EMK) denir. EMK Volt (V) birimiyle ölçülür.

Şekil 1.9.7'deki devremizde anahtar kapalıyken üretcin üzerindeki gerilim $A-B$ arasındaki $U = U_{AB}$ gerilimiyle aynıdır. Ama anahtar açıkken U gerilimi sıfıra düşerken üretcin gerilimi ise EMK değeri olan E potansiyeline ulaşır.

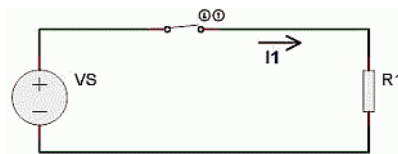
Birim Katsayıları mikro, mili, kilo, mega: Elektrik devrelerindeki gerilim akım direnç ve frekans ve tepki zamanı gibi değişkenler çok geniş aralıklarda değer alabilir. Bu değerleri kolay okuyabilmek için 0.0000001 *mikro* olarak, 0.001 *mili* olarak, 1000 *kilo* olarak, 1000000 *Mega* olarak adlandırılır. *Mikro* için μ , *mili* için m, *kilo* için k, *mega* için M kısaltması kullanılır.

1.9.4 Paralel bağlı elemanlar

İki devre elemanı her iki ucundan birbirine bağlıysa uçlarındaki gerilim birbirine eşitlenir ve bu bağlantıya **paralel bağlantı** denir.

Tek direnç ve gerilim kaynaklı devre Tek direnç ve gerilim kaynaklı devrede direnç ile gerilim kaynağı hem seri hem de paralel bağlıdır. Üzerlerindeki gerilimler ve akımlar birbirine eşittir. Ohm kanunu bir devrede akımı bilinen dirençlerin gerilimini, gerilimi bilinenlerin de akımını kolayca hesaplamamızı sağlar.

Örnek 1.22. Şekil 1.9.7'deki I_1 akımı 2A, R_1 direnci 10 Ohm ise V_S gerilim kaynağının değeri nedir?



Şekil 1.9.7: Devre-1

Çözüm: Ohm kanununu R_1 direncine $U_{R1} = R_1 \cdot I_1$ biçiminde uygulamak için önce U_{R1} geriliminin yönünü bulmalıyız. U_{R1} geriliminin artı ucu I_1 akımının R_1 e girdiği ucunda olacaktır. V_S ile U_{R1} hem artı hem eksi uçlarından birbirine bağlı olduğundan aynı gerilimdedirler. Böylece $V_S = U_{R1} = R_1 I_1$ olarak yazılır ve kaynak gerilimi $V_S = 10 \text{ V}$. $2 \text{ A} = 20 \text{ V}$ olarak bulunur.

Örnek 1.23. Şekil 1.9.7'deki devrede R_1 bilinmemekte, $V_S = 10 \text{ V}$, ve $I_1 = 2 \text{ A}$ ölçülmüşse R_1 üzerindeki gücü bulun

Çözüm: Devre V_S kaynağının verdiği bütün gücü R_1 'e aktarır. Bu nedenle $P_{R1} = 10 \text{ V} \times 2 \text{ A} = 20 \text{ W}$ olur.

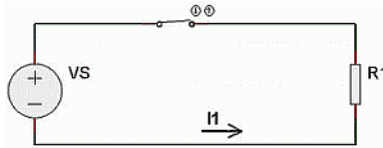
Örnek 1.24. Şekil 1.9.7'deki devrede V_S bilinmemekte, $I_1 = 50 \text{ mA}$, ve $R_1 = 120 \Omega$ ölçülmüşse R_1 üzerindeki gücü bulun

Çözüm: Dirençte çıkan güç
 $P_{R1} = 0.05 \text{ A}^2 \times 120 \Omega = 0.3 \text{ W}$ olur.

Örnek 1.25. Şekil 1.9.7'deki devrede I_1 bilinmemekte, $V_S = 10 \text{ V}$, ve $R_1 = 220 \Omega$ ölçülmüşse R_1 üzerindeki gücü bulun

Çözüm: Dirençte çıkan güç
 $P_{R1} = 10 \text{ V}^2 / 220 \Omega = 0.454 \text{ W}$ olur.

Örnek 1.26. Şekil 1.9.8'deki $V_S = 10 \text{ V}$ ve $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$ verilirse devredeki I_1 akımı nedir?



Şekil 1.9.8: Devre-2

Çözüm: R_1 direnci için Ohm bağıntısı
 $U_{R1} = R_1 \cdot I_1$ olarak yazıldığında U_{R1} geriliminin artı ucu I_1 akımının R_1 'e girdiği ucunda olduğundan V_S 'nın eksi ucuna rastlar. Bu nedenle

$U_{R1} = -V_S = R_1 \cdot I_1$ olur ve
 $I_1 = -10 \text{ V} / 20 \text{ k}\Omega = -1/2 \times 10^{-3} \text{ A} = -0.5 \text{ mA}$ bulunur.

Örnek 1.27. Şekil 1.9.8'deki I_1 akımı 25 mA, V_S gerilimi -100 V ölçülmüştür. R_1 direncinin değeri nedir.

Çözüm: Ohm bağıntısı $-V_S = R_1 \cdot I_1$ olarak yazılır ve değerler yerine konulduğunda

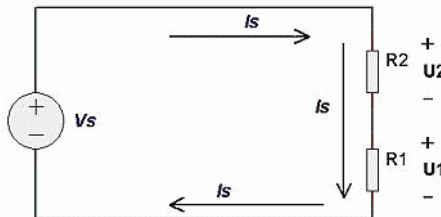
$$\begin{aligned} R_1 &= 100\text{V} / 25 \text{ mA} \\ &= 100\text{V}/0.025\text{A} \\ &= 4\,000 \, \Omega = 4 \text{ k}\Omega \text{ bulunur.} \end{aligned}$$

Devrede akımın yönü: Bir devredeki akım ve gerilimin yönü Şekil 1.6.1'deki Ohm kanununa uygun olmak zorundadır. Bir direnç ve bir gerilim kaynağından oluşan Şekil 1.9.7'deki gibi bir devrede değeri pozitif olan bir V_S gerilim kaynağının artı ucundan eksi ucuna doğru dolaşan I_1 akımı pozitif olacaktır. Direncin üzerine düşen V_{R1} gerilimi ise pozitif olan I_1 akımının dirence girdiği ucu artı olacak şekilde yönlenir.

Devredeki kaynak gerilimi V_S nin değeri negatifse I_1 akımının değeri de negatif çıkar ve direncin üzerindeki gerilim de yön değiştirir. Devredeki kaynak geriliminin değeri pozitifken I_1 akımı Şekil 1.9.8'deki gibi ters yönde seçilse bile akımın değeri negatif çıkar ve sonuçta devrenin çalışmasında değişiklik olmaz.

1.9.5 Seri dirençli devreler

Şekil 1.9.9'deki devrede aynı akım kolu üzerine iki direnç yerleştirildiğinde her bir direnç üzerinde Ohm kanununa uygun bir gerilim düşmesi oluşur. İki direncin üzerindeki toplam gerilim düşmesi devredeki kaynak gerilimi kadardır.



Şekil 1.9.9: Seri Dirençli Devre

Devre akımı I_s hem R_1 hem de R_2 üzerinden geçtiğinden yazacağımız Ohm bağlantılarındaki akımlar birbirinin aynısı olacaktır.

$$R_1 I_s = U_1 ; \text{ ve } R_2 I_s = U_2 .$$

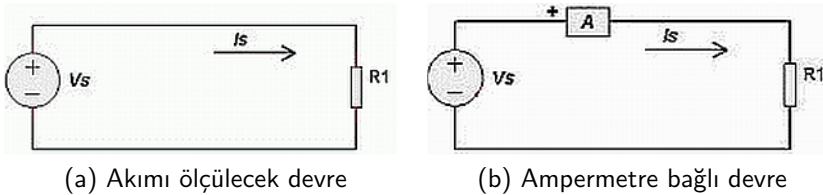
Dirençlerde düşen toplam gerilim devredeki kaynak gerilimi kadardır.

$$V_s = U_1 + U_2 .$$

1.9.6 Akım ile Gerilimin Ölçülmesi

Multimetre Bir devrenin akımını ölçmek için *ampermetre*, iki uç arasındaki gerilimi ölçmek içinse *voltmetre* kullanılır. Ampermetre ile voltmetre fonksiyonları bir *multimetre*'nin değişik ayarlarıyla yapılabilir. Ölçülecek akım ve gerilim saniyede dörtten fazla değişmiyorsa DA ampermetre ve DA voltmetre kullanılır. Saniyede on kezden fazla değişen akım ve gerilime alternatif akım AA denir, ve bunlar AA ampermetre ya da AA voltmetre ile okunur.

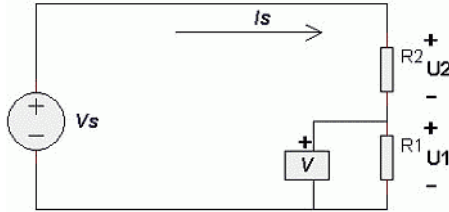
Şekil 1.9.10'deki devrenin akımının ölçümü devrenin iletkenini kesip arasına bir ampermetre yerleştirilerek yapılır. Ampermetrenin direnci devredeki toplam dirence oranla ihmal edilebilecek kadar küçük olduğundan devredeki akımı ölçülebilir derecede değiştirmedigi kabul edilir. Direnci nedeniyle devreye yerleştirilmiş bir ampermetreyi devre şematüğünde bir dikdörtgen ya da çember içinde A harfiyle göstereceğiz. Okuduğumuz akımın yönünü belirtmek için de akımın çıktığı ucu artıyla işaretleyeceğiz. Şekil 1.9.10'de bağlandığı biçimiyle ampermetre pozitif I_s akımını pozitif gösterir.



Şekil 1.9.10: Ampermetrenin Bağlanması

Gerilim tanımı gereği iki nokta arasında duran yükün üzerine düşen kuvvettir ve bu nedenle daima iki nokta arasında ölçülür. Eger gerilim ölçümü tek noktada yapılıyor gibi gösterilirse ikinci nokta yük açısından nötr kabul edilen toprak veya şase noktasıdır.

Gerilim ölçümü bir voltmetreyi devre üzerinde iki uca bağlayarak yapılır. Aynı akım ölçmedeki gibi voltmetrenin direnci devrenin ölçülecek iki ucu arasındaki dirence göre yüzlerce kat yüksek olduğundan ölçümün devreyi ölçülebilecek derecede etkilemeyeceği varsayılır.



Şekil 1.9.11: Voltmetrenin U_1 gerilimini ölçmek üzere bağlanması

Şekil 1.9.9'de görülen seri dirençli devredeki R_1 direnci üzerindeki gerilimi okumak istersek voltmetremizi devreye Şekil 1.9.11'deki gibi bağlarız. Bu şekilde bağladığımızda okuduğumuz gerilim pozitif ise U_1 geriliminin de pozitif olduğunu anlarız.

Ampermetre ve voltmetre sembolleri devre analizinde nadiren yalnızca ölçme cihazının devreye etkisini sına devrelerinde kullanılır. Tipik olarak 0-1 A aralığında ölçüm yapan bir ampermetrenin üzerinde 20 mV gerilim düşer. 0-20V aralığında ölçüm yapan sayısal voltmetrenin tipik olarak ilettiği akım 0-10 μ A aralığında kalır.

1.10 Problemler

Problem 1.1. Aşağıdakilerden hangisi elektriksel değişken değildir?

- a) akım b) gerilim c) zaman d) güç

Problem 1.2. Akım birimi hangisidir?

- a) volt b) watt c) amper d) Jul

Problem 1.3. Gerilim birimi hangisidir?

- a) ohm b) watt c) volt d) farad

Problem 1.4. Direnç birimi hangisidir?

- a) amper b) henry (c) hertz (d) ohm

Problem 1.5. Hertz hangisinin birimidir?

- a) güç b) endüktans c) frekans d) zaman

Problem 1.6. 15,000 W hangisine eşittir ?

- a) 15 mW b) 15 kW c) 15 MW d) 15 μ W

Problem 1.7. 4.7×10^3 hangisine eşittir?

- a) 470 b) 4700 c) 47,000 d) 0.0047

Problem 1.8. 56×10^{-3} hangisine eşittir ?

- a) 0.056 b) 0.560 c) 560 (d) 56,000

Problem 1.9. 3,300,000 sayısının mühendislik gösterimi nasıldır?

- a) 3300×10^3 b) 3.3×10^{-6} c) 3.3×10^6
d) hem (a) hemde (c)

Problem 1.10. On miliamper nasıl gösterilir ?

- a) 10 MA b) 10 μ A c) 10 μ A (d) 10 mA

Problem 1.11. Beşbin volt nasıl yazılır?

- a) 5000V b) 5 MV c) 5 kV d) hem (a) hem de (c)

Problem 1.12. Yirmi milyon ohm nasıl gösterilir?

- a) 20 m Ω b) 20 MW c) 20 M Ω d) 20 $\mu\Omega$

Problem 1.13. Aşağıdaki toplamaları yapın:

- a) 50mA+680 μ A b) 120k Ω + 2.2M Ω c) 0.02 μ F + 3300pF

Problem 1.14. Aşağıdaki işlemleri yapın

- a) 12 k Ω /(2.2k Ω +800 Ω) b) 250mV/50 μ V c) 1MW/2kW

Problem 1.15. Atom numarası üç olan nötr atomda kaç elektron vardır?

- a) 1 b) 3 c) hiç d) atomun tipine bağlıdır

Problem 1.16. Elektron orbitine ne denir?

- a) kabuk b) çekirdek c) dalga d) valens

Problem 1.17. Voltaj uygulansa bile akım iletmeyen maddelere ne denir?

- a) filtre b) iletken c) yalıtkan d) yarıiletken

Problem 1.18. Yaklaştırılınca pozitif yüklü madde negatif yüklü maddeyi

- a) iter b) etkilemez c) çeker d) yükler.

Problem 1.19. Potansiyel fark nedir?

- a) enerji b) voltaj c) elektronun çekirdeğe uzaklığı

Problem 1.20. Enerjinin birimi nedir?

- a) watt b) kulomb c) jul d) volt

Problem 1.21. Hangisi enerji kaynağı değildir?

- a) batarya b) güneş pili c) jeneratör d) potansiyometre

Problem 1.22. Hangisi elektrik devrelerinde asla mümkün olmaz?

- a) voltaj var akım yok b) akım var voltaj yok
c) akım ve voltaj var d) hem akım yok hem voltaj yok

Problem 1.23. Elektrik akımı nasıl tanımlanır?

- a) serbest elektronla b) serbest elektronların akış hızıyla c) elektronları hareket ettirmek için gereken enerjiyle d) serbest elektronların yüküyle

Problem 1.24. Devreden geçen akım ne zaman kesilir?

- a) anahtar kapalıyken b) anahtar açıkken c) voltaj yokken
d) hem (a) hem de (c) e) hem (b) hem de (c)

Problem 1.25. Direnç kullanmakta amaç nedir?

- a) akımı arttırmak b) akımı sınırlamak c) ısı çıkarmak
d) akımın değişmesini önlemek

Problem 1.26. Potansiyometre ve reosta nedir?

- a) voltaj kaynağıdır b) değişken dirençtir c) sabit dirençtir
d) devre kesicidir

Problem 1.27. 22 Amperi geçmeyecek bir devrede kaç Amperlik sigorta kullanılır?

- a) 10A b) 25A c) 20A d) 22 mA d) Sigorta gerekmez

Bölüm 2

Seri Devreler ve Kirşof Gerilim Kanunu

2.1 Dirençlerin Seri Bağlanması

Ohm birimi ve katları: Direnç değeri *Ohm* (Ω) cinsinden belirtilir. Ω genellikle uygulamadaki dirençleri ifade etmede çok küçük kaldığından $k\Omega$ ve $M\Omega$ yaygın olarak kullanılan bu birimlerin dönüşümlerini hatırlatmakta yarar var. $1k\Omega = 1000 \Omega$ ve $1 M\Omega = 1000 k\Omega = 1000 000 \Omega$ eşitlikleri direnç birimlerini birbirine dönüştürmekte kullanılırlar.

Ohmmetre: Bir direncin değerini ölçmekte kullanılan alete *Ohmmetre* denir. En basit haliyle ohmmetre ölçülecek direnci içindeki gerilim ya da akım kaynağına bağlayıp içinden geçen akım ya da üzerindeki gerilimde direncini hesaplayarak çalışır. Direnci gerilim kaynağına bağlayarak akımından ölçen analog aletlerde direnç okuması doğrusal olmayan özel bir ölçekten okunur. Sayısal ohmmetreler ise dirence sabit akım kaynağı bağlayıp üzerindeki geriliminden direncini bulur.

Ohmmetre ile ölçüm yaparken ölçülecek dirence bağlı devrenin etkisini yok etmek için direncin bir ucunu devreden ayrılmak gerekir.

Eşdeğer Direnç: Uçları arasına aynı voltaj uygulandığında terminal akımları aynı olan devrelere uç eşdeğeri diyoruz. Devredeki dirençlerin yerine kullanıldığında devrenin akımını değiştirmeyen direnç değeri devredeki bütün dirençlerin eşdeğeri olarak tanımlanır.

Devredeki bütün dirençlere eşdeğer bir direnç değeri bulmak için devreye U_S gerilim kaynağını bağlayalım ve devreden geçen akıma I diyelim. Her bir direncin üzerinde oluşan gerilimi U_{R1} , U_{R2} ve U_{R3} ile gösterelim. Ohm kanunu gereği her direnç için $U_{R1} = I \times R_1$,

$U_{R2} = I \times R_2$ ve $U_{R3} = I \times R_3$ yazarsak, ve $U_S = U_{AB} = U_{R1} + U_{R2} + U_{R3}$ eşitliğini de kullanırsak

$$U_S = I_S \times (R_1 + R_2 + R_3)$$

elde ederiz. Eğer devredeki üç direnç $R_E = R_1 + R_2 + R_3$ değerinde tek bir dirençle değiştirilirse devrenin akımı $I_S = U_S / R_E = U_S / (R_1 + R_2 + R_3)$ kalacaktır.

Seri Dirençlerin Eşdeğeri: Genel bir kural olarak seri bağlı k tane $R_1, R_2, \dots, R_k$ dirençlerinin devre eşdeğeri

$$R_E = R_1 + R_2 + \dots + R_k \text{ değerinde tek dirençtir.}$$

Örnek 2.1. Şekil 1.9.4-a'daki dirençlerin eşdeğeri 236Ω ölçülmüşse, $R_1 = 47 \Omega$ ve $R_3 = 39 \Omega$ olarak biliniyorsa R_2 direncinin değeri kaç Ohmdur?

Çözüm:

$$R_E = (R_1 + R_2 + R_3), \rightarrow 236 \Omega = 47 \Omega + 39 \Omega + R_2 ;$$

$$R_2 = (236 - 47 - 39) \Omega = 150 \Omega \text{ bulunur.}$$

Standart dışı dirençler: Standard dirençleri 1.8.3'de görmüştük. Bu değerlerin dışında kaldığı için bulunamayan dirençleri iki dirençten oluşturmak mümkündür.

Örnek 2.2. Seri bağlı %5 toleranslı iki direnç kullanarak 730Ω dirence en yakın %5 toleranslı direnç oluşturunuz.

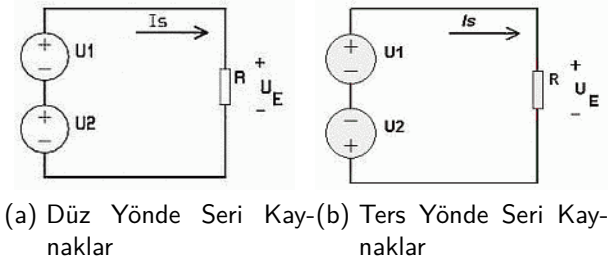
Çözüm:

%5 toleranslı dirençlerin ilk iki rengi (**10 11 12 13 15 16 18 20 22 24 27 30 33 36 39 43 47 51 56 62 68 75 82**) olabilir. 730Ω 'dan küçük en yakın değer 680Ω 'dur. 730Ω 'a tamamlamak için 680Ω 'a seri olarak 51Ω daha ekleriz. Oluşan direnç $680 + 51 \pm (34 + 2.6) = 731 \pm \%5$ toleranslıdır.

2.2 Seri Bağlı Gerilim Kaynakları

Gerilim kaynakları da dirençler gibi bir akım yolu üzerinde hepsinden aynı akım geçecek şekilde seri bağlanabilir. Seri bağlı gerilim

kaynaklarının tümüyle aynı gerilim etkisi yapan *eşdeğer gerilim kaynağı* U_E kullanılan gerilim kaynaklarının seçilen bir yönde toplanmasıyla bulunur. Aynı yöndeki kaynaklar eşdeğer gerilimi arttırıcı yönde Ters gerilim kaynakları eşdeğer gerilimi düşürürken katkıda bulunur.

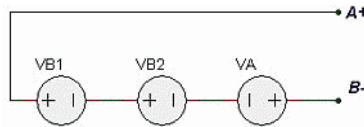


Şekil 2.2.1: Düz ve Ters Yöndeki Seri Gerilim Kaynakları

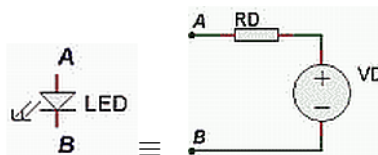
Eşdeğer gerilim U_E nin bu özelliklerinden ötürü kaynakları gerilim değerlerini yükseltmek için veya gerilim değerini düşürmek için seri bağlayabiliriz. Şekil 2.2.1'de aynı yönde seri iki kaynak kullanılmıştır. Bu iki gerilimin eşdeğeri $U_E = U_1 + U_2$ olurken ters yönde seri kaynakların eşdeğeri ise $U_E = U_1 - U_2$ olacaktır.

Örnek 2.3. Elimizdeki $V_A = 9V$ ve $V_B = 5V$ kaynaklardan en az sayıda kullanarak 1V kaynak tasarlayalım.

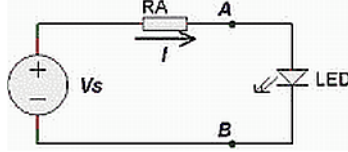
Çözüm: $1V = 5V + 5V - 9V \rightarrow U_E = V_{B1} + V_{B2} - V_A$. Devreyi çizersek



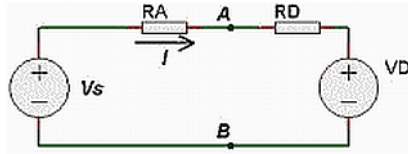
Örnek 2.4. Bir LED, üzerinden doğru yönde 5 mA geçtiğinde parlak ışık çıkaran iki uçlu bir devre elemanıdır.



Elimizdeki LEDin doğru yönde geçen akım için eşdeğer devresi $V_D = 1.1V$ gerilim kaynağına seri bağlı $R_D = 50 \Omega$ dur. LEDi şekildeki gibi $V_s = 5V$ kaynakla kullanabilmek için R_A direnci ne olmalıdır?



Çözüm: LEDin eşdeğer devresini kullandığımızda LEDi kullanan devre



şeklini alır. Devredeki eşdeğer direnç $R_E = R_A + 50$, eşdeğer gerilim ise $V_E = V_S - V_D = 5V - 1.1V = 3.9V$ olarak bulunur. Ohm kanunu uygulayarak $I = V_E / R_E = 5mA$ için R_A değerini çözelim.

$$5mA = 0.005A = 3.9V / (50\Omega + R_A),$$

$$R_A = (3.9V / 0.005A) - 50\Omega = 730\Omega$$

Standart %5 toleranslı dirençler arasında en yakın değer 750Ω 'dır.

2.3 Kirşof Gerilim Kanunu (KVL)

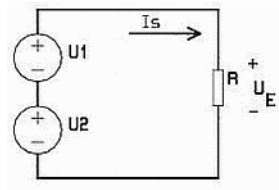
Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887): Alman fizikçisi Kirchhoff elektrik devrelerinde gerilim ve akımlara ilişkin iki önemli bağıntının yanısıra birçok fizik buluşunu gerçekleştirdi. Bulduğu gerilim ve akım bağıntıları Ohm kanunu ile birlikte doğru akım devre analizinin temel teorisini oluşturur. Doğru Prusyada Königsberg şehrinde bir avukatın oğlu olarak doğdu. 18'inde okumaya başladığı Königsberg Üniversitesinde daha sonra öğretim üyesi olarak çalıştı. Sezyum ve Rubidyum birlikte çalıştığı Robert Bunsen tarafından bulundu. Ayrıca radyasyon kanununun geliştirilmesinde de büyük katkıları oldu.

Kirşof gerilim kanununa (KVL) göre kapalı bir elektrik devresinde seçilen bir yöndeki gerilimlerin toplamı sıfıra eşittir.

Kirşof akım kanununa (KCL) göre ise devre elemanlarının bağlandığı her iletken düğüme giren toplam net yük düğümden çıkan net yüke eşittir.

Eğer giren yükler artı, çıkanlar eksi işaretli alırsak düğüme giren akımların ya da çıkan akımların toplamı sıfırdır.

Örnek 2.5. Aşağıdaki devreye Kirşof Gerilim kanunu uygulayalım

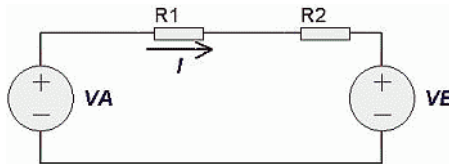


Çözüm: I_s yönünde uygularsak

$$\text{KVL: } U_2 + U_1 - U_E = 0$$

yazarız.

Örnek 2.6. Alttaki devrede $R_1 = 5\Omega$, $R_2 = 10\Omega$, $V_A = 10V$, ve $I = 3A$ verilmişse Ohm kanunu ile Kirchhof gerilim kanunu kullanarak V_B gerilimini bulunuz?



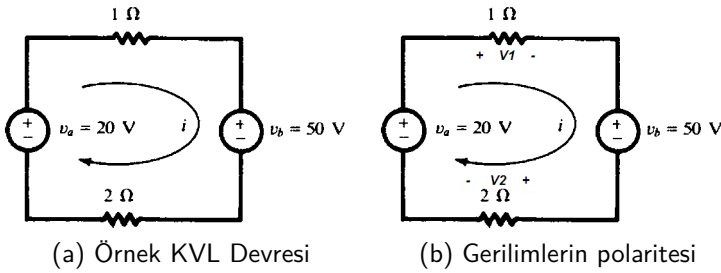
Çözüm: I yönünde KVL: $V_A - V_{R1} - V_{R2} - V_B = 0$

Ohm L: $V_{R1} = I R_1 = 15V$, ve $V_{R2} = I R_2 = 30V$

Böylece $V_B = V_A - V_{R1} - V_{R2} = 10 - 15 - 30 = -35 V$.

Gerilimin negatif çıkması V_B nin kutuplarının ters işaretlendiğini gösteriyor.

Örnek 2.7. Şekil deki devrede KVL ve Ohm kanunu ile i akımını ve kaynakların güçlerini bulalım:



Şekil 2.3.1: Örnek KVL Devresi ve gerilimlerin polaritesi.

Çözüm: v_a nin polaritesi akım okuna düz yönde olduğundan 20, v_b nin polaritesi akım okuna ters yönde olduğundan -50 olarak alınız. Şekil deki gibi 1Ω direncin üzerindeki gerilime V_1 , 2Ω direncin gerilimine V_2 dersek

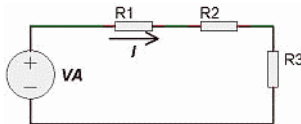
KVL: $v_a - V_1 - v_b - V_2 = 0$; Ohm K: $V_1 = i R_1$, $V_2 = i R_2$.

$$i = \frac{20 - 50}{1 + 2} = -10A \text{ (akım okun tersinedir)}$$

$$P_a = i v_a = -10 \times 20 = -200W \text{ (güç kullanıyor)}$$

$$P_b = i v_b = -10 \times -50 = 500W \text{ (güç veriyor)}$$

Örnek 2.8. Şekildeki devrede $V_A=80V$, $R_1=20\Omega$, $R_2=10\Omega$ verilmiş ve R_1 üzerindeki gerilim $V_{R1}=40V$ olarak bilinmektedir. R_3 değerini bulunuz.



Çözüm: I yönünde KVL: $V_A - V_{R1} - V_{R2} - V_{R3} = 0$.

Ohm kanunu gereği: $V_{R1} = R_1 I = 40V$, $I = 40V / 20\Omega = 2A$.

Ohm kanunu gereği: $V_{R2} = R_2 I = 2A \cdot 10\Omega = 20V$.

Böylece $V_{R3} = 80V - 40V - 20V = 20V$ bulunur.

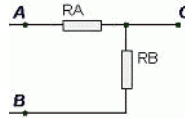
$I = 2A$ olduğundan Ohm kanunu gereği

$R_3 = V_{R3} / I = 20V / 2A = 10\Omega$ bulunur.

2.4 Gerilim Bölücüler

Aynı akım kolu üzerindeki dirençler akım koluna uygulanan gerilimi direnç değerleri oranında böler.

Örneğin aşağıdaki devredeki aynı kol üzerindeki R_A ve R_B değerli iki seri direnç bu kola uygulanan V_{AB} gerilimini toplamı V_{AB} olan V_{AC} ve V_{CB} gerilimlerine bölmektedir.



Kirchhoff ve Ohm kanunu gereği dirençlerin toplam değeri kullanılarak geçen akım

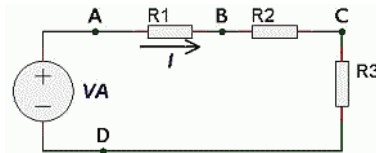
$I = \frac{V_{AB}}{R_A + R_B}$ olarak bulunur. Ohm kanunu gereği

$V_{AC} = I R_A = \frac{V_{AB}}{R_A + R_B} R_A$ ve

$V_{CB} = I R_B = \frac{V_{AB}}{R_A + R_B} R_B$

olarak elde edilir.

Örnek 2.9. Aşağıdaki ikinci örneğimizde üç direnç aynı akım kolu üzerindedir.



Devredeki dirençler $R_1=10\ \Omega$, $R_2=20\ \Omega$ ve $R_3=70\ \Omega$ ise $V_A=300\ \text{V}$ gerilim uygulandığında R_3 üzerine oluşan gerilimi hesaplayalım.

Çözüm: Akımı dirençlerin toplamından bulabiliriz

$$I = \frac{V_A}{R_1 + R_2 + R_3} \text{ çıkar. } R_3 \text{ üzerindeki gerilim}$$

$$V_{CD} = R_3 \frac{V_A}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{70 \times 300}{10 + 20 + 70} = 210\ \text{V} \text{ olarak bulunur.}$$

Örnek 2.10. Yukarıdaki devrede $R_1=10\ \Omega$, $R_2=20\ \Omega$ ve $R_3=70\ \Omega$ verilmiştir. R_1 üzerindeki V_{AB} gerilimi $5\ \text{V}$ ölçüldüğünde R_3 üzerindeki V_{CD} gerilimi kaç volt olacaktır.

$$\begin{aligned} \text{Çözüm: } V_{CD} &= I R_3 = V_{AB}/R_1 \times R_3 \\ &= 5/10 \times 70 = 35\ \text{V}. \end{aligned}$$

2.5 Seri devrelerde güç ve enerji aktarımı

En basit seri devre bir R direncine bağlanan U gerilim kaynağıyla elde edilir. R direncine devrenin yükü de denir. R - U devresinde gerilim kaynağından devreye verilen $P = U \times I$ değerindeki güç R direnci üzerinde U gerilimine karşı geçen I akımı nedeniyle ortaya çıkar ve direncin ısınmasına neden olur. Yük olarak motor ya da akümülatör gibi güç dönüştürücü elemanlar kullanılırsa gücün bir bölümü mekanik ya da kimyasal güçlere dönüşebilir.

Örnek 2.11. 240 Volt gerilim kaynağına yük olarak bağlanan bir bilgisayar 2 Amper akım çekiyor. Bilgisayarın gücünü (kW cinsinden) ve bir günde harcayacağı toplam enerjiyi (kW-saat cinsinden) bulun.

$$\text{Çözüm } P = 240 \times 2 = 480\text{W} = 0.48\ \text{kW}.$$

$$E = 0.48 \times 24 = 11.52\ \text{kW-saat}.$$

Birden çok seri dirence bağlı U gerilim kaynağından I akımı çıkıyorsa kaynaktan dirençlere iletilen toplam güç $P = U \times I$ kadardır. Bu toplam güç bütün dirençlerde harcanan toplam güce eşittir.

Örnek 2.12. Gerilim kaynağı olarak kullanılan $U = 12V$ luk bir batarya toplam direnci 0.2Ω olan bir ara kablosu üzerinden direnci 0.4Ω olan bir marş motoruna bağlanmıştır. Devreden geçen akımı, bataryadan çıkan gücü ve marş motoruna iletilen gücü hesaplayınız.

Çözüm $R_{esdeğer} = R_{kablo} + R_{motor} = 0.2 + 0.4 = 0.6\Omega$.

$$I = U/R_{esdeğer} = 12/0.6 = 20 \text{ A}$$

Gerilim bölünmesi sonucu

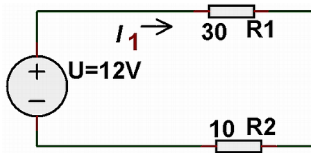
$$U_{motor} = 12 \times 0.4/(0.2 + 0.4) = 8 \text{ V}.$$

$$\text{Motora aktarılan güç } P_{motor} = 8 \times 20 = 160 \text{ W}.$$

$$\text{Bataryadan çıkan güç } P_{bat} = 12 \times 20 = 240 \text{ W}$$

2.6 Problemler

Problem 2.1. Devrede I_1 akımını ve R_2 nin harcadığı gücü bulunuz .



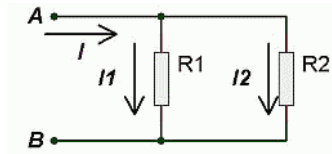
Bölüm 3

Paralel Direnç devreleri ve Kirşof Akım Kanunu

İki devre elemanı her iki ucundan birbirine bağlıysa uçlarındaki gerilim birbirine eşitlenir ve bu paralel bağlantı bağlantıya **paralel bağlantı** denir.

3.1 Dirençlerin Paralel Bağlanması

Birden fazla direnç iki ucu aynı gerilim görecek şekilde ortak iki bağlantı noktasına bağlandığında paralel bağlı dirençler oluşur. Paralel bağlanan dirençlerin her birinin üzerinde aynı gerilim oluşur ve her birinden farklı farklı akım geçer. Paralel bağlantı; dirençlerin birer uçlarının birbirleri ile birleştirilmesi ile elde edilir.



Şekil 3.1.1: Paralel bağlı iki direnç.

Paralel bağlantı sonucu devrede akım kolu dallanır ve bir akım kolundan birden fazla kola bölünür. Akımın dallandığı bu çeşit bağlantı noktaları **düğüm** olarak adlandırılır. Paralel bağlı dirençlerin bir ucunun bağlandığı düğüme A, öbür uçlarının bağlandığı düğüme ise B dersek bütün dirençlerin üzerindeki gerilim V_{AB} olacaktır.

3.2 Paralel dirençlerin eşdeğer direnci

Diyelim ki $R_1, R_2, \dots, R_N$ dirençleri A ve B düğümleri arasına paralel bağlanmış olsun. Bütün dirençlerin üzerinde V_{AB} gerilimi olacağından herbirinin üzerinden geçen akım

$$I_1 = \frac{V_{AB}}{R_1}, I_2 = \frac{V_{AB}}{R_2}, \dots, I_N = \frac{V_{AB}}{R_N}, \quad (3.2.1)$$

olacaktır. Eşdeğer devreye giren I akımı dirençlere dağılan akımların toplamına eşit olacağından

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_N = V_{AB} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} \right), \quad (3.2.2)$$

bütün paralel dirençlerin eşdeğeri olan R direnci $I = V_{AB}/R$ Ohm kanunu eşitliğini sağlamalıdır. Böylece eşdeğer direnç

$$\begin{aligned} I &= \frac{V_{AB}}{R} = V_{AB} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} \right), \quad (3.2.3) \\ \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} \end{aligned}$$

Burada resistansı R olan bir direncin iletkenliği $G = 1/R$ olarak tanımlandığını hatırlarsak yukarıdaki eşdeğer direnç denkliği iletkenlik cinsinden

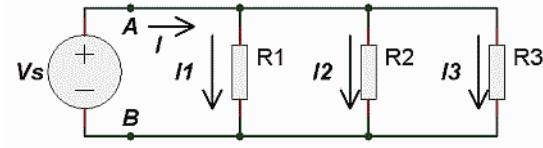
$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_N \quad (3.2.4)$$

olarak ifade edebiliriz.

3.3 Kirşof Akım Kanunu ve Paralel Dirençli Devrelerin Çözümlemesi

Paralel bağlı dirençlere bağlanacak bir gerilim kaynağı ile aşağıdaki gibi bir devre elde edilir.

Kirşof Akım Kanunu (KCL) devrede dallanan bir düğüm noktasında dallardaki akımlara ilişkindir. KCL gereği bir devrenin her



Şekil 3.3.1: Üç dirençli paralel devre

düğümünde düğüme giren akımların toplamı çıkan akımların toplamına eşittir. Diğer bir deyişle bir düğüme giren akımları artı, çıkanları eksi aldığımızda düğüme girenlerin cebirsel toplamı sıfırdır.

Seri direnç devrelerindeki direnç gerilimlerini KVL ile belirliyorduk. Paralel bağlı direnç devrelerinin çözülmesinde ise toplam akım KCL ile belirlenir.

Örnek 3.1. Şekil 3.3.1'deki devrede $R_1 = 10 \Omega$ Ohm, $R_2 = 20 \Omega$, $R_3 = 4 \Omega$ verilmiştir. Paralel dirençlerin eşdeğer direncini bulun.

Çözüm $\frac{1}{R_1} = 0.1$; $\frac{1}{R_2} = 0.05$; $\frac{1}{R_3} = 0.25$;
 $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = 0.4$; $R = \frac{1}{0.4} = 2.5 \Omega$.

Örnek 3.2. Aynı devrede $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$, $R_3 = 4 \Omega$ iken R_3 'ten geçen akım 2 amperdir. Gerilim kaynağından geçen akım ne kadardır.

Çözüm $V_s = V_{AB} = I_3 R_3 = 2 \text{ A} \times 4 \Omega = 8 \text{ V}$.
 $I_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} = 8/10 \text{ A} = 0.8 \text{ A}$; $I_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} = 8/20 \text{ A} = 0.4 \text{ A}$;
 (KCL): $I = I_1 + I_2 + I_3 = 0.8 + 0.4 + 2 = 3.2 \text{ A}$

3.4 Paralel Dirençlerde Akım Bölünmesi

Seri bağlı dirençlerde dirençlerin toplam geriliminin her direnç üzerine direnç değeriyle orantılı bölünmesine benzer biçimde paralel bağlı dirençler de ana akım dalındaki akımın direnç dallarına bölünmesine neden olur. Akım bölünmesi her akım dalının iletkenliğiyle orantılıdır. Ohm kanunu $V = I \times R$ iletkenlik kullanılırsa

$I = V \times G$ olarak yazılır. Böylece paralel direnç dallarındaki akımların toplamı

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_N = V G_1 + V G_2 + \dots + V G_N = V \times (G_1 + G_2 + \dots + G_N)$$

dir. Dirençlerin K .ncısının akımı

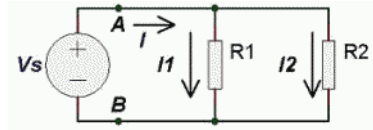
$$I_K = V G_K = I \times G_K / (G_1 + G_2 + \dots + G_N)$$

olur. Örneğin sadece iki direnç paralel ise

$$I_1 = I \times G_1 / (G_1 + G_2) \text{ ve } I_2 = I \times G_2 / (G_1 + G_2)$$

olarak bulunur.

Örnek 3.3. Şekil 3.4.1'deki devrede $I = 30$ A, $R_1 = 25\Omega$ ve $R_2 = 100\Omega$ olduğuna göre I_1 ve I_2 akımları ne kadardır.

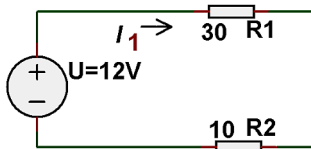


Şekil 3.4.1: İki paralel dirençli devre

Çözüm Akım direnç dallarına dirençlerin iletkenlikleriyle orantılı dağılır. $G_1 = 1/25 = 0.04\text{Ü}$, $G_2 = 1/100 = 0.01\text{Ü}$. Toplam iletkenlik $G = 0.05\text{Ü}$ olduğuna göre $I_1 = I \times G_1/G = 30 \times 0.04/0.05 = 24$ A, ve $I_2 = I \times G_2/G = 30 \times 0.01/0.05 = 6$ A. İki akımın toplamı $24 + 6 = 30$ A çıkmalıdır.

3.5 Problemler

Problem 3.1. Devrede



- R_1 ve R_2 'nin eşdeğer direnci R_{12} yi bulun
- devrenin KVL denklemini yazın
- I_3 akımını bulun.

- d) U_A kaynağının gücünü bulun.
- e) U_A güç üretiyor mu harcıyor mu?

Bölüm 4

Paralel ve Seri Direnç Devrelerinin Çözümlemesi

Bir devrede paralel ve seri bağlı dirençler birarada kullanılabilir. Bu durumda devre çözümlemek için iki yol vardır.

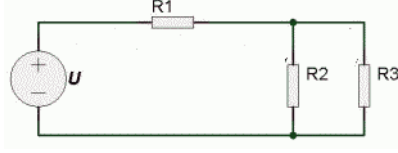
- ▷ **Eşdeğer direnç yöntemi** paralel ve seri dirençleri eşdeğer dirençlerle değiştirerek devreyi basitleştirip çözümleme yöntemidir.
- ▷ **KVL KCL ve Ohm bağıntılarından elde edilen denklemleri** birarada çözerek devre çözümleme devrenin birçok değişkenini aynı denklem setinden çözebilmeyi sağlar. Ancak çıkan denklemleri çözmek için genellikle bilgisayar desteği gerekir.

KCL KVL ve Ohm bağıntılarını yazabilmek için yaygın kullanılan iki sistematik yöntem vardır. **Çevrim gerilim** yöntemi ile **Düğüm akımları** yöntemi adı verilen bu iki yöntem çok karmaşık devrelerde bile başarıyla uygulanabilir.

4.1 Eşdeğer Yöntemiyle Seri Paralel Devre Çözümleme

Hem seri hem de paralel direnç gruplarının eşdeğerini bulmayı ayrı ayrı biliyoruz. Eşdeğer yöntemiyle çözümlemelerde paralel ve seri grupların eşdeğerlerini kullanarak sonunda devreyi ya paralel ya da seri devreye dönüştürürüz. Böylece kaynaktan çıkan akımın değerini elde ederiz. KVL ya da KCL kullanarak sırasıyla bütün grupların gerilim ve akım değerlerini elde ederiz.

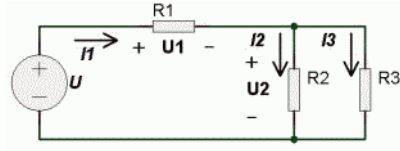
Örnek 4.1. Aşağıdaki devrede $R_2 = 100\Omega$ ile $R_3 = 25\Omega$ paralel bağlı, $R_1 = 30\Omega$ ile $(R_2 // R_3)$ ise seri bağlı, $U = 150V$ gerilimi de bu seri devreyi beslemektedir.



Şekil 4.1.1: Seri-paralel devre örneği

Devreyi eşdeğer yöntemiyle çözümleyelim.

Çözüm: Devreyi eşdeğerler yöntemiyle çözmek için birinci aşamada devredeki bütün akım kollarına ve elemanların üzerindeki gerilimlere isim veririz. Böylece gereken yerlerde KCL ve KVL denklemleri yazmak kolaylaşacaktır. Verdiğimiz isimler devre şematığı üzerinde görülmektedir.



İkinci aşama paralel devre gruplarının eşdeğerlerini kullanarak devreyi basitleştiririz.

Devredeki $R_2 = 25\Omega$ ile $R_3 = 100\Omega$ dirençler paraleldir ve eşdeğeri

$$R_2 // R_3 = 1/(1/25 + 1/100) = 1/(0.04 + 0.01) = 20\Omega \text{ bulunur.}$$

Seri dirençlerin eşdeğeri ise

$$R_1 + (R_2 // R_3) = 30 + 20 = 50 \Omega \text{ eder.}$$

Artık Ohm kanunundan I_1 akımını bulabiliriz.

$$I_1 = U/(R_1 + (R_2 // R_3)) = 150/50 = 3A \text{ bulunur.}$$

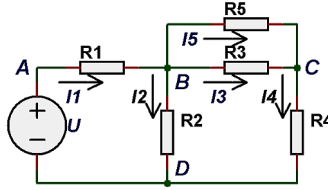
R_1 üzerindeki U_1 gerilimi Ohm kanunundan

$$U_1 = R_1 \times I_1 = 30 \times 3 = 90V \text{ çıkar.}$$

$$U_2 = (R_2 // R_3) \times I_1 = 20 \times 3 = 60V \text{ eder.}$$

$U = U_1 + U_2$ KVL denklemi de $150 V = 90 V + 60V$ biçiminde sağlanır.

Örnek 4.2. Şekil 4.1.2'deki İkinci devremizde $U = 12V$, $R_1 = 15\Omega$, $R_2 = 90\Omega$, $R_3 = 6\Omega$, $R_4 = 5\Omega$, $R_5 = 30\Omega$ olarak veriliyor.



Şekil 4.1.2: İkinci seri-paralel devre örneği

I_1 , I_2 , I_4 akımları ile V_{BD} ve V_{CD} gerilimlerini eşdeğer devre yöntemiyle bulunuz.

Çözüm $I_1 = U / (R_1 + (R_2 // ((R_3 // R_5) + R_4)))$ olarak yazabiliriz. Önce en içteki parantezden başlayarak çözersek

$$R_3 // R_5 = 6 // 30 = 6 \times 30 / (6 + 30) = 5\Omega;$$

$$(R_3 // R_5) + R_4 = 5 + 5 = 10\Omega;$$

$$R_2 // ((R_3 // R_5) + R_4) = 90 // 10 = 90 \times 10 / (90 + 10) = 9\Omega;$$

$$R_1 + (R_2 // ((R_3 // R_5) + R_4)) = 15 + 9 = 24\Omega \text{ bulunur.}$$

Böylece $I_1 = 12/24 = 0.5 \text{ A}$ çıkar. Bu akım $R_2 = 90\Omega$ ve $(R_3 // R_5) + R_4 = 10\Omega$ üzerinde bölünerek

$$I_2 = I_1 \times 9/90 = 0.05 \text{ A ve}$$

$$I_4 = I_1 \times 9/10 = 0.45 \text{ A akımlarını oluşturur.}$$

Ohm kanunu uygulanarak

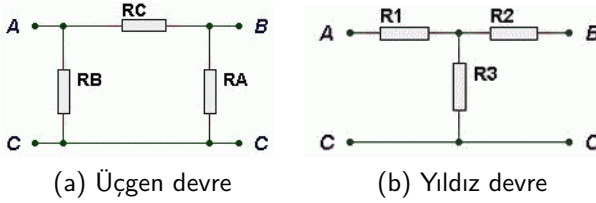
$$V_{BD} = I_2 \times R_2 = 0.05 \times 90 = 4.5 \text{ V, ve}$$

$$V_{CD} = I_4 \times R_4 = 0.45 \times 5 = 2.25 \text{ V elde edilir.}$$

4.2 Yıldız-Üçgen Eşdeğeri

İçinde “yıldız” ya da “üçgen” bağlantı bulunan devreler yıldız-üçgen eşdeğeri ya da gerilim-akım kaynağı eşdeğeri kullanılmadan eşdeğer yöntemiyle çözülemezler. Üçgen-Yıldız eşdeğer devreleri Şekil 4.2.1’de görülmüyor.

Üçgen devrede her uca bağlı iki direncin çarpımları toplam dirence bölünürse aynı uca bağlı yıldız devre direncini verir. Yıldız



Şekil 4.2.1: Üçgen-Yıldız eşdeğer devreleri

devre dirençlerinin ikili çarpımlarının toplamını herhangi bir uca bağlı yıldız direncine bölersek üçgen devrede o uca bağlanmayan direnç elde edilir. Buna göre devrelerin eşdeğer olma koşulu

$$R_T = R_A + R_B + R_C; \quad R R_T = R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3.$$

$$R_1 = R_B R_C / R_T; \quad R_2 = R_A R_C / R_T; \quad R_3 = R_A R_B / R_T.$$

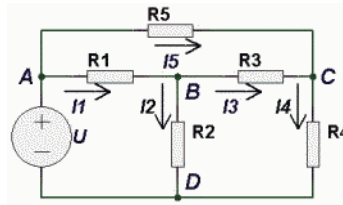
$$R_A = R R_T / R_1; \quad R_B = R R_T / R_2; \quad R_C = R R_T / R_3 \text{ olur.}$$

Yıldız ve üçgen devrelerin dönüşümü uçtaki-direnç, karşı-direnç, komşu-dirençler cinsinden kolayca hatırlanabilir.

$$R_1 = R_B R_C / (R_A + R_B + R_C) \text{ (komşular bölü toplam)}$$

$$R_A = (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3) / R_1 = R_2 + R_3 + R_2 R_3 / R_1; \text{ (komşu-lar çarpımı bölü uçtaki direnç artı komşular toplamı).}$$

Örnek 4.3. Şekil 4.2.2'deki devrede $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 6\Omega$, $R_3 = 15\Omega$, $R_4 = 60\Omega$, $R_5 = 200\Omega$ ve $U = 30V$ verildiğine göre V_{BD} ve V_{CD} gerilimlerini bulunuz.

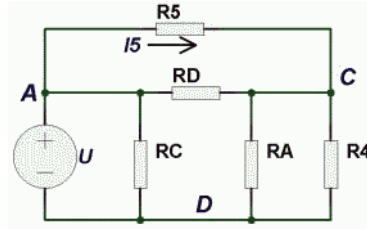


Şekil 4.2.2: Yıldızlı Devre

Çözüm: İçinde yıldız bulunduğundan seri-paralel eşdeğerlerle çözülemez. A-C-D düğümleri arasındaki R_1 , R_3 , R_2 dirençleri için Yıldız-Üçgen eşdeğerini kullanarak devreyi çözümlayelim.

$$R_1 R_3 + R_3 R_2 + R_1 R_2 = 10 \times 15 + 15 \times 6 + 10 \times 6 = 300;$$

$R_A = 300/10 = 30\Omega$; $R_C = 300/15 = 20\Omega$; $R_D = 300/6 = 50\Omega$.



Elde edilen devrede

$$R_D // R_5 = 50 // 200 = 40\Omega \text{ ve}$$

$R_A // R_4 = 30 // 60 = 20\Omega$, böylece A-C-D hattındaki toplam direnç

$(R_D // R_5) + (R_A // R_4) = 20 + 40 = 60\Omega$ bulunur. Gerilim bölünmesi sonucu

$$V_{CD} = U \times (R_A // R_4) / ((R_D // R_5) + (R_A // R_4)) = 30 \times 20 / 60 = 10V \text{ ve}$$

$$V_{AC} = U \times (R_D // R_5) / ((R_D // R_5) + (R_A // R_4)) = 30 \times 40 / 60 = 20V \text{ çıkar.}$$

Eşdeğer devreden çıkan I_2 akımı R_A ve R_C eşdeğer dirençlerinden çıkar.

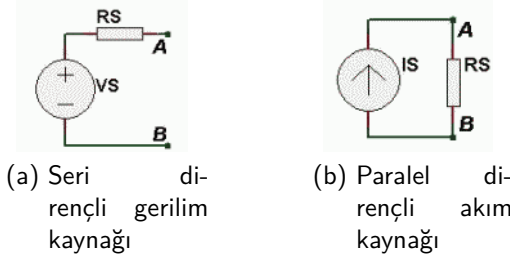
$$I_2 = V_{AD} / R_C + V_{CD} / R_A = 30 / 20 + 10 / 30 = 11/6 = 1.833A \text{ bulunur. Böylece}$$

$$V_{BD} = R_2 \times I_2 = 6 \times 11/6 = 11V \text{ çıkar.}$$

4.3 Gerilim-Akım Kaynağı Eşdeğeri

Devre eşdeğeri devrelerin analizinde önem taşır. Uçları arasına aynı voltaj uygulandığında terminal akımları aynı olan devrelere uç eşdeğeri diyoruz. Direnç devreleri doğrusal denklemlerle açıklanabildiğinden iki çalışma noktasında gerilim ve akımları aynı olan direnç devreleri de uç eşdeğeridir. Hesap kolaylığı açısından bu iki noktayı açık uç ve kısa devre olarak seçebiliriz. Böylece açık

uç gerilimleri (uç akımı sıfır) ve kısa devre akımları (uç gerilimleri sıfır) birbirine eşit olan gerilim kaynağı ve seri direnç devresi ile akım kaynağı ve paralel direnç devresi birbirine eşdeğer olarak tanımlanır.



Şekil 4.3.1: Eşdeğer güç kaynakları

Örneğin 10V gerilim kaynağına bağlı 2Ω seri direnç devresinin iki ucu açık devre iken direnç üzerindeki akım sıfır olacağından açık uç gerilimi $U_{açık}=10\text{ V}$ olarak görünür. İki uç kısa devre edildiğinde ise gerilimin tümü direnç üzerinde düşeceğinden kısa devre akımı $I_{kısa}=10/2=5\text{A}$ dir. Eşdeğer devredeki $I=5\text{A}$ akım kaynağına paralel bağlı 2Ω direnç üzerinden akım kaynağının bütün akımı geçtiğinde $U_{açık} = 2 \times 5 = 10\text{V}$ olur. Kısa devre yapıldığında ise direnç üzerinde 0V olduğundan akım kaynağının tüm akımı kısa devre akımı olarak $I_{kısa} = 5\text{A}$ akımını sağlar.

Gerilim-Akım kaynağı eşdeğeri özellikle çözümlenen devrede hem akım hem de gerilim kaynakları bulunmaktaysa bütün kaynakları aynı çeşite dönüştürmek amacıyla kullanılır. Gerilim-Akım kaynağı eşdeğeri, özellikle çözümlenen devrede hem akım hem de gerilim kaynakları varsa, bütün kaynakları aynı çeşite dönüştürmek amacıyla kullanılır. Böylece bütün kaynaklar gerilim kaynağı yapılarak devre çevrim gerilimleri yöntemiyle analiz edilebilir.

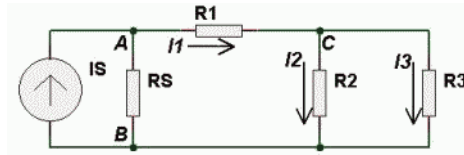
4.4 Akım Kaynaklı Direnç Devreleri

Devredeki bir akım kaynağı I_S , ve paralelindeki direnç R_S , eşdeğer devresi olan gerilim kaynağı $U_S = R_S I_S$ ve seri direnç R_S ile

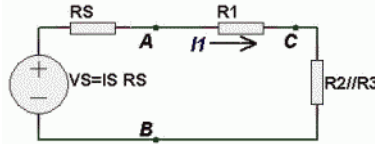
değiştirilerek elde edilen devre KVL yada çevrim gerilimleri yöntemiyle çözümlenebilir. Ancak güç kaynakları yalnızca akım kaynağı olan devreleri Kirşof akım denklemleri (KCL) kullanarak çözümlemek te mümkündür.

Örnek 4.4. Devrede $R_S=4\Omega$, $I_S=20A$, ve R_1 , R_2 , R_3 dirençleri sırasıyla 30Ω , 20Ω ve 80Ω verilmiştir. (a) Devreyi eşdeğer direnç ve kaynaklar kullanarak çözümleyip U_{AB} ve U_{CB} gerilimlerini bulalım.

Çözüm: $R_2 // R_3 = \frac{20 \times 80}{100} = 16\Omega$, $R_S + R_1 + R_2 // R_3 = 50\Omega$,



$$U_S = I_S R_S = 80V.$$

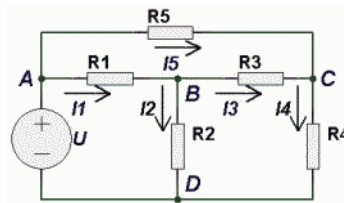


$$I_1 = \frac{U_S}{R_S + R_1 + R_2 // R_3} = 80/50 = 1.6 \text{ A.}$$

$$U_{AB} = I_1 (R_1 + R_2 // R_3) = 1.6 \times 46 = 73.6V, \quad U_{CB} = I_1 R_2 // R_3 = 25.6V.$$

4.5 KVL ve KCL kullanarak çözümleme

Şekil 4.2.2'deki yıldız içeren devrenin KVL ve KCL denklemleri bilgisayar ortamında kolayca çözülebilen bir doğrusal matrix denklemine dönüştürülebilir.



KCL denklemlerini kurabilmek için bütün akım kollarına uygun isimler vermeliyiz. Devrede U gerilim kaynağının akımı isimlendirilmemiş. Kaynak akımına I diyelim. A,B,C,D düğümlerinde KCL kuracağız.

KCL(A): $I = I_1 + I_5$; KCL(B): $I_1 = I_2 + I_3$; KCL(C): $I_3 + I_5 = I_4$; ve KCL(D): $I_2 + I_4 = I$. Ancak bu dört denklemin sonuncusu bağımlı olduğundan KCL(D) denklemini kullanmayacağız.

A-B-C-A, A-B-D-A, ve B-C-D-B olmak üzere birbirinden bağımsız üç KVL denklemini yazabiliriz.

KVL(A-B-C-A): $V_{AB} + V_{BC} - V_{CA} = 0$; $I_1 R_1 + I_3 R_3 - I_5 R_5 = 0$;

KVL(A-B-D-A): $V_{AB} + V_{BD} - U = 0$; $I_1 R_1 + I_2 R_2 - U = 0$;

KVL(B-C-D-B): $V_{BC} + V_{CD} - V_{BD} = 0$; $I_3 R_3 + I_4 R_4 - I_2 R_2 = 0$;

Matrix denklem

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & R_1 & 0 & R_3 & 0 & -R_5 \\ 0 & R_1 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_2 & R_3 & R_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ U \\ 0 \end{bmatrix}$$

Matlab veya benzeri araçlarla kolayca çözülebilir.

4.6 Çevrim Gerilimleri Yöntemi

Çevrim-gerilim yöntemi sistematik biçimde doğrusal matris denklemleri bulan iki yöntemden biridir. Bu yöntemde

$$\mathbf{R} \mathbf{I} = \mathbf{U}$$

matris denklemini için

a) Devredeki bütün bağımsız çevrimleri belirleyip numaralayıp çevrim akımları belirlenir. Bağımsız her yeni çevrimde daha önceki çevrimlerin içermediği en az bir eleman bulunmalıdır. Çevrim akımlarının vektörü

$$\mathbf{I} = (I_1 \dots I_n)^T$$

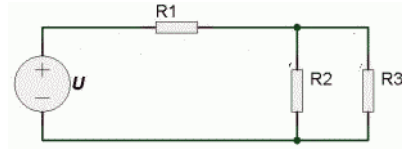
olarak yazılır.

b) Direnç matrisi $\mathbf{R} = [r_{ij}]_{n \times n}$ daki r_{ij} değeri hem I_i çevrimi hem de I_j çevriminde bulunan dirençlerin toplamıdır. Ancak I_i ile I_j nin ters aktığı dirençler eksi işaretli toplanır. Bu tanıma göre

r_{ii} değeri I_i çevrimindeki toplam dirençtir. r_{ij} , $i \neq j$ değeri I_i ile I_j çevrimleri arasındaki dirençtir, ve akımlar ters yöneyse eksi işaretlidir.

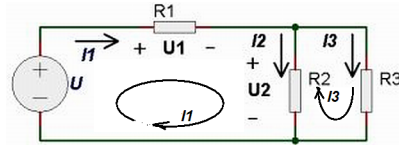
c) $\mathbf{U}$ vektöründeki u_i değerleri I_i çevrimindeki gerilim kaynaklarının toplamıdır. $\mathbf{U}$ vektörü eşitliğin karşısında olduğundan akım kaynağın eksi ucuna girerse kaynağın voltajı artı işaretli yazılır.

Örnek 4.5. Aşağıdaki devrede U ya bağlı olarak I_1 ve I_3 akımlarını bulalım.



Çözüm: Çevrim akımlarını farklı biçimlerde seçebiliriz.

Birinci Çözüm:



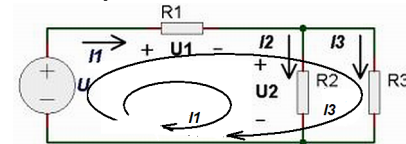
Üzerinden hem I_1 hem I_2 geçen tek direnç R_2 dir. Akımlar ters yönde olduğundan $r_{12} = r_{21} = -R_2$ buluruz.

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_2 & -R_2 \\ -R_2 & R_2 + R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$I_1 = \frac{U(R_2 + R_3)}{(R_1 + R_2)(R_2 + R_3) - R_2^2} = \frac{U(R_2 + R_3)}{R_2 R_1 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$$

$$I_3 = \frac{U R_2}{(R_1 + R_2)(R_2 + R_3) - R_2^2} = \frac{U R_2}{R_2 R_1 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$$

İkinci Çözüm:



Üzerinden hem I_2 hem I_3 geçen tek direnç R_1 dir. Akımlar aynı yönde olduğundan $r_{12} = r_{21} = R_1$ buluruz.

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_2 & R_1 \\ R_1 & R_1 + R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ U \end{bmatrix}; I_1 = I_2 + I_3;$$

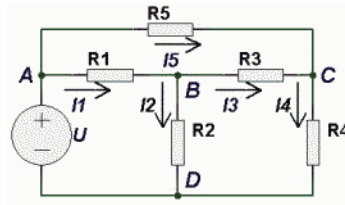
$$I_2 = \frac{U(R_1 + R_3 - R_1)}{(R_1 + R_2)(R_1 + R_3) - R_1^2} = \frac{U R_3}{R_2 R_1 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$$

$$I_3 = \frac{U(R_1 + R_2) - U R_1}{(R_1 + R_2)(R_1 + R_3) - R_1^2} = \frac{U R_2}{R_2 R_1 + R_2 R_3 + R_1 R_3};$$

$$I_1 = \frac{U(R_2 + R_3)}{R_2 R_1 + R_2 R_3 + R_1 R_3};$$

Her iki çözüm aynı sonucu verir.

Örnek 4.6. Aşağıdaki devrede I_4 ve I_5 akımlarını verecek matris denklemini yazalım.



Çözüm: Devremizde üç bağımsız çevrim var. Çevrim akımları olarak ABDA için gerilim kaynağından geçen I akımı, ACBA için I_5 , BCDB için I_4 olarak seçilirse KCL denklemlerinden $I_1 = I - I_5$; $I_2 = I - I_4$; $I_3 = I_4 - I_5$ olarak elde edilebilir. KVL denklemleri

$$\text{KVL(ACBA): } (R_1 + R_3 + R_5)I_5 - R_1 I - R_3 I_4 = 0;$$

$$\text{KVL(ABDA): } (R_1 + R_2)I - R_1 I_5 - R_2 I_4 = U;$$

$$\text{KVL(BCDB): } (R_2 + R_3 + R_4)I_4 - R_2 I - R_3 I_5 = 0.$$

Bu üç denklem $\mathcal{RI} = \mathcal{U}$ matrix denklemi olarak

$$\begin{bmatrix} (R_1 + R_2) & -R_2 & -R_3 \\ -R_2 & (R_2 + R_3 + R_4) & -R_3 \\ -R_1 & -R_3 & (R_1 + R_3 + R_5) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ U \\ 0 \end{bmatrix}$$

yazılarak bilgisayar aracılığıyla kolayca çözülür.

$$|R| = R_2 R_1^2 + R_1 R_2 R_5 + R_3 R_1^2 + R_1 R_3 R_5 \\ + R_4 R_1^2 + R_1 R_4 R_5 + R_2 R_3 R_5 + R_2 R_4 R_1 \\ + R_2 R_4 R_3 + R_2 R_4 R_5 - R_2 R_3^2 - R_1 R_3^2.$$

$$I_4 = U \frac{R_1^2 + R_1 R_5 + R_2 R_1 + R_2 R_3 + R_2 R_5}{|R|}$$

$$I_5 = U \frac{R_3 R_1 + R_2 R_3 + R_2 R_1}{|R|}$$

4.7 Düzgüm Akımları Yöntemi

Düzgüm akımları yöntemi özellikle akım kaynaklı devrelerin sistem-
atik çözümlemesine çok uygundur. Bu yöntem sonucunda devrenin

$$\mathbf{GV} = \mathbf{I}$$

matris denklemi elde edilir ve düzgüm gerilimleri $\mathbf{V}$ çözülür.

a) Devredeki düğümler adlandırılır ve biri ortak düzgüm (referans düğüümü) seçilir. Seçilen düğümlerin ortak düğüme göre volta-
jlarıyla düzgüm gerilimleri vektörü $\mathbf{V} = [v_j]_{n \times 1}$ oluşturulur.

b) $G = [g_{ij}]_{n \times n}$ iletkenlik matrisinin elemanları olan g_{ij} değerleri i .nci düzgüm ile j .nci düzgüm arasındaki iletkenliğin eksi işaretlisidir. g_{ii} değeri i .nci düzgümle diğer bütün düğümler arasındaki iletkenliklerin toplamıdır.

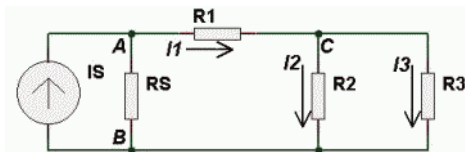
c) $\mathbf{I} = [i_j]_{n \times 1}$ vektöründeki i_j değerleri j .nci düğüme giren akım kaynaklarının toplamıdır.

Örneğin ortak düzgüm R , devredeki düğümler A, B, C ile adlandırılmış olsun. Devrede A -dan B -ye akan I_{AB} , ve R -den C -ye akan I_D akım kaynakları olsun. Elde edilen matris denklemi $\mathbf{I} = \mathbf{GU}$ biçiminde

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{AB} \\ -I_{AB} \\ I_D \end{bmatrix}; \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \sum G_A & -G_{AB} & -G_{AC} \\ -G_{AB} & \sum G_B & -G_{BC} \\ -G_{AC} & -G_{BC} & \sum G_C \end{bmatrix}; \mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} \text{ olur.}$$

burada $\sum G_A = G_{AR} + G_{AB} + G_{AC}$, kısaca, A düğüümüne bağlı bütün iletkenliklerin toplamıdır. Bu doğrusal matris denklem matris tersi yöntemiyle bilgisayarda Excel yada Matlab gibi çeşitli ortamlarda kolayca çözülebilir.

Örnek 4.7. Bir önceki örnekteki devreyi düzgüm akımı yöntemiyle çözümlayelim. Devrede gene $R_S = 4\Omega$, $I_S = 20\text{A}$, ve R_1, R_2, R_3 dirençleri sırasıyla $30\Omega, 20\Omega$ ve 80Ω olsun.



Çözüm: Öncelikle düğümleri isimlendirelim. Devreyi kontrol edince düğümlerin isimlenmiş olduğunu görüyoruz. Ardından bir düğüümü

ortak düğüm seçmeliyiz. Düğüm-B'yi referans düğüm seçtiğimizde çözümüme bize A ve C düğümlerinin B'ye göre gerilimini verecektir.

$$U = \begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{CB} \end{bmatrix}; I = \begin{bmatrix} 20 \\ 0 \end{bmatrix};$$

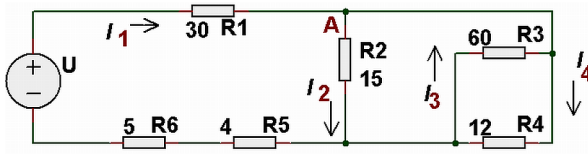
$$G = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} + \frac{1}{30} & -\frac{1}{30} \\ -\frac{1}{30} & \frac{1}{20} + \frac{1}{80} + \frac{1}{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2833 & -0.0333 \\ -0.0333 & 0.0958 \end{bmatrix}$$

$$I = GU; U = G^{-1}I; G^{-1} = \begin{bmatrix} 3.68 & 1.28 \\ 1.28 & 10.88 \end{bmatrix};$$

$$U = \begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{CB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.68 & 1.28 \\ 1.28 & 10.88 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 20 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 73.6 \\ 25.6 \end{bmatrix}.$$

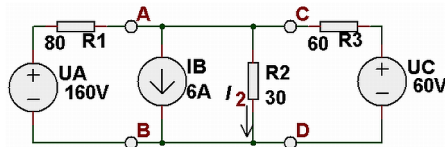
4.8 Problemler

Problem 4.1. Aşağıdaki devrede



- A düğümünde KCL denklemini yazın.
- R_3 ve R_4 dirençlerinin eşdeğeri R_{34} 'ü bulun.
- R_3 , R_4 ve R_2 nin eşdeğeri R_{234} direncini bulun.
- $I_1 = 2A$ olması için U kaç volt olmalıdır.

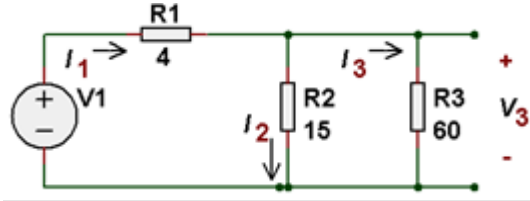
Problem 4.2. Aşağıdaki devrede



- U_A ve R_1 in A – B arasında eşdeğeri olan akım kaynağı ve direnci ($I_A - R_A$) hesaplayın.

- b) U_C ve R_3 ün $C - D$ arasında eşdeğeri olan akım kaynağı ve direnci ($I_C - R_C$) hesaplayın.
- c) Eşdeğer akım kaynaklarını kullanarak devreyi üç akım kaynaklı devreye dönüştürüp çizin
- d) Eşdeğer devreyi kullanarak devredeki $V_{AB} = V_{CD}$ gerilimini hesaplayın.
- e) Devredeki I_2 akımını bulun.

Problem 4.3. Aşağıdaki devrede $I_3 = 2A$ veriliyor.



- a) Ohm kanunundan V_3 gerilimini bulun.
- b) Ohm kanunundan I_2 akımını bulun.
- c) KCL kullanarak I_1 akımını bulun.
- d) KVL kullanarak V_1 gerilimini bulun.

Bölüm 5

Devre Teoremleri

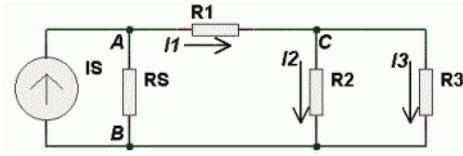
Bu bölümde devrelerin analizinde sıkça kullanılan iki önemli devre teoremini öğreneceğiz.

5.1 Tevenin ve Norton Eşdeğerleri

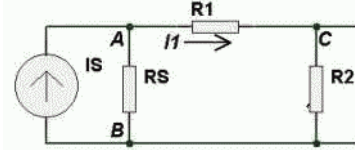
Devre eşdeğeri devrelerin basitleştirilmesi açısından önem taşır. Uçları arasına aynı voltaj uygulandığında terminal akımları aynı olan devrelere uç eşdeğeri diyoruz. Doğrusal davranan iki uçlu direnç devreleri terminal gerilimleri ve akımları iki çalışma noktasında birbirinin aynı ise bütün koşullarda da birbirinin aynıdır. Bunu daha önce güç kaynaklarının akım ve gerilim kaynağı eşdeğerlerini verirken de görmüştük.

Doğrusal davranan herhangi bir direnç devresi iki ucu arasında gördüğümüz en basit doğrusal devreler olan bir akım-kaynağı ile paralel direnç ya da bir gerilim kaynağı ile seri dirence uç eşdeğeridir. Devrelerin uç eşdeğerlerini bulmanın kolay yollarından biri eşdeğeri bulunacak uçlar arasındaki açık uç gerilimi $U_{acık}$ ile kısa devre akımı $I_{kısa}$ bulup devrenin eşdeğer direncini $R_{es} = \frac{U_{acık}}{I_{kısa}}$ ile hesaplamaktır. Bu şekilde elde edilen gerilim kaynağı ve seri dirence **Tevenin** eşdeğeri (*Thevenin equivalent*), akım kaynağı ve paralel dirence ise **Norton** eşdeğeri denir.

Örnek 5.1. Aşağıdaki devrede gene $R_S=4\Omega$, $I_S=20A$, ve R_1 , R_2 , R_3 dirençleri sırasıyla 30Ω , 20Ω ve 80Ω olsun. Devredeki R_3 çıkarılıp yerine başka direnç konacak olsun. Devrenin R_3 dışındaki bölümünün $C-B$ uçları arasındaki Tevenin ve Norton eşdeğerini bulunuz.



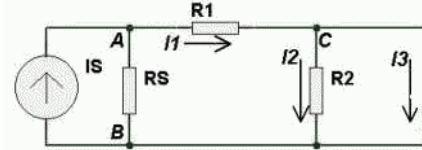
Çözüm R_3 devreden çıkınca $C-B$ uçları arasındaki açık devre gerilimini bulalım



$$I_1 = I_S R_S / (R_1 + R_2 + R_S);$$

$$U_{CB\text{a}c\text{i}k} = I_1 R_2 = I_S R_S / (R_1 + R_2 + R_S) R_2 \\ = 20 \times 4 / (30 + 20 + 4) \times 20 = 29.62\text{V};$$

Devredeki R_3 kısa devre yapıldığında I_3 akımı



$$I_{3\text{k}i\text{s}a} = I_S R_S / (R_S + R_1) = 20 \times 4 / 34 = 80 / 34 = 2.353 \text{ A}$$

$$R_T = 29.62 / 2.353 = 12.59 \Omega$$

Tevenin eşdeğeri $U_{CB\text{a}c\text{i}k}$ gerilim kaynağına seri R_T direncidir.

Norton eşdeğeri $I_{3\text{k}i\text{s}a}$ akım kaynağına paralel R_T direncidir.

5.2 Maksimum güç aktarma teoremi

Güç kaynağı ve dirençlerden oluşan devrelerin doğrusal davrandığını ve iki ucu arasındaki akım-gerilim davranışının Tevenin eşdeğeriyle tanımlanabildiğini gördük. Elektrik devrelerinin güç iletmekte kullanıldığını da biliyoruz. Güç kaynağından iletilen gücün bir kısmının Tevenin eşdeğerindeki direnç yüzünden kaybolacağı açıkça bellidir. Acaba devremiz yük olarak bağlanan bir dirence en fazla ne kadar güç aktarabilir? Ve en fazla gücün aktarılabilmesi için bağlanacak direncin değeri ne olmalıdır? İşte bu iki soruyu maksimum güç aktarma teoremi yanıtlar.

Teorem 5.1. *Tevenin eşdeğeri R_T ve U_T dan oluşan bir devreye*

yük olarak bağlanan R_L direncine en yüksek güç aktarımı $R_L = R_T$ koşulu sağlandığında gerçekleşir. Aktarılan en yüksek güç $P_L = \frac{U_T^2}{4 R_T}$ olur.

İspat: Devreden geçen akım $I_L = U_T/(R_L + R_T)$, yük üzerindeki gerilim $V_L = U_T R_L/(R_L + R_T)$ olur. Yüke geçen güç $P_L = U_T^2 R_L/(R_L + R_T)^2$ çıkar. En yüksek P_L aktarımını verecek R_L değeri için maksimum noktasında $R_L > 0$ koşuluyla $d P_L/d R_L$ sıfır olmalıdır.

$$d P_L/d R_L = \frac{U_T^2}{(R_L + R_T)^2} - \frac{2U_T^2 R_L}{(R_L + R_T)^3} = 0.$$

$\frac{U_T^2}{(R_L + R_T)^2} = \frac{2U_T^2 R_L}{(R_L + R_T)^3}$, ve sonucunda $R_L = R_T$ elde edilir.

İkinci bölüm için $P_L = U_T^2 R_T/(2R_T)^2 = \frac{U_T^2}{4R_T}$ elde edilir.

Maksimum güç aktarımı teoremi daha genel adıyla empedans denkleştirme olarak da anılır. Elektrik sistemlerinin dışındaki enerji sistemlerinde de dengi teoremler olduğundan evrenselliği açısından da ayrı öneme sahiptir.

Bir kaynaktan güç aktarılırken devre maksimum güç aktarımı koşullarında çalıştırılırsa kaynaktan çıkan gücün ancak yarısı yüke geçer. Oysa yük direncini örneğin $k R_T$ seçsek kaynaktan çıkan güç

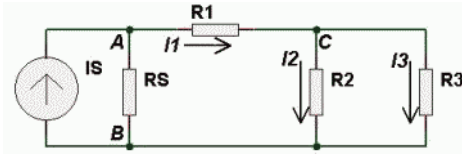
$$P_T = U_T^2/(k R_T + R_T)$$

aktarılan güç

$P_L = U_T^2 k R_T/(k R_T + R_T)^2$. olur ve sonuçta $P_L/P_T = k/(k + 1)$

$R_L = 4 R_T$ seçsek güç nakli verimi $4/5 = \%80$ e yükselir. Ancak bu oran hiçbir zaman tam $\%100$ olamayacaktır.

Örnek 5.2. Daha önce çözdüğümüz $R_S=4\Omega$, $I_S=20A$, ve R_1 , R_2 , R_3 dirençleri sırasıyla 30Ω , 20Ω ve 80Ω olan devrede R_3 direncinin yerine kaç ohm koyarsak bu dirence en yüksek enerji akışını sağlarız? Dirence ne kadar güç akışı olur.



Çözüm: Önceki örnekten

$U_{CBacık} = 29.62V$; $R_T = 12.59 \Omega$ elde etmiştik. O halde yeni yükün değeri $R_L = 12.59 \Omega$ olduğunda $29.62^2 / (4 \times 12.59) = 17.42$ W güç aktarımı gerçekleşir.

5.3 Superpozisyon (Katkıların Birleşimi) Teoremi

Genel anlamıyla bütün doğrusal devrelerde geçerli olan süperpozisyon teoremi şu şekilde ifade edilir.

Teorem 5.2. *Birden fazla güç kaynaklı bir devrenin herhangi bir akım kolundaki akım, güç kaynaklarının her birinin o kolda oluşturduğu akım katkılarının toplamı kadardır.*

Uygulamada devredeki güç kaynaklarının her seferinde yalnız biri çalıştırılıp diğerlerinin tümü sıfırlanarak çalışan güç kaynağının akıma katkısı bulunur. Akım, bütün güç kaynaklarının birer birer katkılarının toplamı kadardır.

Akım kaynağının sıfırlanması kaynaktan akım geçmemesi, yani **kaynağın yerinde açık devre kalacak şekilde kaldırılması** demektir.

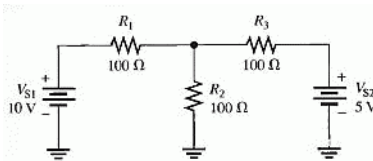
Gerilim kaynağının sıfırlanması kaynağın iki ucu arasında gerilim farkı olmaması, yani **kaynağın yerinde kısa devre kalacak şekilde kaldırılması** demektir.

Süperpozisyon teoremi güç kaynağı ve dirençlerden oluşan devrelerin doğrusal davranışının bir sonucudur. Doğrusallık genel tanımıyla $a, b, c \in R$ olmak üzere bir devredeki herhangi bir güç kaynağı a kadar arttırıldığında devredeki herhangi bir akım kolundaki akım b kadar değişiyorsa aynı güç kaynağı ca kadar arttırıldığında o akım

kolunda cb kadar değişim olması anlamına gelir. Tevenin teoreminin de, en yüksek güç aktarımı teoreminin de geçerliliği direnç (empedans) devrelerinin doğrusallık özelliğine bağlıdır.

Süperpozisyon teoremi genellikle çok kaynaklı devrelerde devrenin bir akım kolundaki akımını bulmak, ya da devrenin iki ucu arasındaki Tevenin eşdeğerini elde etmek için kullanılır. Her iki kullanımını da birer örnek ile anlatalım.

Örnek 5.3. Aşağıdaki devrenin R_2 dalından geçen I_2 akımını süperpozisyon ve çevrim-gerilim yöntemleriyle bulunuz



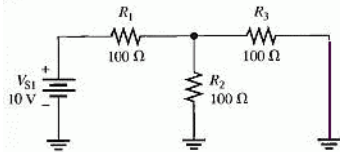
Çözüm:

Süperpozisyon için aşağıdaki basamakları uyguluyoruz.

i- *Devredeki güç kaynaklarını belirleriz.* Buradaki güç kaynaklarımız V_{S1} ile V_{S2} dir.

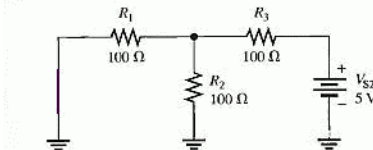
ii- *Her bir kaynağın akıma katkısını bulunuz.*

a) V_{S1} devrede V_{S2} kısa devre edilerek kaldırıldığı durumda V_{S1} kaynağının I_2 akımına katkısı



$$I_{2,V_{S1}} = V_{S1}(R_2 // R_3) / (R_1 + R_2 // R_3) / R_2 \\ = 10 (50/150) / 100 = 1/30 \text{ A kadardır.}$$

b) V_{S2} devrede V_{S1} kısa devre edilerek kaldırıldığı durumda V_{S2} kaynağının I_2 akımına katkısı



$$I_{2,V_{S2}} = V_{S2}(R_1 // R_2) / (R_3 + R_1 // R_2) / R_2 \\ = 5 (50/100) / 100 = 1/60 \text{ A kadardır.}$$

iii) Akım katkıların tümünün toplamıdır.

$$I_2 = I_{2,V_{S1}} + I_{2,V_{S2}} = 1/30 + 1/60 = 1/20 \text{ A}$$

Çevrim-gerilim yöntemi için

i- devrede bağımsız iki çevrim vardır. Birinci çevrim akımı R_1 üzerinden geçen I_1 , ikinci çevrim akımı R_3 üzerinden geçen I_3 olsun. $I_2 = I_1 - I_3$ olarak elde edilir.

$$\text{ii) Matris denklem } \begin{bmatrix} R_1 + R_2 & -R_2 \\ -R_2 & R_2 + R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ -5 \end{bmatrix}$$

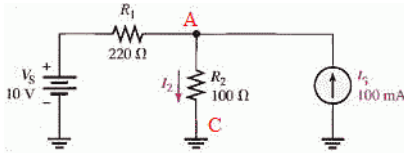
elde edilirken I_1 çevrimi üzerindeki tüm dirençlerin toplamı $R_1 + R_2$; I_1 ve I_3 çevrimlerinin paylaştığı direnç R_2 ; I_3 çevrimi üzerindeki toplam direnç $R_2 + R_3$ direnç matrisine yerleştirilir. Gerilimler vektörüne de çevrim akımı kaynağın artısından çıkıyorsa kaynak değeri artı işaretli konur. Çözerken matris tersi gerekir.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} R_1 + R_2 & -R_2 \\ -R_2 & R_2 + R_3 \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 200 & -100 \\ -100 & 200 \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{300} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}; \\ & \begin{bmatrix} I_1 \\ I_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{300} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 10 \\ -5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (20 - 5)/300 \\ (10 - 10)/300 \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

böylece $I_1 = 15/300 = 1/20$, $I_3 = 0$;

dolayısıyla $I_2 = I_1 - I_3 = 1/20$ bulunur.

Örnek 5.4. Aşağıdaki devrede superpozisyon uygulayarak I_2 akımını ve devrenin $A - C$ uçları arasındaki Tevenin eşdeğerini bulunuz.



Çözüm: Süperpozisyon ile $A - C$ arasındaki açık devre gerilimini hesaplayacağız.

i- Devredeki güç kaynakları: V_S ve I_S .

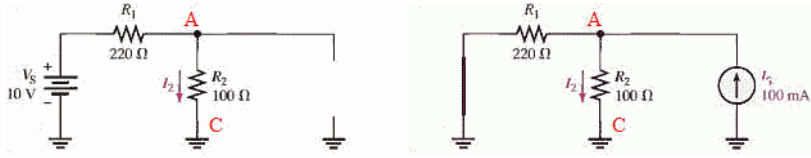
ii- Güç kaynaklarının I_2 ve V_{AC} katkısı:

a- Yalnız V_S uygulanırken $I_S = 0$ açık devreye dönüşür.

$$I_{2,V_S} = 10/(220 + 100) = 1/32 \text{ A};$$

$$V_{AC,V_S} = I_2(V_S)R_2 = 100/32 \text{ V}$$

b- Yalnız I_S açıkken $V_S=0$ kısa devreye dönüşür.



Devrede (a) Yalnız V_S açıkken

(b) Yalnız I_S açıkken

$$G_1 = 1/R_1 = 1/220; G_2 = 1/R_2 = 1/100;$$

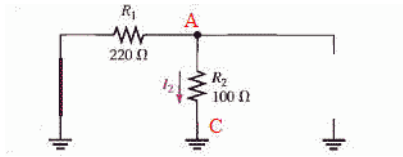
$$I_{2,I_S} = 0.1 \frac{G_2}{G_1 + G_2} = 0.1 \frac{1/220}{1/220 + 1/100} = 0.1 \frac{220 \cdot 100}{220(220 + 100)} = 1/32 \text{ A};$$

$$V_{AC,I_S} = I_2 R_2 = 100/32 \text{ V}$$

$$c- I_2 = I_{2,V_S} + I_{2,I_S} = 1/16 \text{ A};$$

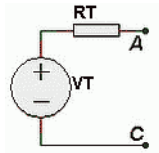
$$V_{AC} = V_{AC,V_S} + V_{AC,I_S} = 200/32 \text{ V}$$

Tevenin eşdeğer direncini elde etmek için bütün kaynakları sıfırlayarak A-C arasındaki direnci bulalım



$$R_T = 220 // 100 = 1/(1/220 + 1/100) = 1/(32/2200) = 275/4 \Omega$$

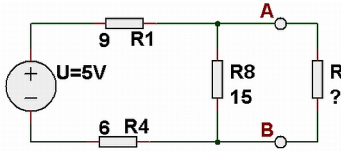
Devrenin Tevenin eşdeğeri



$$V_T = V_{AC} = 200/32 \text{ V ve } R_T = 275/4 \Omega \text{ olur:}$$

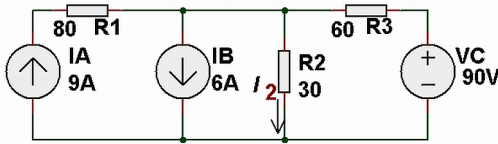
5.4 Problemler

Problem 5.1. Aşağıdaki devrede



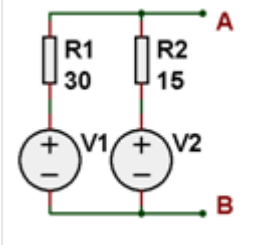
- Devrenin R dışındaki bölümünün A-B noktaları arasındaki Tevenin Voltaj ve direncini bulunuz.
- R direnci kaç ohm olduğunda güç transferi en yüksektir?
- $R=30$ Ohm bağlıken Tevenin kaynağı V_T ve gerçek kaynak U devreye ne kadar güç sağlıyor?

Problem 5.2. Aşağıdaki devrede



- Devredeki her bir kaynak için I_2 ye etkisini bulacağınız devreyi çiziniz
- I_A nın I_2 ye katkısını bulun
- I_B nin I_2 ye katkısını bulun
- V_C nin I_2 ye katkısını bulun
- I_2 nin değerini bulun.

Problem 5.3. Aşağıdaki devrede



- $V_1 = 20V$, $V_2 = 10V$ veriliyor. Süperpozisyon kullanarak $A - B$ düğümleri arasındaki Tevenin eşdeğerini bulurken
- $V_2 = 0$ alındığında V_{AB} gerilimi ne kadardır?
 - $V_1 = 0$ alındığında V_{AB} gerilimi ne kadardır?
 - $V_1 = 0$, $V_2 = 0$ alındığında $A - B$ arasındaki eşdeğer direnç ne kadardır.
 - Devrenin Tevenin eşdeğerini çizin.

Kısım II

AA Devreleri

Bölüm 6

Kondansatör ve RC devre analizi

Kondansator ve bobin üzerindeki gerilim ve akıma bağlı olarak enerji biriktirebilen devre elemanlarıdır. Bu özelliğiyle alternatif akım (AA) devrelerinde önemli görevler üstlenirler.

Kondansatör en basit biçimiyle yalıtkan bir **dielektrik** maddenin iki tarafındaki iletken plakalarda yük biriktirmek üzere yapılmış elektrik devre elemanıdır. En önemli özellikleri plakalardaki enerji biriktiren yükün kondansatörün uçlarındaki gerilime orantılı olarak artmasıdır.

$$Q = C V$$

Kondansatörün yük-gerilim katsayısı C **kapasite** veya **kapasitans** olarak adlandırılır. Kondansatörlere yaygın olarak kapasitor de denir.

İçlerindeki dielektrik malzemeye bağlı olarak önemli değişiklikler gösterir. Dielektrik olarak:

Elektrolit çözelti kullanılırsa **elektrolitik kondansatör** olarak adlandırılır. Yükler, elektrolitik çözelti ile iletken metal film arasında oluşan çok ince oksit tabakasının iki tarafında birikir. Elektrolitik kondansatörlerin dayanabilecekleri gerilim düşük, ancak kapasiteleri çok yüksek olur. Oksit yalnızca anotta biriktiğinden anot ucu pozitif gerilime bağlanmazsa oksit tabakası çözünür ve kapasitör bozulur.

Yağ emdirilmiş kağıt kullanılırsa **yağlı kondansatör** diye adlandırılır. Kapasitesi düşük te olsa binlerce volta kadar dayanabilir.

İnce seramik oksit tabakasının iki tarafı metalize edilerek oluşturulan **seramik disk kondansatörler** elektronik devrelerde kullanılır. Bu yolla çok küçük kapasiteleri düşük toleranslarla gerçekleştirmek mümkündür. Mercimek kondansatör olarak ta bilinen bu çeşit kondansatorler gigahertzlerdeki çok yüksek frekanslarda bile görevini yapabilir.

Ince polimer film tabakasının iki tarafı metalize edildiğinde **polimer film kondansatör** denen radyo frekanslarına kadar orta gerilimlerde çalışabilecek çok hassas kapasitans değerleri elde edilir.

Değişken kondansatörler radyo frekans filtrelerinde frekans ayarlamak için kullanılır. *Doğal mika ya da polimer kaplı döner hareketli metal plakaların* konumu kapasitans değerini değiştirir. Bir p-n bağlantı diyodun kapasitansı uygulanan ters-gerilimle orantılı olarak değişir. Radyo devrelerinde bu amaçla kullanılan diyetlere **varikap** adı verir.

Kapasitans bir kondansatörün birim gerilime karşılık sakladığı yüküdür.

$$C = \frac{Q}{V}$$

Kapasitans **Farad (F)** birimiyle ölçülür. Bir Farad, kondansatöre bir volt uygulandığında kondansatörde bir Kulomb yük birikiyor anlamına gelir. Ancak Farad çok büyük bir birimdir, ve genellikle piko, nano, mikro gibi küçük çarpanlarla birimlendirilir. $1 \text{ F} = 10^{12} \text{ pF} = 10^9 \text{ nF} = 10^6 \mu\text{F}$ eder.

Örnek 6.1. Bir kondansatöre 10V uygulandığında 50 Ω Kulomb yük saklıyor. Kapasitesi kaç mikroFarad eder?

Çözüm: $C = Q/V = 50 \mu\text{Coul} / 10V = 5 \mu\text{F}$.

Kondansatörde biriken enerji Bir kondansatörde biriken yük plakaların ucundaki gerilimden ötürü enerji biriktirir. Kondansatörde biriken enerji biriken yük ve biriktiği gerilimin sonucu olduğundan

$$dw = v dq = v C dv$$

$W = \int dw = C \int v dv = \frac{1}{2} CV^2$ bulunur. İşin Jul olarak çıkması için V volt, C Farad biriminde kullanılmalıdır.

Kondansatörlerin başlıca parametreleri Kondansatörlerin kapasitesi birincil parametresidir. Diğer önemli parametreleri arasında:

Dielektrik dayanımı kondansatörün dayanabileceği en yüksek voltajı gösterir.

Toleransı etiket kapasitesinin doğruluk sınırlarını gösterir.

Sıcaklık katsayısı kapasitenin sıcaklıkla değişimini gösterir.

Sızdırma Akımı kapasitenin üzerindeki yükün kendiliğinden boşalmasına neden olur.

6.1 Seri ve paralel kondansatörler

$C_1, C_2, \dots, C_N$ kapasitanslı kondansatörler seri bağlandıklarında eşdeğer kapasitans C_E

$$\frac{1}{C_E} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N} \text{ ifadesinden hesaplanır.}$$

Yalnızca iki kondansatör için bu ifade $C_E = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ olarak basitleşir.

Kondansatörlerin üzerindeki gerilim kapasiteleriyle ters oranda, diğer deyişle $\frac{1}{C}$ değerleri oranında bölünür.

Örnek 6.2. Birbirine seri bağlı $C_1 = 10\mu\text{F}$, $C_2 = 4.7 \mu\text{F}$ ve $C_3 = 8.2\mu\text{F}$ Kondansatörlerin eşdeğer kapasitesini bulun.

Çözüm:

$$C_{E12} = \frac{10 \cdot 4.7}{10 + 4.7} = 3.1973 \mu\text{F} .$$

$$C_E = \frac{3.1973 \cdot 8.2}{3.1973 + 8.2} = 2.3\mu\text{F}$$

$C_1, C_2, \dots, C_N$ kapasitanslı kondansatörler paralel bağlandıklarında eşdeğer kapasitans C_E

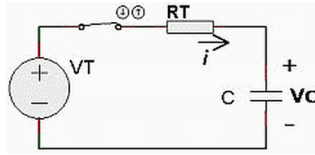
$$C_E = C_1 + C_2 + \dots + C_N$$

ifadesinden bulunur.

6.2 RC devrede kalıcı durum analizi

Kalıcı durum DA devrenin anahtarlama işleminden sonra varacağı son durumdur. DA devrelerdeki kondansatörler geçici akım rejimi bitince akımı bloke eder ve açık devre gibi davranır. İçlerinde biriken yük ve enerji üzerlerindeki gerilimden hesaplanabilir.

Bir RC devrede anahtar uzun süredir kapalıysa C kondansatörü $V_C = V_T$ oluncaya kadar yüklenir. Ancak yükler kondansatörün plakaları arasındaki yalıttımdan geçemeyeceği için $V_C = V_T$ olduktan sonra devreden akan I akımı sıfıra düşer. $I = 0$ olduğunda R_T üzerindeki gerilim de $V_{RT} = I R_T = 0$ olur ve böylece RC devredeki kalıcı duruma erişilir.

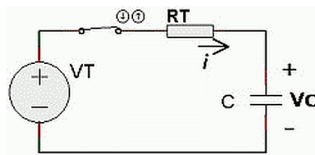


Şekil 6.2.1: RC devre

6.3 RC devrede geçici dönem ve zaman sabiti

Devrede kondansatöre paralel bir anahtar ile gerektiğinde kondansatörün gerilimi sıfırlanarak yükü boşaltılabilir.

Bir direnç devresindeki kondansatör, bağlı bulunduğu devrenin Tevenin eşdeğeri kullanılarak bir V_T gerilim kaynağı, bir R_T direnç ve bir C kapasiteli kondansatörden oluşan bir seri devreye dönüşür. Böyle bir devrenin geçici davranışı $4 \cdot R_T C$ süresinin sonunda %98 oranında tamamlanır.



Şekil 6.3.1: RC devrede geçici dönem

Başlangıç gerilimi 0V olan C kapasiteli bir kondansatör $t = 0$ anında R_T direnci üzerinden V_T gerilimine bağlanırsa kapasitor bir süre sonra kalıcı olarak devrede açık-devre gibi davranarak V_T gerilimine şarj olur. $0 < t < 5R_TC$ süresi boyunca ise devrenin davranışı geçici davranış olarak adlandırılır. Bu sürede kondansatör şarj olurken gerilimi artar ve direncin üzerindeki gerilimi düşürdüğünden şarj edecek akımı giderek azaltır.

$$\text{KVL: } V_T = R_T i(t) + v_c(t)$$

Kondansatör gerilimi:

$$V_c C = Q,$$

$$C \frac{dv_c(t)}{dt} = \frac{dq(t)}{dt} = i$$

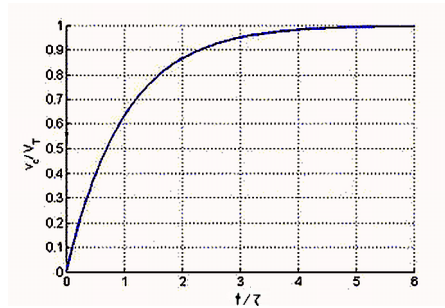
Akımı KVL içinde kullanırsak

$$R_T C \frac{dv_c(t)}{dt} + v_c(t) = V_T;$$

Bu differensiyel denklemin $v_c(0) = 0$ başlangıç koşulu ile çözümü kondansatör gerilimi için

$$v_c(t) = V_T(1 - e^{-t/R_TC}) \text{ bulunur.}$$

Devrenin çözümlenmesinde $\tau = R_TC$ önemli bir parametredir, ve devrenin zaman sabiti olarak adlandırılır. Son varacağı gerilimi V_T ile gösterirsek dolmakta olan kondansatör gerilimi $t < 0.2\tau$ süreye kadar V_C/V_T değeri yaklaşık t/τ kadardır. V_C/V_T değeri $t = 0.5\tau$ sonra 0.394 , 1τ sonra 0.632, 2τ sonra 0.865, 3τ sonunda 0.950, 4τ sonunda ise 0.982 e ulaşır.



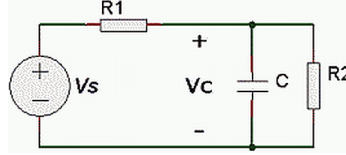
Şekil 6.3.2: Birinci derece zaman sabitli üstel artış

Örnek 6.3. Aşağıdaki devrede $C = 200\text{nF}$; $R_1 = 100\text{ k}\Omega$, $R_2 = 900\text{ k}\Omega$, $V_s = 10\text{V}$ veriliyor. Devrenin zaman sabitini ve $v_c(0) = 0$

Tablo 6.3.1: RC devrede kondansatör geriliminin yükselişi

t/τ	<0.2	0.5	1	2	3	4	5
$v(t)/V_T$	t/τ	0.394	0.632	0.865	0.950	0.982	0.993

başlangıç koşuluyla $v_c(t)$ geçici davranışını bulup kondansatör dolmaya başladıktan 2ms ve 36ms sonraki v_c gerilimini hesaplayalım.



C çıktıktan sonra geriye kalan devrenin Tevenin eşdeğeri

$$V_T = V_s \cdot 900 / (900 + 100) = 9 \text{ V} ;$$

$$R_T = R_1 // R_2 = 90000 / 1000 = 90 \text{ k}\Omega .$$

$$\tau = R_T C = 200\text{nF} \cdot 90 \text{ k}\Omega = 18 \text{ ms},$$

$$v_c(t) = V_T (1 - e^{-t/\tau}) = 9 (1 - e^{-t/0.018}).$$

$t = 2\text{ms}$ ve 36ms deki v_c değerlerini bulurken $2\text{ms} < 0.2 \times 18\text{ms}$ olduğundan

$$v_c(2\text{ms}) = 2/18 \times 9 = 1 \text{ V} , \quad v_c(36\text{ms}) = 9 \times 0.865 = 7.8 \text{ V olur.}$$

Bölüm 7

Bobin ve RL devre analizi

Bir iletken den geçen akım iletkenin çevresinde akıma dik yönde manyetik alan yaratır. Oluşan manyetik alan geçen akımla doğru orantılıdır. Manyetik alana bağılı manyetik devreler enerji saklayabilir ve başka bir devreye enerji iletebilir. Manyetik alanı yönlendirmek ve güçlendirmek için iletken pek çok turdan oluşan halka biçiminde şekillendirilebilir. Manyetik alan oluşturarak enerji saklayabilen bu elemana bobin denir.

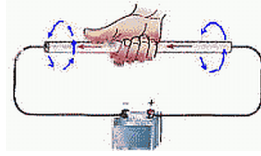
7.1 Manyetik alan

Manyetik alan kalıcı mıknatıs özelliğı olan maddelerde de gözlenir. Kalıcı mıknatıs olan maddelerin atomlarında elektronların dönüş yönleri (spin) dengesizdir ve bu dengesizlik kristal yapılarına yansır. Mıknatıstaki manyetik alan manyetik madde atomlarındaki dengelenmemiş elektron spin'inin kristal yapısında da dengelenmemesinin bir sonucudur. Manyetik alan N ve S olarak adlandırılan manyetik kutuplar oluşturur ve bu kutupların birbirine uyguladığı kuvvet ile ölçülür. Elektrik yükleri gibi aynı tipte olan manyetik kutuplar birbirini iter, farklı tipte olanlar birbirini çeker.

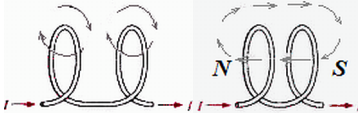
7.2 Elektromanyetik alan ve endüktans

Joseph Henry (1797-1878) Albany, NY, ta profesör olarak başlayan akademik hayatına Smithsonian Enstitüsünde devam etti. Faradaydan bir yıl önce 1830da bir demir göbeğı sarılan iki bobin ile deney yapıp elektromanyetik endüksiyonu gözlemlemiş ancak gözlemlerini yayınlamamıştır. Öz endüksiyonu bulmuş, ve endüktans birimi onun adıyla anılmıştır.

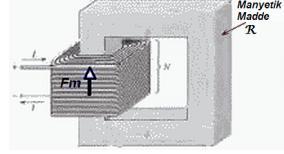
Bir iletken den geçen akım iletkenin çevresinde akıma dik yönde manyetik alan oluşturur.



(a) İletkenden geçen akım sağ el kuralına uygun manyetik alan oluşturur.



(b) Bobinin turları yeterince yakınsa oluşan manyetik alan bobinin ortasına toplanır.



(c) Relüktansı düşük manyetik maddeler oluşan akıyı yoğunlaştırarak manyetik devre oluşturur.

Şekil 7.2.1: Sağ el kuralı ve Manyetik devre

İletken üstüste halkalar oluşturacak şekiide biçimlendirilirse oluşan manyetik alanlar halkanın ortasında yoğunlaşır. Yoğunlaşan manyetik akı relüktansı düşük yol üzerinde manyetik devre oluşturur. Manyetik devrelerle elektrik devreleri arasındaki enerji dönüşümü konusunu daha ileride daha ayrıntılı göreceğiz. Şimdi bobinin uçlarındaki elektriksel bağıntıya bakalım.

7.3 Endüktans

Bir bobinin elektromanyetik alanındaki değişim bobinin uçlarında gerilim endüklenmesine neden olur. Bobinden geçen akımın değişimi nedeniyle oluşan manyetik alan değişimi bobinde *öz-endükleme gerilimi* oluşturur. Akım değişimiyle oluşan bu gerilimin büyüklüğünü belirleyen katsayıya *öz endüktans* denir. Ancak, yalnızca öz endüktans söz konusu olan bobinlerde katsayıya kısaca *endüktans* da denir.

Endüktans L bir bobinden geçen $i(t)$ akımının değişimiyle bobinde oluşan $v(t)$ geriliminin orantı katsayısıdır

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}.$$

Endüktans Henry birimiyle ölçülür. Bir Henry çok büyük bir birim olduğundan genellikle elektronikte *nano*, *mikro*, *milli* gibi birim ön-ekleri ile kullanılır. Ön ekler $1\text{H} = 1000\text{ kH} = 1000\,000\text{ }\mu\text{H} = 1000\,000\,000\text{ nH}$ eşitliğindeki gibi sembollerle kısaltılır. Devre şemalarında kullanılan bobin sembolleri aşağıda görülüyor. Hava ya da yalıtkan göbekli bobin birkaç tur sarılmış tele benzer. 50 Hz gibi düşük frekanslarda manyetik devre oluşturmak için manyetik madde olarak relüktansı çok düşük olan yumuşak demir saç göbekler, daha yüksek frekanslarda ise seramik ferit göbekler tercih edilir. Demir göbekli, ve kağıt karkas içinde yeri ayarlanabilen ferit parça sayesinde değeri değişebilen değişken bobinler sembollerinde bobine yapılan ek işaretlerle belirtilir.



Şekil 7.3.1: Hava göbekli, demir göbekli ve değişken ferit bobin sembolleri.

7.3.1 Endüktans ve Kapasitans dual benzerliği

Endüktansı tanımlayan

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \text{ ya da } i(t) = \frac{1}{L} \int v dt$$

ile kondansatörü tanımlayan

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \text{ ya da } v(t) = \frac{1}{C} \int i dt$$

bağıntıları arasında akım ve voltaj açısından kondansatör ile endüktans arasında dual benzerlik vardır. Bunlardan bobin akımı gerilime göre geciktirir, kondansatör ise gerilimi akıma göre geciktirir.

7.3.2 Bobinde depolanan enerji

Kondansatör üzerindeki gerilime bağlı olarak devreden enerji çeker ve daha sonra bu enerjiyi devreye geri verir. Benzer şekilde bobin de üzerindeki akıma bağlı olarak devreden çektiği enerjiyi manyetik alanda depolar ve daha sonra geri verir. Endüktansı L olan bir bobinden geçen akım i ise oluşan manyetik alanda sakladığı enerji

$$w = \frac{1}{2} L i^2$$

kadardır. Henry ve Amper birimlerine karşılık gelen enerji birimi Watt ve Jul'dür.

Örnek 7.1. $2\mu\text{H}$ lik bir bobinden 10 A geçiyor. Bobinin manyetik alanında depolanan enerji kaç Juldur?

$$\text{Çözüm: } w = \frac{1}{2} L i^2 = \frac{1}{2} 2 \cdot 10^2 \mu\text{Jul} = 0.100 \text{ mJul}.$$

7.4 Seri ve paralel bobinler

Seri bağlı $L_1, L_2, \dots, L_N$ bobinlerinin eşdeğeri endüktanslarının toplamıdır:

$$L_E = L_1 + L_2 + \dots + L_N .$$

Paralel bağlı $L_1, L_2, \dots, L_N$ bobinlerinin eşdeğerinin tersi ise paralel endüktansların terslerinin toplamıdır.

$$\frac{1}{L_E} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_N}$$

Örnek 7.2. Birbirine seri bağlı $L_1 = 10\mu\text{H}$, $L_2 = 4.7\mu\text{H}$ ve $L_3 = 0.1\text{mH}$ endüktansların eşdeğer endüktansını bulun.

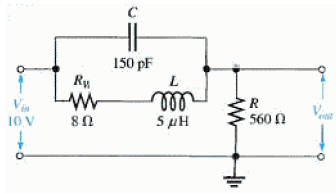
Çözüm: Hepsini mikroHenriye dönüştürüp toplayalım

$$L_E = 10 + 4.7 + 100 = 96.7\mu\text{H} .$$

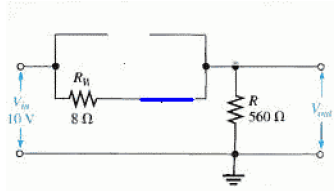
7.5 RLC devrelerde kalıcı devre analizi

DA devrelerdeki bobinler geçici dönem bitince doğru akımı iletir ve kısa devre gibi davranır. Bu özelliği nedeniyle devredeki gerilim ve akımların kalıcı değeri bobinleri kısa devre kondansatörleri açık devre yaparak kolayca hesaplanabilir.

Örnek 7.3. Aşağıda verilen devre geçici dönem sonlanıp dengeye geldiğinde V_{out} gerilimi ne kadar olur.

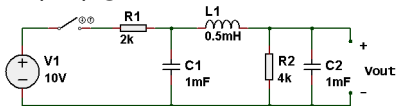


Çözüm: C açık devre, L kısa devre ile değiştirilirse devrede iki seri direnç kalır.

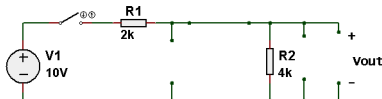


Gerilim bölücü bağıntısından $v_{out} = 10V \frac{560}{560 + 8} = 9.86 V$ bulunur.

Örnek 7.4. Aşağıdaki devredeki anahtar kapanınca kalıcı durumdaki çıkış gerilimini bulalım



Çözüm: Önce devredeki kondansatörleri açık, bobinleri kısa devre yaparız.



$$\text{Çıkış gerilimi } V_{out} = 10 \frac{4}{2 + 4} = 6.66V$$

7.6 RL devrelerde zaman sabiti

Aynen tek kondansatorl  direnç devreleri gibi tek bobinli direnç devreleri de bobin dışındaki devrenin Tevenin eşdeğeri kullanılarak     mlenebilir. Endüktans L olan Bobin devreye bağlandığında bir V_T gerilim kaynağı ve seri bağlı bir R_T direnciyle L bobininden oluşan devrenin kalıcı akımı $i(\infty) = \frac{V_T}{R_T}$ olur.

Devrenin geçici davranışını bulmak için KVL, Ohm kanunu ve Endüktans bağıntısı kullanılır.

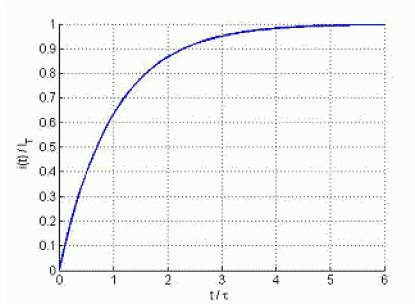
$$V_T = R_T i + L \frac{di}{dt}, \quad i(0) = 0. \text{ Denklem standart biçime konulursa}$$

$$\frac{V_T}{R_T} = i + \frac{L}{R_T} \frac{di}{dt},$$

Bu differensiyel denklemin verilen başlangıç koşulu için     m 

$$i(t) = \frac{V_T}{R_T} (1 - e^{-t/(L/R_T)}) \text{ dir.}$$

Geçici rejimin zaman sabiti $\tau = \frac{L}{R_T}$ akımın kalıcı değerin %63  ne erişeceği süreyi belirler.



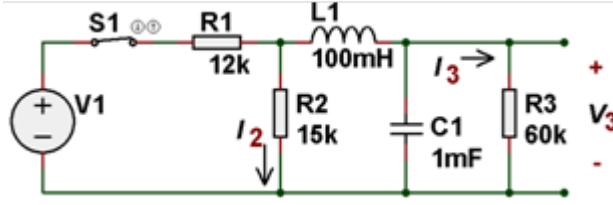
şekil 7.6.1: RL devrede akımın üstel artışı

7.7 Problemler

Problem 7.1. Aşağıdaki devrede

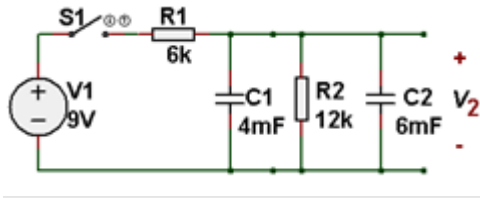
Tablo 7.6.1: RL devrede bobin akımının yükselişi

t/τ	0.5	1	2	3	4	5
$i(t)/I_T$	0.394	0.632	0.865	0.950	0.982	0.993



V_1 gerilimi 240V verilmiştir. S_1 anahtarı kapalıyken devrenin geçici davranışı sona erdiğinde V_3 geriliminin kalıcı değeri kaç volt olur? Kalıcı durum analiz devresini çizerek hesaplayınız.

Problem 7.2. Aşağıdaki devrede



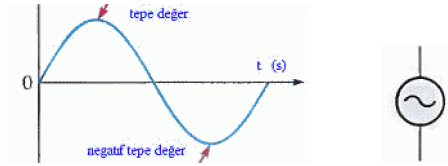
- C_1 ve C_2 nin eşdeğer kapasitansını bulun.
- Kondansatörün uçları arasındaki Tevenin direncini bulmak için S_1 kısa devre ve $V_1 = 0V$ (kısa devre) iken kapasitör uçları arasındaki dirençlerin eşdeğer direncini bulun.
- V_2 geriliminin kalıcı değerini bulun.
- Devrenin zaman sabitini ve $V_2(t)$ geçici gerilim fonksiyonunu bulun.
- $t = 2s$ ve $t = 120s$ olduğunda $V_2(2)$ ve $V_2(120)$ gerilimlerinin yaklaşık değerlerini bulunuz.

Bölüm 8

Alternatif Akım ve Gerilim

8.1 Sinüs eğrisi ve parametreleri

Alternatif akım devrelerinde güç kaynakları sinüs eğrisini takip eder. Sinüs eğrisinin bir periyodu Şekil 8.1.1de gösteriliyor.



Şekil 8.1.1: Sinüs eğrisi ve Alternatif güç kaynağı sembolü

Heinrich Rudolf Hertz 1857-1894 Alman fizikçi Hertz ilk elektromanyetik yayını yapıp yayılan sinyali alan kişidir. Laboratuvar koşullarında oluşturduğu elektromanyetik dalgaları (radyo dalgaları) bir anten ile alıp çeşitli parametrelerini ölçmüştür. Elektromanyetik dalgaların bir çeşit ışık dalgaları olduğunu ilk anlayan kişidir. Saniyedeki periyod sayısı adına ithaf edilmiştir.

Sinüs eğrisi zaman içinde kendini tekrarlar.

Periyod, kendini tekrarlayan bir değişkenin tekrarlandığı en kısa süredir. Periyod saniye birimiyle ölçülür ve kısaca T ile gösterilir.

Sinüs eğrisinde tepe değerden tepe değere geçen süre, sıfırı yükselerek kesme noktasından sıfırı tekrar yükselerek kesme noktasına olan süre, ya da sıfırı azalarak kestiği noktadan bir sonraki sıfırı azalarak kestiği noktaya olan süreler birbirine eşittir ve bu süre sinüs eğrisinin *periyodudur*.

Frekans, kendisini tekrarlayan değişkenlerin birim zamanda tekrarlanma sayısıdır. Frekans kısaca f ile gösterilir. Periyod saniye birimiyle ölçülürse frekans saniyedeki dönüş ya da Hertz biriminden

$$f = 1/T$$

bağıntısıyla bulunur. Örneğin bir periyodunu 20ms sürede tamamlayan bir sinüs eğrisinin frekansı

$$\frac{1}{20 \text{ ms}} = \frac{1}{0.02 \text{ s}} = 50 \text{ Hz bulunur.}$$

Sinüs eğrisi matematiksel olarak $A \sin(\omega t + \phi)$ ifadesiyle tanımlanır.

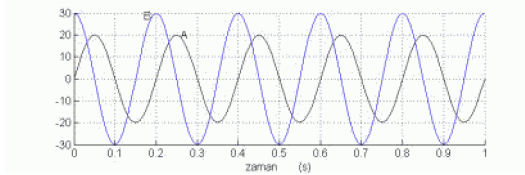
Bu tanımda t bağımsız zaman değişkeni; A , ω , ve ϕ parametredir.

Genlik (Amplitude) sinüs eğrisinin $A \sin(\omega t + \phi)$ ifadesindeki A parametresidir. Sinüsün tepe noktasının değerini belirler.

Açısal hız veya açısal frekans $A \sin(\omega t + \phi)$ ifadesindeki ω parametresidir ve birimi radyan/saniye'dir. Sinüs eğrisi $A \sin(\omega t + \phi)$ ve $\omega t = 2\pi$ olduğunda $t = 0$ daki değerini tekrarlamaya başlar.

Bu nedenle periyod $T = \frac{2\pi}{\omega}$, ve frekans $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$ olur. Diğer bir deyişle açısal hız ω ile periyodik frekans f arasında $\omega = 2\pi f$ bağıntısı vardır.

Örnek 8.1. Aşağıdaki A ve B sinüs eğrilerinin periyodunu, frekansını ve genliğini bulunuz.

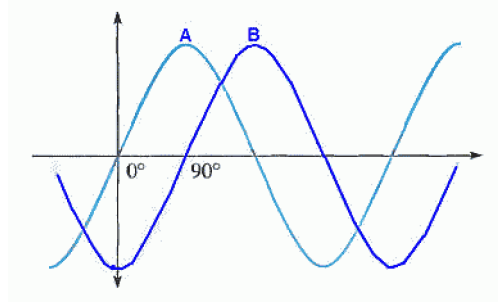


Çözüm:

A eğrisi bir saniyede toplam 5 kere tekrarlandığından frekansı $f_A = 5 \text{ Hz}$ bulunur. Periyodu $T_A = 1/f_A = 0.2$ saniye olur. Periyodu eğrinin tekrarladığı süreyi ölçerek te 0.2 s çıkar. Genliği ise sinüsün en yükseğe çıktığı değere bakılarak 20 okunur.

B eğrisi de saniyede 5 kere tekrarlandığından frekansı $f_B = 5$ Hz bulunur. Dolayısıyla periyodu da 0.2 s eder. Genliği ise 30 okunur.

Faz $A \sin(\omega t + \phi)$ ifadesindeki ϕ (fiy okunur) parametresidir ve birimi radyan veya derecedir. Aynı frekanstaki sinüs eğrileri fazları farklı ise aralarında faz farkı kadar zaman farkı oluşur. Örneğin Şekil 8.1.2de B eğrisi A dan 90° gecikerek gidiyor. Bu gecikme B'yi tanımlayan $\sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ ifadesindeki $\theta = -\frac{\pi}{2}$ parametresinden kaynaklanıyor.



Şekil 8.1.2: Farklı fazda sinüs eğrileri. A eğrisi $\sin(\omega t + 0)$, B eğrisi $\sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$.

Örnek 8.2. Bir devre $V_S = 240 \sin(100\pi t)$ gerilim kaynağıyla beslenirken devrenin çıkış uçlarında $V_O = 180 \sin(100\pi t - \frac{\pi}{4})$ gerilimi oluşuyor. Çıkış gerilimi girişe göre kaç derece gecikiyor?

Çözüm Faz açısı $\phi = -\frac{\pi}{4}$ radyan $= -\frac{\pi}{4} \times \frac{180}{\pi}$ derecedir. Fazın negatif olması çıkışın geciktüğünü gösterir.

8.2 AA Güç Kaynakları ve Güç Aktarımı

Alternatif akım güç kaynaklarını anlayabilmek için elektromanyetik enerji dönüşümünü görmemiz gerekir. Bir miknatis kalıcı manyetik

özellik gösteren maddedir. Miknatısların N ve S olmak üzere iki çeşit kutubu vardır. Aynı kutuplar birbirini mekanik anlamda iterler. Farklı kutuplar ise birbirini çeker.

Manyetik akı yoğunluğu, B bir *manyetik alana* dik birim alandan geçen *manyetik akı* miktarıdır ve o (T) birimiyle ölçülür. Bir tesla bir metrekarede bir Weber manyetik akı var anlamına gelir.

$$B = \frac{\phi_m}{A}$$

denkleminde ϕ_m manyetik akıyı, A ise akıya dik alanı gösteriyor.

Manyetik alan, ϕ_m akım geçiren bobinlerde ve kalıcı miknatıs özelliği olan maddelerde gözlenir. Kalıcı miknatıs olan maddelerde manyetik atomlu kristal yapıları nedeniyle bazı elektronları atomun çevresinde aynı yöne spin hareketine sahiptir. Manyetik alan bu elektronların aynı yönde spin hareketlerinin bir sonucudur.

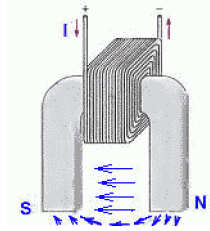
Elektromanyetik alan bir iletkenin geçen serbest elektrik yüklerinin hareketi nedeniyle oluşan manyetik alana verilen adıdır. Oluşan elektromanyetik alan sağ el kuralına uyarak iletkenin etrafında halkalar biçiminde manyetik akıyla gösterilir (Şekil 7.2.1).

İletken bir halka biçimindeyse iletken çevresinde oluşan manyetik akının tümü halkanın içinden geçer ve güçlü bir magnetik alan oluşturur. Magnetik alanı oluşturan etki halkadan geçen akıdır, ve bu akım magnetomotif-kuvvet olarak adlandırılır. Toplam N tur sarılmış bir iletken halkada iletkenin geçen I akımını toplam $\mathcal{F}_m = NI$ kadar magnetomotif kuvvet oluşturur. Yumuşak sac demir gibi relüktansı havaya göre düşük olan manyetik materyaller bu magnetomotif kuvveti toplayıp iletebilir. Böylece magnetik devre oluşur. Manyetik devrenin relüktansı $\mathcal{R}$ manyetik devrede oluşacak manyetik akıyı belirler.

$$\phi_m = \frac{\mathcal{F}_m}{\mathcal{R}}$$

Manyetik madde bir bölgede manyetik akı havadan geçecek biçimde şekillendirilmişse bir elektromiknatıs oluşur (Şekil 8.2.1). Her elektromiknatısın aynı miknatıslar gibi N ve S olmak üzere iki

kutubu vardır. Aynı kutuplar birbirini iter, farklı kutuplar birbirini çeker.



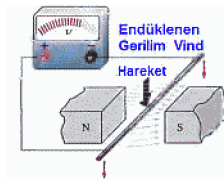
Şekil 8.2.1: Elektromıknatıs bir bobin ve demir göbekten oluşur

İletken üzerindeki kuvvet: L uzunluğunda bir iletken manyetik akı yoğunluğu B olan manyetik alanda içinden geçen I akımı nedeniyle B ve I ya dik yönde $F_n = B I L$ kadar bir kuvvet oluşturur. Bu kuvvet iletkeni geçen akımdan oluşan manyetik alanın B ile etkileşmesi sonucu oluşur.

Endüklenen gerilim: Bir B manyetik alanına dik S_n hızla hareket ettirilen L uzunluğundaki iletken

$$V_{ind} = B L S_n$$

kadar bir gerilim endüklenir (Şekil 8.2.2).



Şekil 8.2.2: Manyetik alana dik hareket eden iletken elektrik gerilimi endüklenir.

Elektromanyetik güç dönüşümü: Eğer B manyetik alanı içindeki iletken I akımı geçiyorsa endüklenen gerilimden dolayı güç oluşur. Akım iletken üzerinde F_n kuvveti oluşturduğundan bir tarafta akım-gerilim öbür tarafta yol-kuvvet olmak üzere mekanik enerji elektrik enerjisine dönüşür. Dönüşen enerji $P = I V_{ind} = F_n d$ kadardır.

Elektromanyetik güç dönüşümü bir düz iletkenin hareketinden oluştuğu gibi halka halinde sarılmış iletken bir bobinden geçen manyetik alanın değişim hızından da oluşur. Buna Faraday kanunu denir.

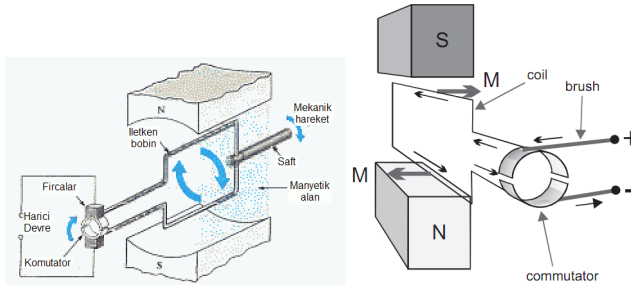
Faraday kanunu bobin biçiminde N tur sarılmış bir iletkende endüklenen gerilimi iletkenin içindeki manyetik alanın değişim hızına bağlı olarak verir.

$$v_{ind} = N \left(\frac{d\phi_m}{dt} \right)$$

Michael Faraday (1791-1867) İngiliz fizik ve kimyacıdır. Bilime elektromanyetik olayları açıklayarak büyük katkıda bulunmuştur. Bir bobin içinde hareket ettirilen mıknatısın elektrik ürettiğini bulmuştur. İlk elektrik motorunu, jeneratörü ve transformatörü bulan kişidir. Kapasitör birimi Farad, ve Faraday kanunu olarak anılan elektromanyetik gerilim endüksiyonu bağıntısı onun adına ithafen konulmuştur.

DA-jeneratör ve motor: Eğer bir bobini manyetik alanda döndürürseniz içinden geçen manyetik akı her yarım dönüşte bir yönden diğer yöne değişecektir (Şekil 8.2.3). Her yarım dönüşte bobin uçlarının devreye bağlantısını ters çevirecek bir fırça-komutator düzeneği kullanınca mekanik gücü doğru-akım elektrik gücüne çeviren bir DA-jeneratör elde edilir.

DA-motor ile DA-jeneratör aynı enerji dönüşüm prensibine dayanır. Rotor adı verilen bobin manyetik alan içinde olduğundan bobinden geçen akım rotorda dönme kuvveti oluşturur. Bobinde indüklenen elektromotif kuvvet ile geçen akım nedeniyle elektrik devresinden alınan güç rotorda oluşan dönme kuvveti ve rotorun dönme hızı biçiminde mekanik güce dönüşür. Jeneratör elektrik üretimini daha



Şekil 8.2.3: DC motor veya DC jenerator bir manyetik alanda dönebilen bobinden oluşur.

verimli yapabilecek şekilde tasarlanırken motor mekanik gücü daha verimli oluşturacak biçimde tasarlanır.

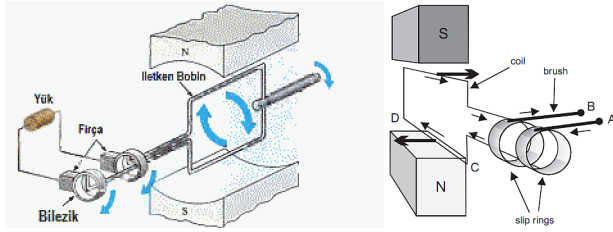
Fırça-komutator¹² noktası DA-jeneratorun en zayıf noktasıdır. Devrenin her yarım turda bir anahtarlanmasına neden olur. Büyük akımların bir yönden diğerine anahtarlanması yüzünden çıkan ark fırça ve komutatoru oksitler. Yüksek akım geçebilmesi için fırça-komutator direncinin aşırı ısınmaya neden olmayacak derecede düşük olması gerekir. Bu da ancak fırçanın komutatora yeterince yüksek kuvvette basmasını gerektirir. Bu sefer dönme hareketine dik kuvvet yüzünden sürtünme oluşur ve hem ısınma hem de aşınma başlar. Fırçalar yumuşak alaşımlardan, komutator sert ve dayanıklı alaşımlardan yapılır ve periyodik bakımda fırçaları değiştirmek gerekir.

AA-jenerator ve Senkron motor komutator hariç aynı DC-jenerator yapısındadır, ancak fırça-komutator yerine daha basit yapıdaki fırça-bilezik³ kullanıldığından yüke aktarılan gerilim manyetik alanın değişim hızında her yarım turda bir yönden öbür yöne değişir (Şekil 8.2.4). Oluşan gerilim tam bir sinus eğrisidir. Frekansı rotorun saniyede dönüş turuna eşittir. Amerika kıtasında jeneratörler saniyede 60 tur döndüğünden dağıtılan gerilimin frekansı 60Hz olur. Asya ve avrupada ise jeneratörler saniyede 50 tur döner ve dağıtılan gerilimin frekansı 50Hz olur.

¹Brush

²Commutator

³slip rings



Şekil 8.2.4: AA jeneratörde komutator yerine bilezikler kullanır. AA senkron motor olarak ta çalışabilir.

AA-jenerator bir motor gibi çalışabilir ve bu durumda adına AA-Senkron-motor denir.

Bilezik-fırça ikilisi aynı komutator-fırça gibi sürtünmeye yol açsa da devreyi anahtarlamaadığından ark oluşturmaz. Bu nedenle daha uzun ömürlü çalışır ve daha az bakım gerektirir.

Yüksek güçlü motor ve jeneratörler saniyede 50 defa dönmeyecek kadar büyük ve ağırdır. Kutup sayısını arttırarak dönüş hızı dönebileceği düzeye düşürülür. Örneğin dört kutuplu bir jeneratör 50Hz üretmek için saniyede 25 tur dönmelidir (Şekil 8.2.5).

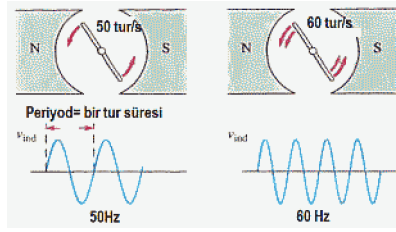
8.3 AA Güç, Direnç ve Eşdeğer Gerilim

AA gerilim $v(t) = A \sin(\omega t)$ sinüs eğrisi olduğundan periyodun ilk yarıperiyodda (ilk alternans) gerilim pozitif, ikinci yarıperiyodda ise negatiftir. Gerilim zamana bağlı olduğu için çeşitli biçimlerde tanımlanabilir.

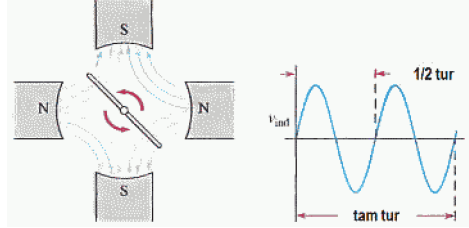
Anlık gerilim $v(t)$ nin herhangi bir t anında aldığı gerilim değeridir.

$t = 0$, $t = \frac{\pi}{\omega}$ ya da $t = \frac{2\pi}{\omega}$ anından $v(t) = 0$ olur.

$t = 0$ ile $\frac{\pi}{2\omega}$ aralığında sinüs eğrisi önce çok hızlı, sonra giderek yavaşlayarak en yüksek değerine kadar çıkar.



(a) İki kutuplu



(b) dört kutuplu

Şekil 8.2.5: AA jeneratörün elektriksel frekansı dönüş hızına ve kutup sayısına bağlıdır.

$t = \frac{\pi}{2\omega}$ olduğunda v en yüksek değerine ulaşır ve değeri A olur. Bu noktaya **(pozitif) tepe gerilimi noktası**, A değerine de **tepe gerilimi** denir. Tepe gerilimi genellikle V_p ile gösterilir.

$t = \frac{\pi}{2\omega}$ ile $\frac{\pi}{\omega}$ arasında önce yavaş, sonra giderek daha hızlı düşerek sonunda sıfıra ulaşır.

$t = 0$ dan $\frac{\pi}{\omega}$ ye kadarki bölgeye pozitif yarıperiyod (alterance) denir.

$t = \frac{\pi}{\omega}$ anından $v(t) = 0$ dır.

$t = \frac{\pi}{\omega}$ ile $\frac{3\pi}{2\omega}$ aralığında sinüs eğrisi önce çok hızlı, sonra giderek yavaşlayarak en düşük değerine kadar iner.

$t = \frac{3\pi}{2\omega}$ olduğunda v en düşük değeri olan $-A$ olur. Bu noktaya **negatif tepe gerilimi noktası** denir.

$t = \frac{3\pi}{2\omega}$ ile $\frac{2\pi}{\omega}$ arasında önce yavaş, sonra giderek daha hızlı yükselerek sonunda sıfıra ulaşır.

$t = \frac{\pi}{\omega}$ den $\frac{2\pi}{\omega}$ ye kadarki bölgeye negatif yarıperiyod denir.

Tepeden tepeye gerilim V_{pp} ile gösterilir. V_p değerinden negatif tepe gerilimi çıkarılarak bulunur. $v(t) = A \sin(\omega t)$ için

$$V_{pp} = A - (-A) = 2A = 2V_p \text{ çıkar.}$$

Ortalama değer, V_{ort} ya da V_{mean} , bir periyodu boyunca zamana göre tümlevinin bir periyodluk süreye bölünmesiyle elde edilir. Sinüs eğrisinin pozitif yarısı negatif yarısına tam eşit olduğundan ortalaması sıfırdır.

Mutlak ortalama değer, V_m , bir periyodu boyunca $v(t)$ nin mutlak değerinin ortalamasından bulunur. Negatif yarı periyodun mutlak değeri pozitif yarı periyodu aynen tekrarladığından, üstelik yarım periyod da birbirine simetrik iki çeyrek periyottan oluştuğundan çeyrek periyodun integralini çeyrek periyoda bölerek elde edilir.

$$V_{av} = \frac{2\omega}{\pi} \int_{t=0}^{\pi/2\omega} A \sin(\omega t) dt = \frac{2A}{\pi} = 0.637V_p.$$

Uygulamada bir periyod üzerinden alınan ortalama değer in sıfır çıkacağı bilindiğinden mutlak ortalama değer kısaca ortalama değer diye adlandırılır. Sinüs eğrisinin ortalaması da pozitif yarıperiyotta alınır.

Etkin (Efektif) değer: Bir R direnci üzerindeki $v(t) = A \sin(\omega t)$ geriliminin efektif değeri dirençte aynı gücü harcayacak DA gerilim değeridir. Dirençte harcanan güç gerilimin karesinin ortalamasının kare-köküyle orantılı olduğundan efektif değere kısaca **RMS** değer de denir. RMS İngilizce Root (=kök) Mean (=ortalama) Square(=kare) sözcüklerinin başharflerinden oluşur. Tepe değeri V_p olan sinüs eğrisinin RMS değeri integral olarak

$$V_{rms} = \frac{\sqrt{2}}{2} V_p = 0.707V_p$$

olarak hesaplanır. Benzer şekilde

$$I_{rms} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_p = 0.707I_p \text{ eder.}$$

AC voltmetre AVOmetrelerin AC konumlarında ölçülen değer doğrultulmuş AA gerilimin ortalamasıdır. Ancak gösterge sinüs eğrisi için RMS değerine göre bölmelidir. Kısaca, örneğin $V_p = 1V$ gerilim ibreyi DC 0.637V kadar saptırır, ama saptığı yere 0.707 V-ac işaretlenmiştir. Böylece sinüs şeklindeki AA gerilimler tam doğru RMS değeriyle okunmuş olur.

Örnek 8.3. RMS değerleri 12V ve 240V olan AA gerilimlerin tepe gerilimlerini bulunuz.

Çözüm: $V_{RMS} = 12V$, $V_p = 12/0.707 = 16.97V$, $V_{RMS} = 240V$, $V_p = 240/0.707 = 339.4V$

Enerji İletim Verimi bir enerji dağıtım sisteminde kullanıcıya aktarılan gücün jeneratörden üretilen güce oranıdır. Enerji dağıtımında kullanılan kablolar mükemmel iletken olmadığından az da olsa R_{hat} kadar dirençleri vardır. Bu R_{hat} direnç değeri nedeniyle geçirdikleri akımın karesiyle orantılı miktarda güç dağıtım kablolarında harcanır.

$$P_{hat} = I^2 R_{hat}$$

Yüksek Gerilim Hatları enerji iletim verimini arttırmak için en uygun çözümdür. Jeneratörde üretilen güç $P_{jen} = IV$ olduğuna göre V yüksek seçilirse I düşer ve aynı dağıtım hattında P_{hat} önemli derecede azalır. Ancak bu kez ya dağıtılan elektriği kullanacak cihazların çok yüksek voltaj için tasarlanmış olması gerekir, ya da tam dağıtımdan önce voltajın düşürülmesi gerekir.

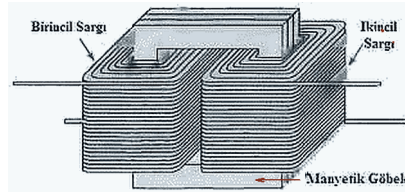
8.4 Transformatör (Trafo)

İki bobin L_1 ve L_2 manyetik alanları birbirini etkileyecek kadar yakınsa aralarında M etkileşim endüktansı nedeniyle karşılıklı gerilim endüklenmesi ve enerji aktarımı gerçekleşir.

$$v_1(t) = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}; \text{ ve } v_2(t) = M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt}$$

Eğer oluşan bütün manyetik akı örneğin sac göbekte yönlendirilmiş bir manyetik devre üzerinden her iki bobini de dolaşıyorsa $M = \sqrt{L_1 L_2}$ olur ve bobinler arasındaki enerji aktarımı en yüksek seviyeye çıkar. Enerji kaybı olmayan bu elektromanyetik elemana **ideal transformator** denir. *Transformatör* ya da *trafo* elektrik enerjisini manyetik alanın değişim enerjisine dönüştürüp oluşan manyetik alan değişimini de tekrar elektrik enerjisine dönüştüren elektromanyetik elemandır.

Şekil 7.2.1'de görülen manyetik devrenin birincil⁴ akım sargısı N_p tur ise oluşturduğu $\mathcal{F}_m = N_p I_p$ kadar magnetomotif kuvvet nedeniyle manyetik devrede $\phi_m = \frac{\mathcal{F}_m}{\mathcal{R}}$ kadar manyetik akı oluşur.



Şekil 8.4.1: Transformatorun yapısı

AA akımda oluşan ϕ_m sürekli değişecektir. Aynı manyetik devreye yerleştirilecek N_s turluk ikincil⁵ bobinde değişen ϕ_m manyetik akısı $\mathcal{F}_m = N_p I_p = N_s I_s$ kadar bir akım oluşturur. Bu elektromanyetik devrede enerji harcayacak elektrik devresi oluşmuyorsa giren enerji çıkan enerjiye eşit olacağından

$$V_p I_p = V_s I_s \text{ ile } N_p I_p = N_s I_s$$

aynı anda sağlanacaktır. Bu nedenle sargı tur oranına n dersek

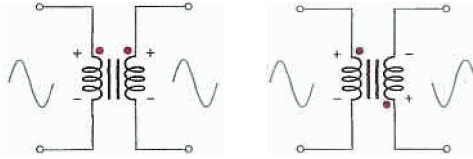
$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

olacaktır. Kısacası, sargı tur oranını istediğimiz değerde seçerek çıkışta daha yüksek ya da daha düşük gerilim oluşturabiliriz.

Trafolar devre şemasında manyetik göbeği temsil eden çift çizginin iki tarafında bobinlerle gösterilir. Böbinlerin bir yanındaki noktalar ikincil gerilimin fazını gösterir

⁴primary

⁵secondary



Şekil 8.4.2: Transformatör sembolü. Noktalar gerilimin faz yönünü gösterir.

Trafolar örneğin Atatürk barajında üretilen gerilimi 760 kV 'a yükseltip güç iletim hattından bin kat düşük akım geçirerek İstanbul'a iletebilmeyi sağlar. İstanbul'daki gerilim düşürücü trafo merkezinde 30 kV ve her mahalledeki trafolar da evlere ve işyerlerine dağıtılmak üzere 230V değerine düşürülür. Bu şekilde güç iletim hattında harcanan güç bir milyon kat azalmış olur.

Örnek 8.4. Bir batarya şarj aleti 240V gerilimi trafo ile 12V gerilime düşürüp doğrultarak 12V bataryaları doldurmaktadır. Ortalama 96W güç sağlayabilen bu şarj aletinde hiç güç kaybolmadığını varsayarsak

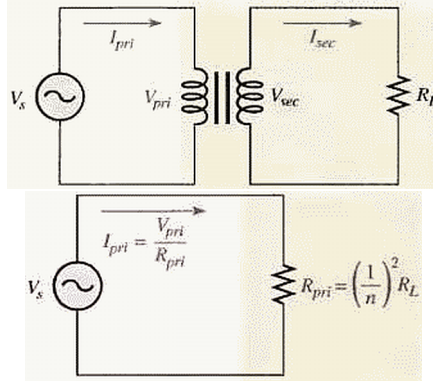
- 12 V'luk bataryayı doldururken bataryaya ne kadar akım verir.
- yüzde ellisi boşalmış 80 A-h (Amper-saat) kapasiteli bir bataryayı kaç saatte şarj eder.
- bu sırada 240 V güç girişinden yaklaşık kaç Amper çeker.
- trafonun sarım oranı kaçtır.

Çözüm:

- Gücü $P = IV = 96W$ olduğuna göre $V = 12$ Volt ise $I = 96/12 = 8A$ akım verir.
- Sağlayacağı akım kapasitesi $80 \cdot 50/100 = 40$ A-h. Verdiği akım 8A. Toplam süre $40/8 = 5$ saat.
- Trafoda güç kaybı olmadığını varsayarsak $P = I_1 V_1 = I_2 V_2$ olmalıdır. $I = 96/240 = 0.4A$
- $240/12 = 20 : 1$ sarım oranı gerekir.

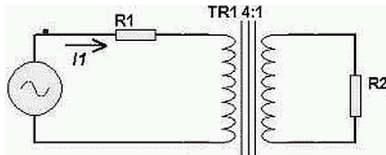
Birincil sargının ikinciye sarım oranı $n = N_p/N_s$ olarak gösterirsek trafonun birinci tarafına uygulanan V_p geriliminin ikinci

tarafa eşdeğer etkisi sarım oranına ters orandadır $V_s = V_p/n$. Birinci taraftan geçen akımın diğer tarafta oluşturduğu akım sarım oranıdır $I_s = n I_p$. Birinci taraftaki R_{pL} yükünün diğer tarafa eşdeğer etkisi sarım oranlarının karesi oranındadır $R_{sL} = n^2 R_{pL}$. İkincil sargı devresindeki R_{sL} direncinin birincil sargıdaki etkisi ise $R_{pL} = \frac{1}{n^2} R_{sL}$ olur.



Şekil 8.4.3: Trafoda ikincil devre yükünün birincil devredeki eşdeğer etkisi

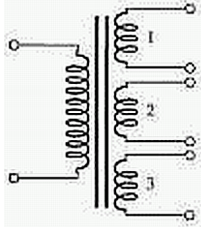
Örnek 8.5. Devredeki AA gerilim 20V, $R_1 = 40\Omega$, $R_2 = 160\Omega$ ve trafonun sarım oranı $n=4$ verilmiştir. R_1 direncinin akımını hesaplayınız.



Çözüm. R_2 nin birincil devreye etkisi $1/n^2 = 1/16$ oranındadır. $R_{p2} = R_2/16 = 10 \Omega$ eder. $I_1 = V/(R_1 + R_{p2}) = 20/50 = 0.4$ A bulunur

Bir trafoda birden fazla ikincil sargı olursa çok çıkışlı trafo denir. Çok çıkışlı trafoda her bir ikincil sargı yükü birincil sargıya paralel yük olarak yansır

Örnek 8.6. Sarım oranları $n_1=1:5$, $n_2=2:1$ ve $n_3=1:1$ olan trafo-
nun birincil sargısına $V_T=240$, $R_T=40\Omega$ Tevenin eşdeğerli kaynak
bağlanıyor. İkincil sargılara sırasıyla $R_{s1} = 40\Omega$, $R_{s2} = 2k\Omega$ ve
 $R_{s3} = 500\Omega$ bağlanırsa birincil devredeki akımı bulun.

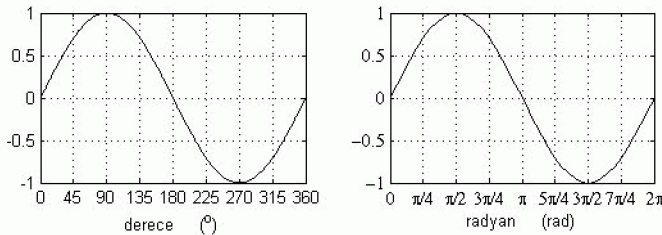


Çözüm: ikincil devrelerin birincil devredeki eşdeğerini bulalım.
Tevenin devresine paralel bağlı $R_{p1} = R_1/n_1^2 = 40 \times 25 = 1k\Omega$,
 $R_{p2} = R_2/n_2^2 = 2000/4 = 500\Omega$, $R_{p3} = R_3/n_3^2 = 500/1 = 500\Omega$,
Birincil devre akımı

$$I_p = 240/(40 + 500//500//1000) = 240/240 = 1A$$

8.5 Sinüs eğrisinin açılal eksende gösterimi

Sinüs eğrisi zaman eksenini boyunca çizileceği yerde bir periyod 2π ya da 360° olacak şekilde radyan ya da derece olarak açılal eksen boyunca da çizilebilir (Şekil 8.5.1). Böylece sinüsler arasındaki faz farkının önem kazandığı durumlarda faz farkı doğrudan çizimden okunur.

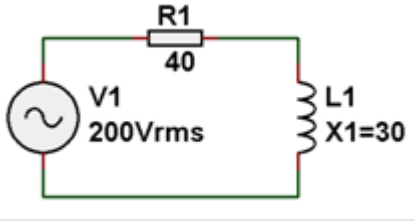


Şekil 8.5.1: Sinüs eğrisi derece ya da radyan ekseninde çizilebilir.

Açısal eksen de faz: Fazı kaymamış bir sinüs eğrisinin yükselen sıfır keşişmesi k 'nın tamsayı değeri için $k \cdot 2\pi$ açılarda gerçekleşir. Sıfır açıda yükselen sıfır keşişmesi yapan sinüsün fazı sıfır yani kaymamış demektir. Eğer fazı kaymışsa yükselen sıfır keşişmesi $\phi \neq 0$ değeri de gerçekleşir. Açı $0 \leq \phi \leq \pi$ aralığındaysa faz ϕ kadar gecikmiş demektir. Açı $\pi \leq \phi \leq 2\pi$ aralığındaysa faz $2\pi - \phi$ kadar ileri kaymış demektir.

8.6 Problemler

Problem 8.1. Aşağıdaki devrede



V_1 gerilimi AA 50Hz 200V RMS verildiğine ve L_1 in reaktansı $X_1 = 30 \Omega$ olduğuna göre aşağıdakileri hesaplayın.

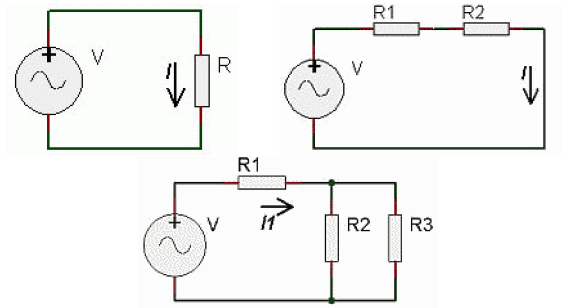
- R_1 ve L_1 in toplam empedansı Z_T kaç Ohmdur?
- Devreden geçen akım I kaç Amperdir?
- Devrenin çektiği güç P kaç Wattır?
- Devrenin çektiği reaktif güç Q kaç VAR dır?
- Devredeki akımın fazı V_1 gerilimine göre ileride midir, yoksa geriden mi gelir?

Bölüm 9

AA güç kaynaklı devrelerinin çözülmesi

9.1 AA kaynaklı direnç devreleri

Ohm kanunu ile Kirşof kanunları direnç devrelerinde anlık gerilim-akım ilişkisi için de geçerlidir.



Şekil 9.1.1: AA kaynaklı direnç devreleri

Tepe gerilimi A değerinde olan bir AA gerilim kaynağı iki ucundan R direncine bağlıysa dirençten geçen akım Ohm kanunu gereği

$$I = \frac{V}{R} = \frac{A \sin(\omega t + \phi)}{R} = \frac{A}{R} \sin(\omega t + \phi)$$
 kadardır. Devredeki voltaj ve akımların faz ve frekans değerleri hiçbir zaman değişmeyeceğinden bütün voltaj ve akımlar yalnız tepe gerilimi ve akımı ile ya da yalnız RMS gerilim ve akımı ile gösterilebilir.

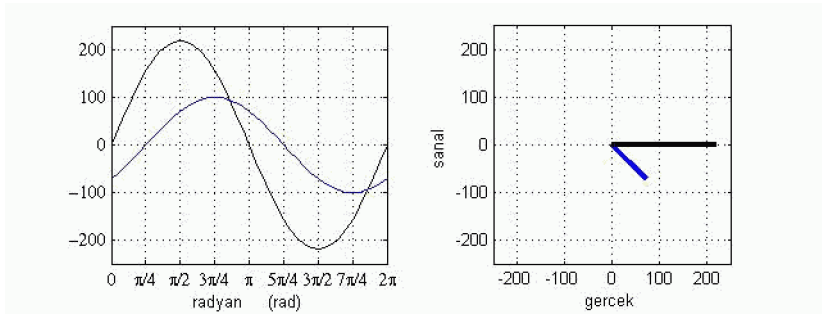
İki direncin seri bağlandığı bir devrede R_1 ve R_2 dirençlerinden geçen akım her an aynı fazda olduğundan eşdeğer dirençleri $R_1 + R_2$ olur. Hem seri hem paralel dirençlerin bulunduğu devrelerde paralel dirençlerin eşdeğeri $R_2 // R_3 = 1 / \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$

olur. Bu yönleriyle AA direnç devreleri DA direnç devrelerinden farklı değildir.

Bir AC direnç devresinde aynı frekansta birden fazla AA güç kaynağı varsa sinüs eğrilerinin faz açıları birbirinin aynı olmak zorunda değildir. Böyle devreleri daha kolay çözümleyebilmek için gerilim ve akımlar fazor olarak adlandırılan vektörlerle gösterilir.

9.2 Sinüs eğrisinin vektörel (fazor) gösterimi

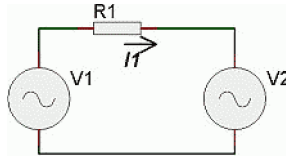
Belli bir tek frekanstaki voltaj ve akımların kullanıldığı AA devre analizinde sinüs eğrisinin yalnızca genliği ve fazı önem kazanır. Çeşitli sinüs eğrilerinin birbirleriyle ilişkisini kolayca göstermek için bu iki parametre bir vektör olarak birleştirilir. Örneğin fazı hiç kaymamış 220V gerilimi göstermek için uzunluğu 220, açısı 0 olan bir vektör kullanırız ve yazarken kısaca $220\angle 0$ olarak gösteririz. Fazı $\pi/4$ geciken 100V gerilim için $100\angle -\frac{\pi}{4}$ vektörünü kullanırız.



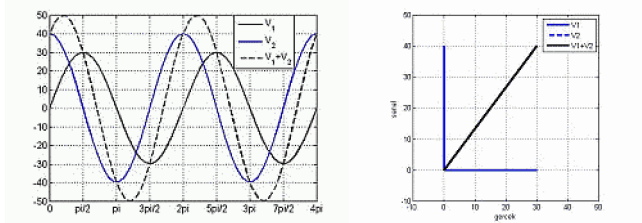
Fazor¹ gösterimde fazorun boyu gösterilen sinüsün genliğine, fazorun açısı ise sinüsün gecikme açısına karşılık gelir. Yalnız dirençlerden ve tek AA kaynaktan oluşan AA devrelerde fazı kaydırabilecek hiçbir etmen olmadığından devreyi çözümlerken fazor gerekmez. Enerji depolayabilen devre elemanları olan kondansatör ve bobin üzerinden geçen akıma göre gerilimi 90° geri ve ileri kaydırır. Böyle devreleri fazor kullanarak çözümlmek diğer yöntemlere göre daha kolaydır

¹Phasor

Örnek 9.1. Aşağıdaki devrede $R_1 = 100\Omega$, $V_1 = 30 \sin(314t)$ ve $V_2 = 50 \sin(314t + \pi/2)$ olarak veriliyor. I akımını bulalım.



Çözüm: İki gerilimi de açısal ekseninde çizer, toplamlarını alırsak $V_1 + V_2$ nin tepe geriliminin 50 ettiğini görürüz. Ancak grafiksel toplamaya dayanan bu çözüm pratikte nadiren kullanılır. Daha kolay bir yol her iki gerilimi fazora dönüştürüp toplam fazoru bulmaktır.



Örneğimizdeki iki fazör birbirine dik olduğundan toplam fazorun açısı ve genliği kolayca

$$\begin{aligned}
 V_1 + V_2 &= 30\angle 0 + 40\angle \pi/2 \\
 &= (30+0j) + (0+40j) = 30+40j \\
 &= \sqrt{30^2 + 40^2} \angle \arctan\left(\frac{4}{3}\right) = 50\angle 53.13^\circ \\
 &= 50 \sin\left(314t + \frac{53.13\pi}{180}\right)
 \end{aligned}$$

bulunur. Artık devremizde bir tek eşdeğer gerilim kaynağı olduğundan devredeki akımın faz açısı bu eşdeğer kaynağın faz açısında olacaktır. Ohm kanununu fazör vektörleriyle $I = V/R$ den hesaplarız.

$$I = \frac{50\angle 53.13^\circ}{100} = 0.5\angle 53.13^\circ = 0.5 \sin\left(314t + \frac{53.13\pi}{180}\right).$$

9.3 AA devrede Empedans ve Reaktans

Empedans², Z , fazor uzayında bir elemanın akım fazoru I ile gerilim fazoru V arasındaki ilişkinin vektörel orantı katsayısıdır.

$$V = I Z$$

Empedansın tersi **admittans**³ olarak adlandırılır ve fazor olarak $Y = 1/Z$ ile, ya da genlik olarak $Y = 1/Z$ ile gösterilir.

$$I = V Y$$

Bobin ve kondansatör hiç güç harcamamalarına rağmen akım ve gerilimin değişme hızına sınır getirdikleri için AA devrede akımı sınırlarlar. Aynı Ohm kanununa benzer şekilde AA gerilim AA akımla orantılıdır. Ancak güç harcamayan bu elemanların AA gerilime direniş katsayısına **reaktans**⁴ denir.

Kapasitif Reaktans kondansatörün RMS değerleri V_C ve I_C olan AA voltaj ve akımı kullanarak

$$X_C = \frac{V_C}{I_C}$$

ile tanımlanır.

Endüktif Reaktans ta benzer şekilde bobinin RMS değerleri V_L ve I_L olan AA voltaj ve akımı kullanarak

$$X_L = \frac{V_L}{I_L}$$

ile tanımlanır. Endüktif reaktansın tersi olan iletkenlik **suseptans**⁵ olarak ta adlandırılır ve B ile gösterilir.,

$$B_L = 1/X_L .$$

9.3.1 Kondansatörün empedans ve reaktansı

Kapasitansı C olan bir kondansatör fazoru $V_C = V_C \angle 0$ olan bir sinusoidal gerilim kaynağına bağlanırsa

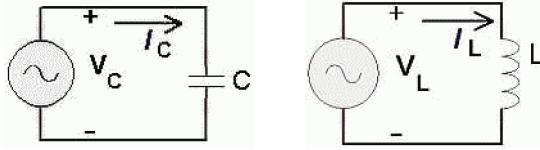
$$\begin{aligned} i_C &= C \frac{dv}{dt} = C \frac{dV_C \sin(\omega t)}{dt} \\ &= \omega C V_C \cos(\omega t) = \omega C V_C \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{aligned}$$

²impedance

³admittance

⁴reactance

⁵susceptance



Şekil 9.3.1: Kondansator ve bobinli AC devreler

olacağından fazor uzayında

$I_C = \omega C V_C \angle \frac{\pi}{2}$ bulunur. Dolayısıyla akım fazoru I_C gerilime göre $90^\circ = \frac{\pi}{2}$ radyan önde olur.

Tanım gereği kondansatörün empedansı

$$Z_C = \frac{V_C}{I_C} = \frac{V_C \angle 0}{\omega C V_C \angle \frac{\pi}{2}} = X_C \angle -\frac{\pi}{2} = \frac{1}{\omega C} \angle -\frac{\pi}{2} = \frac{-j}{\omega C}$$

olarak elde edilir. Frekans ile açısal hız arasındaki ilişki

$$\omega = 2\pi f$$

kullanılarak kondansatörün reaktansı

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

olarak bulunur.

Özet olarak, C kapasitansının empedans fazörü

$$Z_C = \frac{1}{2\pi f C} \angle -\frac{\pi}{2} = \frac{-j}{2\pi f C},$$

reaktansı ise

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \text{ dır.}$$

Örnek 9.2. Kapasitesi $50 \mu\text{F}$ olan bir kondansatörün;

- 50 Hz deki
- 1000 Hz deki
- Sonsuz frekandaki
- Doğru Akımdaki kapasitif reaktanslarını hesaplayınız.

Çözüm:

$$\text{a) } X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \text{ 50 Hz de } 2\pi f = 314 \text{ olduğundan}$$

$$X_C = \frac{1}{314 \times 0.000050} = \frac{1}{0.0157} = 63.69 \Omega$$

- b) $2\pi f = 6280$, $X_c = \frac{1}{6280 \times 50\mu} = \frac{10^6}{314159} = 3.183\Omega$
 c) $2\pi f = \infty$, $X_c = 0$. Kısa devre
 d) $2\pi f = 0$, $X_c = \infty$. Açık devre

9.3.2 Kapasitif devrede güç

Kondansatörde akım gerilime göre 90° önde gider

$$v = V_C \sin(\omega t),$$

$$i = I_C \cos(\omega t) = \omega C V_C \cos(\omega t),$$

$$p = iv = I_C V_C \cos(\omega t) \sin(\omega t) = \frac{I_C V_C}{2} \sin(2\omega t)$$

Bu yüzden hem akımın hem gerilimin aynı işaretli olduğu sıralar kondansatör devreden güç alır ($p > 0$), ancak daha sonra akım ile gerilimin farklı işarette olduğu sürelerde aldığı gücü devreye geri verir ($p < 0$). Sonuçta bir periyod boyunca çekilen gücün ortalaması sıfır olur.

Devreden bir periyod içinde alınan ve verilen ama ortalaması sıfır olan bu güce **reaktif güç denir**, Q ile gösterilir.

$$Q_C = V_C I_C = V_C^2 / X_C = I_C^2 X_C$$

Reaktif güç Q , VAr (=volt-amper-reaktif) birimiyle kullanılır.

9.3.3 Bobinin empedans ve reaktansı

Endüktansı L olan bir kondansatör fazoru $V_L \angle 0$ olan bir sinusoidal gerilim kaynağına bağlanırsa

$$v_L = L \frac{di}{dt} \text{ olacağından}$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int V_L \sin(\omega t) dt = -V_L \frac{1}{\omega L} \cos(\omega t) = V_L \frac{1}{\omega L} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \text{ olur ve fazor uzayında}$$

$I_L = V_L \frac{1}{\omega L} \angle -\frac{\pi}{2}$ bulunur ve sonucunda akım gerilime göre $\frac{\pi}{2}$ radyan gecikir.

Tanım gereği kondansatörün reaktansı

$$X_L = \frac{V_L}{I_L} = \omega L = 2\pi f L \text{ bulunur.}$$

Akımı gerilime göre geciken bobinin empedansı sanal ekseninde eksi değerlidir.

$$\mathbf{Z}_L = \mathbf{V}_L / \mathbf{I}_L = \frac{V_L \angle 0}{V_L \frac{1}{\omega L} \angle -\frac{\pi}{2}} = \omega L \angle \frac{\pi}{2} = \omega L j \text{ olarak elde}$$

edilir.

Özet olarak, L endüktanslı bobinin empedansı

$$\mathbf{Z}_L = 2\pi f L \angle \frac{\pi}{2} = 2\pi f L j ,$$

reaktansı ise

$$X_L = 2\pi f L \text{ dir.}$$

Örnek 9.3. Endüktansı $L = 4 \text{ mH}$ olan bir bobinde 50 Hz frekanslı 2 amper AA geçiyorsa

- a) bobinin reaktansını hesaplayınız.
- b) bobinde indüklenen gerilimi bulunuz.

Çözüm:

$$\text{a) } X_L = 2\pi f L = 2\pi \times 50 \times 4\text{m} = 1.256\Omega$$

$$\text{b) } V_L = I X_L = 2 \times 1.256 = 2.512 \text{ V}$$

9.3.4 Endüktif devrede güç

Bobinde akım gerilime göre 90° geride kalır.

$$v_L = V_L \sin(\omega t),$$

$$i_L = -I_L \cos(\omega t) = -\frac{V_L}{\omega L} \cos(\omega t),$$

$$p = iv = -I_L V_L \cos(\omega t) \sin(\omega t) = -\frac{I_C V_C}{2} \sin(2\omega t)$$

Bu yüzden hem akımın hem gerilimin aynı işaretli olduğu sıralar bobin devreden güç alır ($p > 0$), ancak daha sonra akım ile gerilimin farklı işarette olduğu sürelerde aldığı gücü devreye geri verir ($p < 0$). Sonuçta bir periyod boyunca çekilen gücün ortalaması sıfır olur.

Devrenin güç analizinde kondansatör ve bobinlerin reaktif güçü de hesaplanır.

$$Q_L = V_L I_L = V_L^2 / X_L \text{ ve } Q_C = V_C I_C = V_C^2 / X_C$$

9.3.5 Empedans ve reaktans ilişkisi

Bir elemanın empedansı fazor uzayındaki $V = I Z$ bağıntısıyla tanımlandık. Empedans fazoru $Z = Z \angle \phi$ bir vektördür, polar gösterimde genliği ve açısı vardır. Kartezyen gösterimde empedans fazoru $Z = R + Xj$ olarak gerçek **direnç** R ve sanal **reaktans** Xj bileşeniyle gösterilir.

Kondansatör ve bobinlerde gerçek direnç bileşen olmadığından bu elemanların empedansları yalnızca reaktans ve faz açısından oluşur.

$$Z_C = X_C \angle \frac{\pi}{2} = X_C j \text{ ve } Z_L = X_L \angle -\frac{\pi}{2} = -X_L j.$$

9.4 Eşdeğer empedans ve AA seri RC ve RL devreler

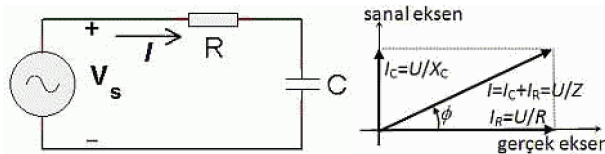
Aynı seri dirençlerin eşdeğer direnci gibi seri empedansların toplamı eşdeğer empedansı verir.

$$Z_E = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_N.$$

Bu özellik seri RC ve RL devrelerinin AC analizini kolaylaştırır. Örneğin Şekil 9.4.1'deki RC devrede eşdeğer empedansı hesaplayalım

$$Z_R = R; Z_C = -jX_C;$$

$$Z_E = Z_R + Z_C = R - jX_C = \sqrt{R^2 + X_C^2} \angle -\arctan \frac{X_C}{R}$$



Şekil 9.4.1: Seri RC devre ve empedans fazoru

9.4.1 Seri RC devre

Kapasitansı C olan bir kondansatör ile R direnci seri bağlı olarak RMS gerilimi V_s olan AA gerilim kaynağına bağlanınca devreden geçen akım fazoru

$$I = \frac{V_s}{Z_E} = \frac{V_s \angle 0}{\sqrt{R^2 + X_C^2} \angle -\arctan \frac{X_C}{R}}$$

akımın tepe değeri

$$I = \frac{V_s}{Z_E} = \frac{V_s}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \text{ ve akımdaki faz kayması}$$

$$\phi = \arctan \frac{X_C}{R} \text{ olarak bulunur.}$$

Akımı bulduktan sonra direnç ve kondansatör üzerindeki tepe gerilimleri kolayca hesaplarız.

$$V_R = I R = \frac{V_s R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}};$$

$$V_C = I X_C = \frac{V_s X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

Direnç gerilim kaynağından güç çekerken kondansatör de reaktif güç üretecektir.

$$P = I^2 R = \frac{V_s^2}{R^2 + X_C^2} R ; \text{ ve}$$

$$Q = I^2 X_C = \frac{V_s^2}{R^2 + X_C^2} X_C .$$

Örnek 9.4. 240V 50Hz AA gerilimle beslenen seri RC devrede 1k direnç ile 10μF kondansatör varsa

- devreden geçen akım ve
- devrenin harcadığı güç ile reaktif gücü hesaplayalım.

Çözüm:

$$a) X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{628 \times 0.000010} = 160\Omega$$

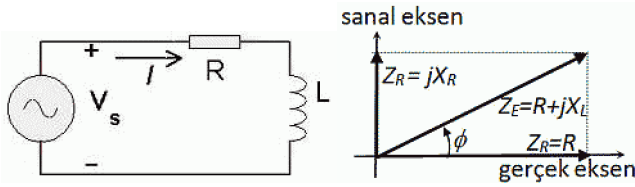
$$Z_T = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{1000000 + 25600} = 1013\Omega$$

$$I_{RMS} = V_{RMS}/Z_T = 240/1013 = 0.236A$$

$$b) P = I_{RMS}^2 R = 55W; Q = I_{RMS}^2 X_L = 8.8VAR \text{ harcanıyor.}$$

9.4.2 Seri RL devre

Bir RL seri devresinin analizinde de aynı yol izlenir.



Şekil 9.4.2: Seri RL devre ve empedans fazoru

Toplam empedans $Z_E = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ kullanılarak akımın RMS değeri I bulunur.

$$I = \frac{V_s}{Z_E} = \frac{V_s}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

Akımdan sonra direnç ve endüktörün üzerindeki gerilim genliğini hesaplarız.

$$V_R = I R = \frac{V_s R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}};$$

$$V_L = I X_L = \frac{V_s X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

Direnç gerilim kaynağından güç çekerken bobin de reaktif güç çekecektir.

$$P = I^2 R = \frac{V_s^2}{R^2 + X_L^2} R ; \text{ ve}$$

$$Q = I^2 X_L = \frac{V_s^2}{R^2 + X_L^2} X_L .$$

Örnek 9.5. AA 240V RMS 50Hz gerilim kaynağıyla etiket değeri 24V–0.1A olan bir ampul yakmak için

- kullanılacak seri kondansatörün kapasitansı ne olmalıdır?
- devrenin reaktif gücü ne kadardır?

Çözüm:

a) 240V RMS gerilimde 0.1 A akım geçmesi için seri devrenin eşdeğer empedansı

$$Z_E = 240/0.1 = 2400\Omega \text{ olmalıdır.}$$

Oysa ampülün direnci

$$R = 24/0.1 = 240\Omega \text{ dur. Kullanılacak kapasitif reaktans}$$

$$2400 = \sqrt{240^2 + X_C^2} \text{ eşitliğini sağlamalıdır. Böylece}$$

$X_C = \sqrt{2400^2 + 240^2} = 2388 \Omega$ elde edilir. Kondansatörün reaktansı

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \text{ olduğundan } C = \frac{1}{2\pi f X_C} = 1.333 \mu F \text{ bulunur.}$$

$$b) Q = I^2 X_C = 0.01 \cdot 2388 = 23.88 \text{ VAr bulunur.}$$

Örnek 9.6. AA 240V 50Hz gerilimle beslenen seri RL devrede 1k direnç ile 255mH Bobin varsa

- devreden geçen akım ve
- devrenin harcadığı güç ile reaktif gücü hesaplayalım.

Çözüm:

$$a) X_C = 2\pi f L = 628 \times 0.255 = 160 \Omega$$

$$Z_T = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{1000000 + 25600} = 1013 \Omega$$

$$I_{RMS} = V_{RMS} / Z_T = 240 / 1013 = 0.236 A$$

$$b) P = I_{RMS}^2 R = 55 W; Q = I_{RMS}^2 X_L = 8.8 \text{ VAR harcanıyor.}$$

Örnek 9.7. AA 240V RMS 50Hz gerilim kaynağıyla etiket değeri 80V-0.5A olan bir floresan barını kullanabilmek için

- kullanılacak seri balast bobininin endüktansı ne olmalıdır?
- devrenin reaktif gücü ne kadardır?

Çözüm:

a) 240V RMS gerilimde 0.5 A akım geçmesi için seri devrenin eşdeğer empedansı

$$Z_E = 240 / 0.5 = 480 \Omega \text{ olmalıdır.}$$

Oysa floresan barın direnci

$$R = 80 / 0.5 = 160 \Omega \text{ dur. Kullanılacak kapasitif reaktans}$$

$$480 = \sqrt{160^2 + X_L^2} \text{ eşitliğini sağlamalıdır. Böylece}$$

$$X_L = \sqrt{480^2 + 160^2} = 452 \Omega \text{ elde edilir. Balastın reaktansı}$$

$$X_L = 2\pi 50 L \text{ olduğundan } L = \frac{452}{314} = 1.44 \text{ H bulunur.}$$

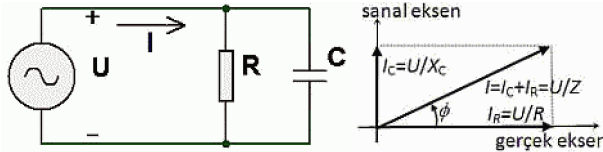
b) $P = I V = 0.5 \times 80 = 40 W$; $Q = I^2 X_L = 0.25 \cdot 452 = 113 \text{ VAr}$ çekiliyor. Reaktif güç gerçekte yükte harcanmasa da akımın artmasına neden olarak güç iletim hattının direncinde enerji kayıplarını arttırdığından kayıplara karşılık ücretlendirilir. Asenkron motor ve floresan lambalardaki bu tipik güç kaybı kondansatörlerle reaktif güç üreterek önlenir.

9.5 AA kaynaklı paralel RC ve RL devreler

Paralel devreler her koldan geçen akım bulunarak çözümlenir.

9.5.1 Paralel RC devre

RC devrede AA gerilim kaynağından gelen akım I , devredeki R ve C kollarına I_R ve I_C olarak şekil 9.5.1deki gibi bölünür.



Şekil 9.5.1: AC gerilime paralel RC devre ve akım fazorları

Ancak kondansatör akımı I_C , direnç akımı I_R a göre $\frac{\pi}{2}$ önden gider. Kapasitörün reaktansı $X_C = 1/\omega C$ fazor uzayında sanal eksenin zıddı $-j$ yönündedir.

$$U = I_R R = I_C X_C = I_C X_C \angle -\frac{\pi}{2}$$

$$I_R = \frac{U}{R}, I_C = \frac{U}{X_C}, \text{ ve ikisinin fazor toplamından oluşan akım}$$

$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$ eder. Buradan da paralel R ve C için eşdeğer empedans

$$Z_E = \frac{U}{I} = U / \sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_C}\right)^2}$$

$$Z_E = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_C^2}}} = \frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \text{ yada diğer bir gösterimle}$$

$$\frac{1}{Z_E^2} = \frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_C^2} \text{ ve } \frac{1}{Z_E} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_C^2}} \text{ eder.}$$

Devrenin faz açısı ve güç katsayısı vektör diyagramından hesaplanabilir.

$$\tan \phi = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R}{U/X_C} = \frac{X_C}{R},$$

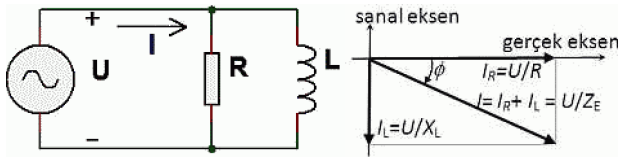
$$\cos \phi = \frac{I}{I_R} = \frac{U/R}{U/Z_E} = \frac{Z_E}{R}$$

Kondansatörün empedans fazoru sanal eksenin zıddı yönünde negatif, ve akımın faz açısı pozitif olduğundan kondansatör devrede reaktif güç üretir.

Hesaplamada admittans kullanılırsa kondansatörün admittansı $1/X_C = B_C$ ve direncin admittansı $1/R = G$ kullanılarak $Y_E = \sqrt{G + B_C}$ yazılırsa devrede $I = U Y$ olur.

9.5.2 Paralel RL devre

RC devrenin benzeri olarak RL devre de kollarındaki akımlardan başlayarak çözümlenir. Z_E doğrudan R ve $X_L = 2\pi f L$ değerlerinden de hesaplanır.



Şekil 9.5.2: AC Gerilime paralel RL devre ve akım fazorları

$$I_R = \frac{U}{R}, I_L = \frac{U}{X_L}, \text{ ve ikisinin fazor toplamından oluşan akım}$$

$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$ eder. Buradan da paralel R ve L için eşdeğer empedans

$$\frac{1}{Z_E} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}$$

Ancak bu kez bobin akımının faz açısı $\frac{\pi}{2}$ geriden gider ve negatif faz açısı nedeniyle devre reaktif güç tüketir.

Örnek 9.8. Şekil 9.5.1deki devrede $R = 80\Omega$ ve $X_C = 60\Omega$, $U = 240V$ RMS verilirse devre gerilimi ile açısı arasındaki faz farkını ve devrede tüketilen gücü hesaplayınız.

Çözüm:

$$I_R = U/R = 240/80 = 3A \text{ RMS},$$

$$I_C = U/X_C = 240/60 = 4A \text{ RMS}$$

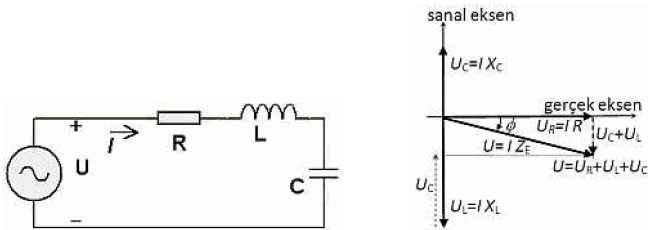
$$I = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 A \text{ RMS}$$

Akım gerilime göre $\arctan \frac{60}{80} = 36.87^\circ$ derece önden gidiyor.

Devrede tüketilen güç $P = 3^2 80 = 720 \text{ W}$; üretilen reaktif güç $Q = 4^2 60 = 960 \text{ VAR}$. bulunur.

9.5.3 Seri RLC devre

Şekil 9.5.3deki devrede bir AA gerilim kaynağı, R direnci L bobini ve C kondansatörü aynı akım geçecek şekilde seri bağlıdır.



Şekil 9.5.3: Seri RLC devre ve gerilimlerin fazoru

Devre seri bağlı RC ve RL devrelerin çözümlenmesinde olduğu gibi KVL kullanılarak çözümlenir. Üçünden de geçen akım aynı fazda olacağından bu akıma göre bobinin üzerindeki gerilim 90° gecikirken kondansatörün üzerindeki gerilim 90° önden gider. Devrede $X_L = 2\pi f L$ ve $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ olur. Ancak gerilimin fazını doğru bulabilmek için fazor empedansları $Z_R = R$, $Z_L = jX_L$, ve $Z_C = -jX_C$ kullanılmalıdır.

Elemanların üzerindeki voltajın genliği $U_R = IR$, $U_L = IX_L$ ve $U_C = IX_C$; fakat U_L ile U_C sanal ekseninde tam zıt yönlerde olduğundan fazor diyagramda görüldüğü gibi toplam etkileri genliklerinin farkları kadar olur. Devrenin toplam empedans fazoru

$I = U/Z_E$, denliğini sağlamak üzere

$Z_E = R + jX_C - jX_L = Z_E \angle \phi$, olacağından

$Z_E = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$ bulunur.

Seri RLC devrelerde X_L ve X_C reaktanslarının büyük olanı devredeki akımın faz açısını gösteren ϕ açısının işaretini belirler.

$$\phi = \arctan\left(\frac{X_C - X_L}{R}\right).$$

Negatif çıkan aç ı akımın fazının gerilime göre geciktiğini gösterir.

9.6 Seri RLC devrede seri rezonans

Seri AA devrede kapasitif reaktans $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ ile endüktif reaktans $X_L = 2\pi f L$ toplamda birbirinin etkisini azaltır. Frekans f değeri yükseldikçe X_C düşer, X_L yükselir. Frekans $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ olduğunda $X_C = X_L$ olur ve devre akımı I en yüksek değere ulaşır. Akımın yalnızca R ile sınırlandırıldığı bu duruma **seri rezonans** denir. Seri rezonans koşulunda LC üzerindeki toplam voltaj sıfır olsa da gerek V_L gerek V_C sıfır değildir.

Örnek 9.9. Şekil 9.5.3deki $U = 240V$, $R = 10\Omega$, $C = 1500 \mu F$ ve $L = 6.8 \text{ mH}$ veriliyor. Kaynak frekansı 1, 5, 10, 50, 100, 500 ve 1000 Hz olduğunda devreden geçen I akımını ve devredeki V_R , V_L , V_C gerilimlerini hesaplayalım.

Çözüm

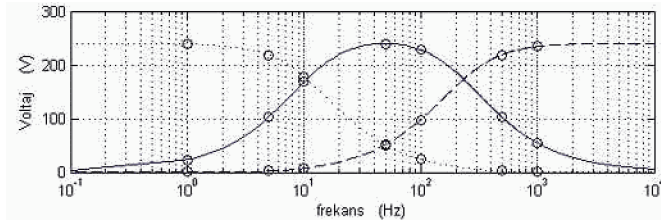
Her f değeri için $X_L = 2\pi f L$, $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$,

$$Z_E = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}, I = \frac{U}{Z_E},$$

$V_R = I R$, $V_C = I X_C$, $V_L = I X_L$ bulacağız

f	X_L	X_C	Z_E	I	V_R	V_L	V_C
1	0.043	106	106.5	2.25	22.5	0.096	239
5	0.214	21.2	23.3	10.3	103	2.20	218
10	0.427	10.6	14.3	16.8	168	7.19	178
50	2.14	2.12	10.0	24	240	51.3	50.9
100	4.27	1.06	10.5	22.8	229	97.6	24.2
500	21.4	0.212	23.4	10.3	103	219	2.18
1000	42.7	0.106	43.8	5.48	54.8	234	0.582

Yarılogaritmik grafikte noktalı çizgi V_C , düz V_R , ve kesikli çizgi de V_L gerilimidir. Tablodaki değerler daireyle işaretlidir. Görüldüğü gibi $f_r = 50 \text{ Hz}$ de V_R en yüksek değerine ulaş ıyor ve diğ er frekanslarda devre V_R ın yükselmesine izin vermiyor.



Şekil 9.6.1: Seri RLC devresinde voltajların frekansa bağlı yarılogaritmik grafiği

9.6.1 Rezonansta kalite faktörü

Kalite faktörü $Q_{LC} = \frac{X_L}{R}$ rezonans devresinin frekans seçiciliğini belirler. Q değeri bilinen bir devrenin frekans seçiciliği de X_L frekansa bağlı olduğundan rezonans frekansına (f_r) bağlı olarak değişir. Bir seri rezonans devresinin geçirdiği frekans bant genişliği rezonans frekansıyla doğru, kalite faktörüyle ters orantılıdır.

$$BW = \frac{f_r}{Q}$$

Örnek 9.10. Bir kısa dalga verici anten devresinde 5 MHz frekansta 50kHz bant genişliği seçicilik gerekiyor. Kullanılan anten bobininin direnci 0.2 ohm olduğuna göre 5MHz deki bobin empedansı ne kadar olmalıdır.

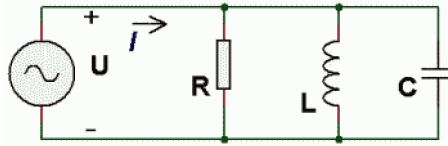
Çözüm

$$BW = 50000 = \frac{f_r}{Q} = \frac{f_r R}{X_L} = \frac{5000000 \times 0.2}{X_L} ;$$

$$X_L = \frac{0.2 \times 5000000}{50000} = 200\Omega$$

9.7 Paralel RLC devreleri

Şekilde görülen paralel RLC devre her koldaki akımların toplamından gerilim kaynağı akımını bularak çözülür. Ancak bobin akımını 90° geciktirirken kondansatör akımını 90° ileriden akıtır.



Şekil 9.7.1: Paralel RLC rezonans devresi (paralel tank)

$$I = \frac{U}{R} + \frac{U}{jX_L} + \frac{U}{-jX_C} = U\left(\frac{1}{R} + j\frac{X_L - X_C}{X_L X_C}\right) \text{ olur. Buradan}$$

$$Z_E = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\frac{X_L - X_C}{X_L X_C}} = \frac{RX_L X_C}{X_L X_C + jR(X_L - X_C)} \text{ bulunur.}$$

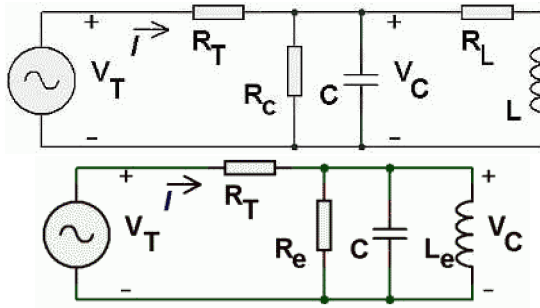
Paralel RLC devre frekansa bağlı olarak endüktif ya da kapasitif davranır. Ancak $X_L = X_C$ olduğunda devredeki LC üzerinden hiç akım geçmez, ve yalnızca R üzerinden geçen akım nedeniyle $I = U/R$ kadar olur.

Devre seri RLC devrelerine benzer şekilde $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ olduğunda $X_L = X_C$ eşitliğinin gerçekleşmesiyle paralel rezonansa girer. Rezonans frekansında $Z_E = R$ olduğundan akım en yüksek değeri olan $I = U/R$ değerine erişir. Rezonans frekansından uzaklaştıkça Z_E sifıra yaklaştığından çekilen akım artar.

9.8 Seri-paralel RLC devreleri

Uygulamadaki paralel RLC devreler devrenin geri kalan bölümünü temsil eden bir Tevenin eşdeğerine bağlanmış bir kondansatör ve bir paralel bobinden oluşur. Gerçek bir bobinin iletkeni de mükemmel iletken olmadığından bobine seri nisbeten düşük değerli ancak yok varsayılamayacak bir direnç oluşturur. Benzer şekilde gerçek bir kondansatörün mükemmel olmayan yalıtkanı kondansatöre paralel bir direnç oluşturur. Devrenin çıkış gerilimi V_C dir.

Bir seri $L - R_L$ devresinin eşdeğer paralel $L - R_L$ devresi $R_{Le} = R_L(Q^2 + 1)$, ve $L_e = L + L/Q^2$ den oluşur. Bu eşdeğer devre kullanılarak devre C , $R_e = \frac{R_C R_{Le}}{R_C + R_{Le}}$ ve $L_e = L + L/Q^2$ den oluşan paralel RLC devresine dönüşür. Genellikle Q birden kat



Şekil 9.8.1: Seri paralel RLC rezonans devresi ve eşdeğeri

kat büyük olduğundan L/Q^2 ihmal edilecek derecede küçüktür. Örneğin $Q = 10$ iken $L_e = 1.01L$ kadardır.

Devrede $R_e L_e C$ grubunun empedansı

$$Z_E = \frac{R_e X_{L_e} X_C}{X_{L_e} X_C + j R_e (X_{L_e} - X_C)} \text{ ve}$$

çıkış geriliminin fazoru ise

$$V_C = V_T \frac{Z_E}{R_T + Z_E} \text{ olur.}$$

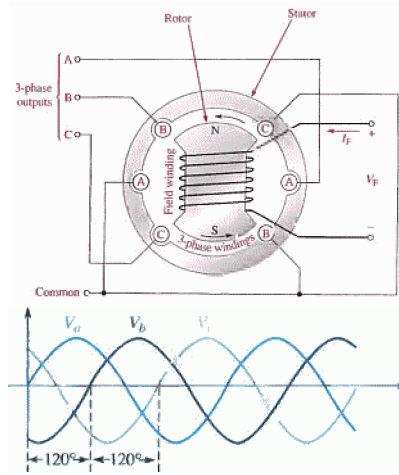
Devre $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e C}} = \frac{\sqrt{1 - (R_L^2 C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}}$ olduğunda $X_{L_e} = X_C$ eşitliğinin gerçekleşmesiyle paralel rezonansa girer. Rezonans frekansında $Z_E = R_e$ olduğundan çıkış gerilimi en yüksek değeri olan $V_C = V_T \frac{R_e}{R_T + R_e}$ değerine erişir. Rezonans frekansından uzaklaştıkça Z_E sifıra yaklaştığından çıkış gerilimi de sifıra yaklaşır.

9.9 Üç fazlı güç

Güç iletimi ve dağıtımında AA gerilimin kullanılması pratikte dağıtılan gücün gerilime ve akıma göre iki kat frekansta sifıra kadar inip tekrar maksimum değerine çıkmasına neden olur. Bu da jeneratör ve motorlarda istenmeyen titreşim ve erken yorulmaya yol açar.

Aynı AC jeneratör statoruna bir sargı yerine 120° açıyla duran üç sargı yerleştirilirse jeneratörden birbirinden 120° faz farkına sahip *birinci*, *ikinci* ve *üçüncü* faz olarak adlandırılan üç ayrı gerilim elde edilir. Bu üç gerilim aynı ortak noktaya göre üretilir ve ortak

nokta *toprak*, *nötr*, ya da *nötral hat* olarak adlandırılır. Fazların ortak noktaya göre gerilimine faz-nötr gerilimi, Y-gerilimi veya yıldız gerilimi denir ve V_Y ile gösterilir.

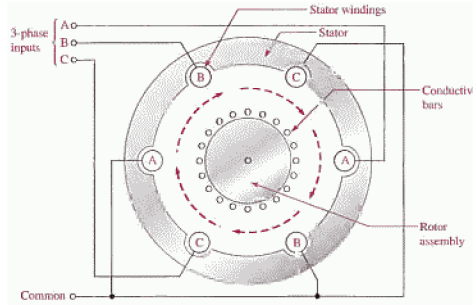


Şekil 9.9.1: Üç faz stator sargılı jeneratör ve çıkış gerilimleri

Bu üç gerilimin kullanılabileceği motorların da statorunda üç sargı bulunur. Ancak rotorları genellikle **sincap kafesli** tiptedir.⁶ Sincap kafesin görevi tek sarımlık bir bobin oluşturarak statorun oluşturduğu döner manyetik alan içinde üzerinde endüklenen gerilim nedeniyle rotorda sabit bir manyetik alan yaratmaktır. Rotorun manyetik alanı ile statorun döner manyetik alanı arasındaki itme ve çekme kuvvetleri rotoru statorun manyetik alanının hızına yakın bir hızda döndürür. Bu asenkron⁷ motor uygulanan gerilimin frekansından daha hızlı dönmeye zorlanırsa bu kez stator sargılarında gerilim endükleyerek jeneratör olarak çalışmaya başlar. Böylece örneğin bir asansörün asenkron motoru kabini yükseltmek için motor olarak çalışırken alçaltmak için jeneratör olarak çalışır.

⁶squirrel cage

⁷asynchronous



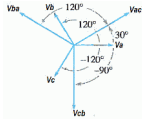
Şekil 9.9.2: Sincap kafesli üç faz asenkron motor.

3-faz sistem iletilen güç başına daha az akım kullanır.

Tek fazlı bir güç aktarım devresinde $U = V_Y$ gerilimi R direncine uygulandığında iki iletken üzerinden geçen $I = U/R$ akımıyla $P = UI$ kadar güç transferi gerçekleşir. Kısaca akım başına $U/2$ kadar güç iletilmiş olur. Üç fazlı devrede üç gerilime de R yükü bağlıysa geçen akımlar $I_1 = U/R \angle 0^\circ$; $I_2 = U/R \angle 120^\circ$; $I_3 = U/R \angle -120^\circ$ akımlarının toplamını döndüren ortak hattan $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ akım geçeceğinden $P = UI$ başına geçen akım yalnızca I olur ve akım başına U kadar güç iletilir.

3-faz sistem sabit güç aktarır. Tek fazlı AA devrede 50Hz U tepe gerilimli kaynak R yüküne $p = \frac{U^2}{R} \sin^2 \omega t = \frac{U^2}{2R} (1 - \cos 2\omega t)$ gücünü aktarır. Ortalaması $\frac{U^2}{2R}$ olsa bile aktarılan güç saniyede 100 kere sıfıra düşüp U^2/R a çıkar. Güç üç fazlı devrenin her fazında saniyede 100 kere düşüp yükselse bile üçü 120° açıyla birbirini tamamlar ve üç fazın ortalaması her an $P = 3U_{RMS}^2/R$ kalır. Bu özellik 3-fazlı devredeki yüksek güçlü motorların verimsiz çalışmasını ve geç yorulmasını sağlar.

3-fazlı devrede Üçgen ve Yıldız bağlantı: 3-fazlı devrelerde yükleri faz ile nötr arasına düşük ve fazdan faza yükseğe gerilime bağlama seçeneği vardır. Fazdan faza gerilimlere üçgen gerilimi de denir ve V_Δ ile gösterilir. Faz-nötr gerilimlerin vektörel farkından $V_\Delta = \sqrt{3}V_Y$ elde edilir.



Faz-nötr gerilimleri $V_a = V_Y \angle 0^\circ$, $V_b = V_Y \angle 120^\circ$, $V_c = V_Y \angle -120^\circ$ ise dengeli yüklü durumda fazdan faza gerilimler $V_{ba} = V_\Delta \angle 150^\circ$, $V_{ac} = V_\Delta \angle 150^\circ$ ve $V_{cb} = V_\Delta \angle -90^\circ$ olur. Böylece daha fazla güç gerektiğinde R yükü faz-nötr bağlantıdan fazdan-faza bağlantıya alınarak gerilim $\sqrt{3}$ kez, güç ise 3 kez artar.

Üç-faz güç ölçümü: yüklerin dengeli olmadığı durumlarda doğru gücü okuyabilmek amacıyla her faza ayrı güç-ölçer bağlanarak üç güç-metresi ile ya da özel bir bağlantı biçimiyle iki güç metresiyle ölçülür.

Kısım III

Yarıiletken Devreler ve Analizi

Bölüm 10

Diyot Devreleri

En yaygın kullanılan yarı iletken kristallerden silisyum ve germanyum element tablosunda dördüncü grupta yer alır. Saf silisyum kristaline genellikle silikon denir. Oda sıcaklığında oldukça yüksek dirence sahip bu kristaller yüksek sıcaklıklarda metalleşerek iyi bir elektrik iletkenine dönüşür. Bu nedenle germanyum 70°C , silisyum ise 150°C üzerinde yarıiletken özelliklerini kaybetmeye başlar. Biz örneklerimizi elektronikte daha yaygın kullanılan silikon ile vereceğiz.

10.1 Yarıiletken Diyot

10.1.1 p ve n tipi madde

Dördüncü grup elementi olan silikon (Si) kristal yapısında komşu atomlarla dört kovalent bağ yaparak valens elektronlarını dört komşu atomla paylaşır. Kristal örgüsünde elektronunu kaybetmiş bir silikon atomu delik adı verilen artı yüklü bir yapı oluşturur.

Üçüncü grup elementi olan indium bor ve alüminyum, silikon kristallere eser miktarda katılırsa bu maddeler çevrelerindeki silisyum atomlarıyla dört kovalent bağ yaparlar ve yalnızca üç valens elektronuna sahip bu atomlar kovalent bağı tamamlamak üzere komşularından birinden bir elektron alırlar. Bu elektronları kristal örgüsündeki yerlerine bağlayarak çevrelerinde artı yüklü bir delik oluştururlar. Gerilim uygulandığında elektron eksikliği bulunan delik komşu atomdan elektron alarak dengelenirken komşu atomu delik haline getirir. Uygulanan gerilim bu yolla deliğin bir dalga gibi ilerlemesine ve böylece artı yükü iletmesine neden olur. Bu çeşit materyale *p*-tipi madde denir. *p*-tipi maddede iletkenlik **delik** adı verilen elektron boşluğunun ilerlemesiyle gerçekleşir.

Beşinci grup elementi olan antimon, arsenik, fosfor gibi elementler silisyum kristaline eser miktarda katılırsa, benzer şekilde dört kovalent bağ yapar ve artan fazla elektronlarını çevrelerindeki silisyum atomlarına vererek kristal örgüsünde hareketsiz artı yük oluştururlar. Kristaldeki silikon atomlarına bıraktıkları serbest elektronlar kristalde iletkenlik sağlar. İletkenliği serbest elektronların sağladığı bu çeşit kristal yapılara da *n*-tipi madde denir.

10.1.2 p-n bağlantı

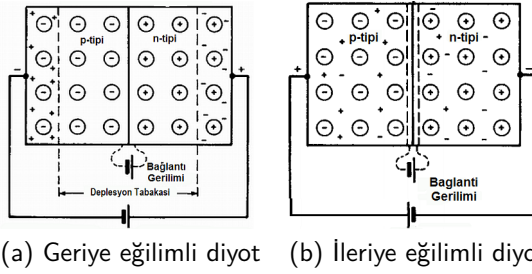
Aynı kristalin bir bölümü *p*-tipi ve buna bitişik bir bölümüyse *n*-tipi yapılırsa birindeki serbest deliklerle diğerindeki serbest elektronlar bağlantı noktasında bağlantı bariyer gerilimi denen bir potansiyel oluşturur. Akım iletirken silikon kristallerde 0.7V, germanyumlarda 0.25V civarında olan bu bağlantı gerilimi ters yönde bağlantının yapısına bağlı olarak 0.7 volttan binlerce volta kadar çıkabilir.

Gerilim kaynağının artı ucu *p*-tipi maddeye, eksi ucu *n*-tipine uygulandığında *p*-tarafındaki delikler eksi gerilim kutbuna doğru hareket ederken *n*-tarafındaki elektronlar artı kutba gider ve bağlantı noktası çevresinde yüklerin çok azaldığı bir deplesyon bölgesi oluşur. Bu durumda gerilim yüksek bile olsa bağlantı yalıtkan gibi davranır. *p-n* bağlantının bu şekilde çalışmasına **geriye eğilimli** çalışma denir. Ancak gerilim belli bir değeri aşarsa deplesyonda (yüksüz bölgede) rastgele oluşan elektronlar komşu atomları uyararak çığ etkisine neden olur ve diyotun yalıtkanlığı kırılır. Geriye eğilimli bu gerilime **geriye kırılma gerilimi** veya **Zener gerilimi** denir.

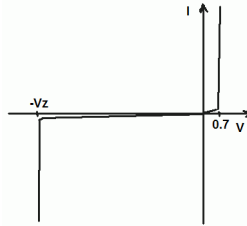
Gerilim kaynağının artı ucu *n*-tipi maddeye, eksi ucu *p*-tipine uygulandığındaysa *n*-tarafındaki elektronlar bağlantı gerilimini aşarsa *p*-maddeye geçerek bağlantının iletken gibi davranmasını sağlar. Bu şekilde çalışan *p-n* bağlantı **ileriye eğilimli** çalışıyor denir.

Edison lambayı bulduktan sonra 1883te vakumlanmış lamba şişesi içine yerleştirmiş bir flamandan çıkan elektronların bir metal plakaya gidebildiğini, ancak metal plakadan flamana gidemediğini keşfetti ve olayı Edison etkisi diye adlandırdı.

John Fleming (İngiliz) bu buluşu radyo dalgalarını elektrik sinyale dönüştür-



Şekil 10.1.1: Diyotta deplesyon bölgesi ve bariyer geriliminin oluşması



Şekil 10.1.2: Tipik silikon $p-n$ diyot karakteristiği. $-V_z$ geriye kırılma gerilimidir. İleri eğilimde bağlantı gerilimi 0.7 voltur.

mekte kullandığı flaman katodlu iki elemanlı vakum tübü diyotları geliştirmekte kullandı. Günümüzün diyotları Fleming tüpleriyle benzer prensiplerle çalışır.

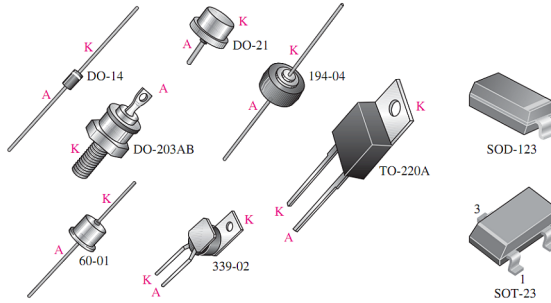
Russell Ohl Bell laboratuvarlarında 1940ta çalışırken ortası çatlak bir silikon örneğinin testi sırasında kazaen bir $p-n$ bağlantısı oluşturdu. Çatlağın iki tarafı ışığa tutulduğunda ohmmetrenin farklı sapması üzerine takım arkadaşları ile yarıiletkenler üzerine çalışmaya başlayıp 1947'de ilk transistörü buldular.

10.1.3 Diyot

Diyot özellikle akımın bir yöne geçmesine izin verip öbür yöne geçmesine engel olan devre elemanıdır ve genellikle $p-n$ bağlantı ile elde edilir. Devre sembolünde akımın geçebileceği yönü gösteren bir ok ve katodu sembolize eden bir bar bulunur.



Şekil 10.1.3: Diyot sembolleri



Şekil 10.1.4: Çeşitli diyot paketleri

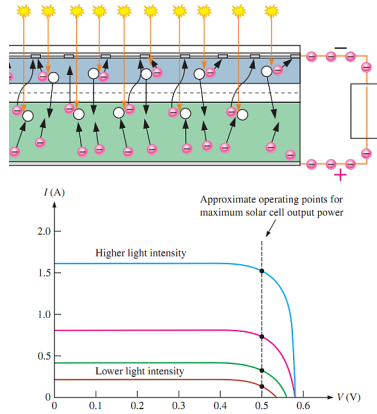
10.1.4 Zener Diyot

Yarıiletken diyot geriye eğilimli ve çıkış geriliminde çalışabilecek şekilde üretilirse geniş bir ters-akım aralığında üzerindeki voltaj hemen hemen sabit kalır. Bu koşullarda çalışmak üzere üretilmiş diyotlara Zener diyot denir. Zener diyotlar gerilimleri 0.8 ile 80 V arasında çeşitli voltaj ve güçlerde üretilir.

10.1.5 Fotovoltaik Diyot

Çok geniş $p-n$ bağlantı yüzeyli bir silikon kristaline düşen ışık demetindeki fotonlar valens elektronunun band aralığı enerjisinden daha yüksek enerjiye sahipse valens elektronunu serbest elektron enerji seviyesine yükseltir ve serbest elektron p -tipi deplezyon bölgesini serbestçe geçebilir. Böylece 1.2 eV enerji seviyesine karşılık gelecek kadar elektron n bölgeye geçerek bağlantının iki yanında 0.7 Volta kadar ulaşan gerilim oluşturur.

0.5V pratik uygulamalar için yetersiz kaldığından pek çok fotovoltaik hücre seri olarak bağlanarak gerilim 12, 24 veya 48 V gibi işlenmesi kolay seviyeye ulaştırılır. Bu şekilde oluşturulan ve dış etkilerden korumak üzere cam ya da plastik kaplamalarla donatılan elemanlara solar panel denir. Üzerine düşen ışık şiddeti ve



Şekil 10.1.5: Solar Panel seri bağlı fotovoltaik hücrelerden oluşur ve her hücre 0.5 V gerilim üretir.

çalışma sıcaklığına bağlı olarak v-i karakteristiği değişim gösterse de en yüksek enerji transferi yaklaşık 0.5V civarında gerçekleşir.

10.2 Diyot modelleri

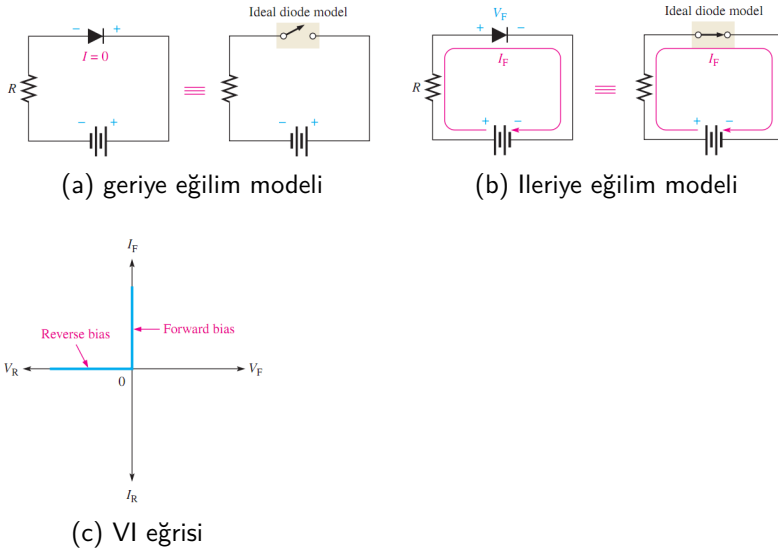
Diyodun çalıştırıldığı eğilim koşuluna bağlı olarak Diyot karakteristiğinin çeşitli bölgeleri önem kazanabilir.

10.2.1 İdeal Diyot Modeli:

Geriye kırılma voltajına kadarki geriye eğilim bölgesi ile akım iletiminin sağlandığı ileriye eğilim bölgesi bağlantı gerilimi ihmal edildiğinde diyot geriye akım geçirmeyen, ileriye akım geçirirken üstündeki gerilim sıfır olan bir anahtar ile modellenir. Bu modele *ideal diyot modeli* denir.

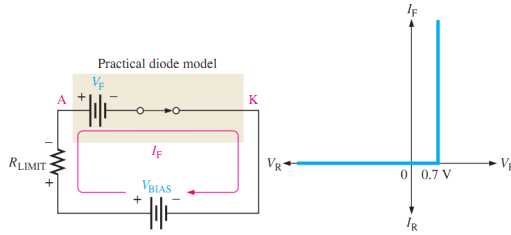
10.2.2 Geniş Sinyal Diyot Modeli

Silikon diyodun 0.7 V luk bağlantı gerilimini yok sayan ideal diyot modeli pratikteki devrelerin çoğunu çözümlemeye yetersiz kalır. Pratikte büyük gerilim oynamaları olan devreleri çözümlemekte



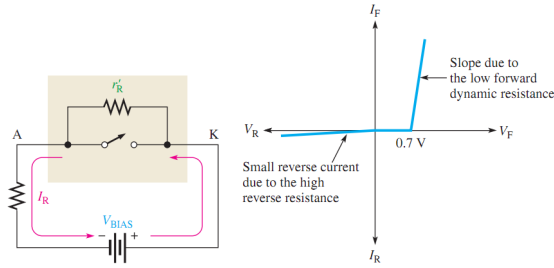
Şekil 10.2.1: İdeal Diyot modeli

yaygın kullanılan silikon diyot modeli ideal diyot modeline seri 0.7 V gerilim bağlanarak elde edilir.



10.2.3 Tam Diyot Modeli

Geniş sinyal modelindeki?i geriye eğilimli bölgenin kaçak akımını bir direnç ile tanımlamak oluşturulan parçalı doğrusal modeli bütün çalışma aralığında tamamlar.



Şekil 10.2.3: Tam diyot modeli

10.3 Diyotlar ve Gerilim Doğrultma

Diyotlar ters gerilimde açık düz gerilimde kapalı anahtar olarak çalıştığından AA gerilimin doğrultulması gibi işlerde yaygın olarak kullanılır. Tipik bir DA gerilim kaynağı şu birimlerden oluşur.

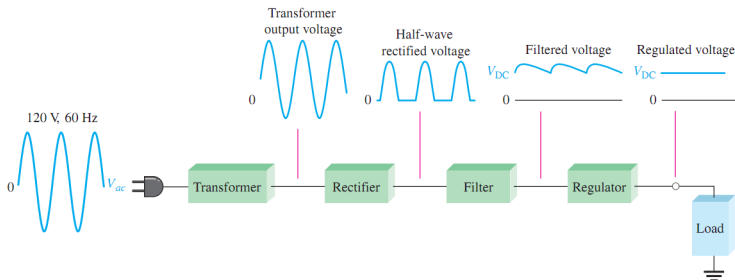
Şebeke gücü: Evlerimize ve işyerlerine dağıtılan prizlerden alabileceğimiz 230V AA 50Hz elektriktir.

Trafo: Şebeke gerilimini istenen AA gerilime düşürmek için gerekir.

Doğrultucu: AA gerilimin eksiye inen bölgesini geçirmeyen ya da artıya dönüştürerek geçiren diyot devresidir.

Süzücü: Doğrultucudan çıkan ve V_p ile 0V arasında sürekli değişen DA gerilimi kondansatör ve bobin gibi enerji depolayan elemanlar aracılığıyla kabul edilebilir aralıkta değişir hale getirir.

Düzeltilici: Süzücünden çıkan gerilimi hassas elektronik aletleri de çalıştırabilecek kadar sabit değerde tutan devredir.



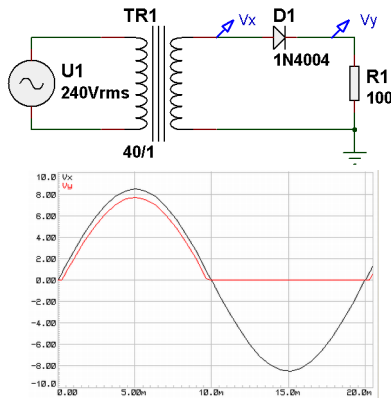
Hem artı hem eksi yönde olabilen giriş geriliminin eksi yönde

Şekil 10.3.1: Güç kaynağının ana birimleri

olanını geçirmeyen yada eksi yöndekini artı yöne dönüştüren devrelere *doğrultucu devreler* denir.

10.3.1 Trafo ve yarım dalga doğrultucu

Yarım dalga doğrultucu devre AA gerilim kaynağına seri yerleştirilen bir diyot ve bir yük ile elde edilir.



Şekil 10.3.2: Yarım dalga doğrultucu

Örnek 10.1. Şekil 10.3.2deki devrede 240Vrms 50Hz AA gerilim 40:1 sarım oranlı bir trafo ile tepe voltajı $V_p = \sqrt{2} \times 240/40 = 8.46V$ olan trafo çıkış gerilimi V_x e dönüştürülüyor.

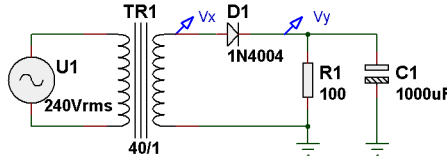
R_1 yükü üzerindeki V_y gerilimi (kırmızı) U_1 kaynağının 8.46V tepe değerli V_x gerilimini (siyah) pozitif yarı periyotta diyodun $V_F = 0.7V$ ileriye bağlantı bariyer gerilimi nedeniyle yaklaşık 0.7V geriden takip etmektedir. Ancak, negatif yarı periyotta diyot geriye eğilimli bölgeye girdiğinden anahtar devreyi keser ve yalıtkan olur. Bu nedenle R_1 üzerindeki gerilim sıfıra düşer. Yük üzerindeki gerilim eksiye geçmez ve yarı periyod boyunca 0V kalır. Doğrultulmuş gerilimin ortalaması $V_{ort} = V_p/2\pi = 0.637V_p$ ve kırıltısı¹

¹ripple

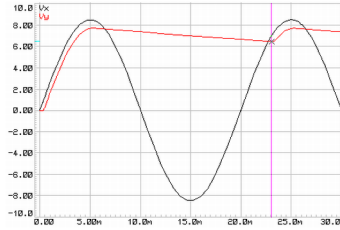
$V_{kırpır} = V_p - 0 = V_p$ kadardır.

10.3.2 Kondansatorlü süzücü devre

Bu kırırtıyı azaltmak için Şekil 10.3.3deki gibi yüke paralel $1000\mu\text{F}$ lık süzücü bir kondansatör bağlayalım.



(a) Yüke paralel süzücü kondansatör



(b) Süzücü kondansatörlü devrenin çıkış dalga biçimi

Şekil 10.3.3: Kırırtının kondansatörle süzülmesi

Pozitif tepe gerilimi geride kalınca diyot gerilimi negatifleştigi için devreyi açar. Tam bu sırada bağlantı gerilimini kullanan modele göre kondansatörün $V_y = 8.46 - 0.7$ yüklenmiş olmasını bekliyoruz. Gerçek devre ölçümleri gerilimin 7.76V olduğunu gösteriyor. Bu andan itibaren, diyot tekrar iletme geçinceye dek yük devresi yük direnciyle paralel kondansatörden oluşmaktadır. Kondansatör gerilimi $\tau = R_1 C_1 = 100\text{ms}$ zaman sabitiyle 7.76 volttan 0 volta doğru üstel olarak $V_y = 7.76 e^{-t/\tau}$ ile azalır.

Örnek 10.2. Kondansatörün en fazla bir periyod deşarj olacağını biliyoruz. Periyod $T = 1/f = 20\text{ms}$ olduğuna göre gerilimdeki kırırtıyı zaman sabiti kullanarak hesaplayalım

Çözüm: Zaman sabiti $\tau = 100\Omega \times 1000\mu\text{F} = 100000\mu\text{s} = 100\text{ms}$ dir. $t/\tau = 20\text{ms}/100\text{ms} = 0.2$ olduğuna göre VC bu sürede ilk

değerinden son değerine doğru yaklaşık %20 değişerek $V_C = 7.76(1 - 0.2) = 6.21\text{V}$ a düşer. Gerçek devrede bu değeri 6.46V ölçüyoruz. Süzölmüş gerilimdeki kırpıntı $7.76 - 6.46 = 1.3\text{ V}$ olurken ortalama gerilim de $(7.76 + 6.46)/2 = 7.11\text{ V}$ kalıyor.

Örnek 10.3. Yükten geçen akım I_L hemen hemen sabit kalıyorsa kırpıntı gerilimini kabaca hesaplamak için $\Delta V_C = \frac{I_L \Delta t}{C}$ bağıntısını kullanabiliriz. V_C nin 7.7 Voltta hemen hemen sabit kaldığını varsayarsak R_1 den $T = 20\text{ms} = \Delta t$ boyunca geçen akımı $I_L = V_C/R_1 = 7.7/100 = 77\text{mA}$ buluruz ve kırpıntı gerilimi

$$\Delta V_{C.fark} = \frac{Q}{C} = \frac{77\text{mA} \times 20\text{ms}}{1000\mu\text{F}} = 1.44\text{V çıkar.}$$

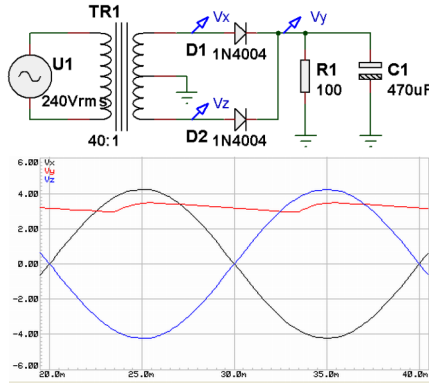
Bu kaba hesapta yaptığımız kırpıntı gerilim hatası $(1.44 - 1.3)/1.3 = 10\%$ civarındır.

10.3.3 Tam Dalga Doğrultucu

Eğer kondansatörün yalnızca pozitif yarım periyotlarda doldurulması yerine hem pozitif hem negatif tepelerde doldurulmasını sağlarsak tam dalga doğrultucu elde ederiz. pratikte bu amaçla kullanılan iki yol vardır.

Orta uçlu trafo ile tam doğrultma

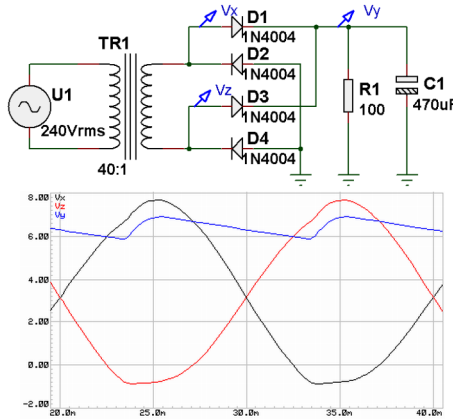
Orta uçlu bir trafo ile orta uç toprak olarak kullanılarak ters yönde iki AC voltaj elde edilir. Voltajlardan birine V_x öbürüne V_z dersek V_x tepe değerine vardığında V_z negatif tepe değerine varır. Yarım periyod sonra V_x negatif tepeye ulaştığında V_z tepe değerine gelir. İki diyot kullanarak hem V_x hem de V_z geriliminin her yarım periyotta bir yükü beslemesi sağlanırsa Şekil 10.3.4deki iki diyotlu tam doğrultma devresi oluşur. Devrede kondansatör her 20ms yerine her 10ms de bir tepe gerilimine dolacağından yarı yarıya küçük kapasiteli seçilebilir. $2 \times 6\text{ Vrms}$ gerilim üreten trafo ile V_x ve V_z gerilimlerinin tepe değeri $\sqrt{2} \times 6 = 8.49\text{V}$, V_y de beklediğimiz tepe değer ise $8.49 - 0.7 = 7.79\text{V}$ olacaktır. Devre üzerinde $V_{x.tepe} = 8.47$, $V_{y.tepe} = 7.71$ okuyoruz. $C_1 = 500\mu\text{F}$ kullanmamıza karşın V_y en düşük 6.54 V olmaktadır.



Şekil 10.3.4: Orta uçlu trafolu tam doğrultucu

Diyot köprüsüyle tam doğrultma

Trafo çıkışı orta uçlu değilse tam doğrultma için dört diyot kullanmak gerekir.



Şekil 10.3.5: Diyot köprülü tam doğrultucu

Devrede akım pozitif yarım periyotta D_1 ve D_4 üzerinden dolaşırken negatif yarım periyotta D_2 ve D_3 üzerinden dolaşır. Akım her an en az iki diyodu ileriye eğilimleyerek dolaştığı için tepe gerilimde $2 \times 0.7 \text{ V}$ düşme oluşur. Bu nedenle $U_{1,tepe} = 8.47$ olmasına karşın $V_{y,tepe} = 6.91 \text{ V}$ çıkar. Bu nedenle diyot köprüsü kullanılacaksa trafo çıkış gerilimi buna uygun seçilmelidir.

10.3.4 Zener diyotlu düzeltici

Bu devrenin kıpırtısı, en düşük 4.5V en yüksek 5.5V besleme gerilimi kullanan sayısal devreler için yeterince düşük değildir. Sabit gerilim ihtiyacı çok yüksek olduğundan bu ihtiyacı karşılayacak gerilim düzeltici² devreler üretilmektedir. 1N4733A gibi 5.1V luk bir Zener diyot Şekil 10.3.6deki gibi bir devrede gereken voltaj düzeltme işini görebilir.

Zener diyodunun geriye kırılma gerilimi geniş akım aralığında hemen hemen sabit kalır.

Tablo 10.3.1: 1N47xx Ailesinden bazı Zenerler

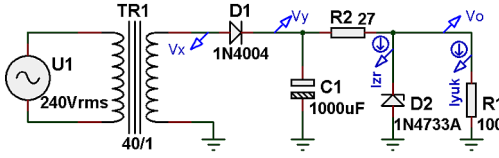
Zener	V_z V	I_z mA	R_z Ω	Zener	V_z (V)	I_z mA	R_z Ω
1N4728	3.3	76	10	1N4737	7.5	34	4
1N4729	3.6	69	10	1N4738	8.2	31	4.5
1N4730	3.9	64	9	1N4739	9.1	28	5
1N4731	4.3	58	9	1N4740	10	25	7
1N4732	4.7	53	8	1N4741	11	23	8
1N4733	5.1	49	7	1N4742	12	21	9
1N4734	5.6	45	5	1N4743	13	19	10
1N4735	6.2	41	2	1N4744	15	17	14
1N4736	6.8	37	3.5	1N4745	16	15.5	16

Örnek 10.4. Geriye eğilimli 1N4733A'nın 10mA geriye akım koşulunda direnci 7Ω civarındadır ve Tevenin eşdeğeri 5.1 V kaynak ile 7Ω dirençten oluşur. $1/4W$ etiket gücüyle 1N4733 en fazla 50mA geriye akıma dayanabilir. Düzeltici devresinde 27Ω dirençle sınırlandırdığımız akımı Zener diyodu geriye eğilimde tutmakta kullanırsak yük üzerindeki kıpırtıyı hesaplayalım.

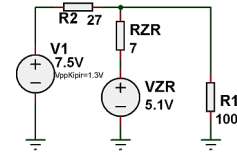
Çözüm: 1.3 Voltluk kıpırtı gerilimi Zener direnci üzerinde bölünerek

$$V_{kıpırtı} = 1.3 \frac{7//100}{27 + 7//100} = 1.3 \frac{6.54}{33.54} = 0.25V \text{ çıkış kıpırtısı oluşturur.}$$

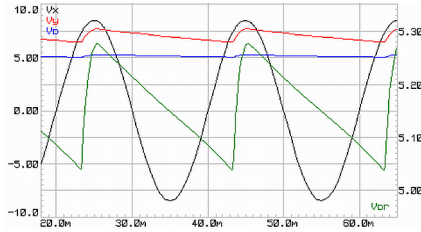
²regulator



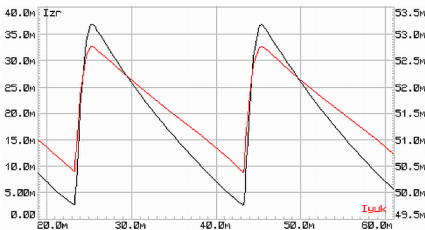
(a) Zener düzelticili güç devresi



(b) Geriye eğilimli Zener modeli



(c) Devredeki gerilimler



(d) Devredeki akımlar

Şekil 10.3.6: Zenerli düzeltici kırırtıyı 25mV a düşürür.

Zenerli düzeltici kullanıldığında 35mA ile 5mA arasında değişen Zener akımı ortalama $P_Z = (35 + 5)/2 \times 5.1 = 102\text{mW}$ güç çıkmasına neden olur. Zener bu güce dayanabilir. Ancak, herhangi bir nedenle yük devreden çıkarsa $I_{yük} = 5.1/100 = 51\text{mA}$ olan

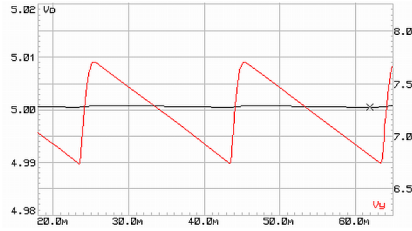
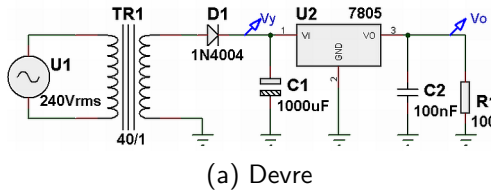
yük akımı da üzerinden geçecek olsa Zener fazla ısınarak bozulur. Zenerin gücünü takviye etmek için devrede transistör gibi daha değişik yarıiletken elemanlar gerekir. Yüke paralel bağlanan Zener ile oluşan bu çeşit düzelticilere paralel düzeltici denir.

Yük gerilimini yüke gelen akımın fazlasını topraklayarak sabit tutan paralel düzelticiler çok güç harcarlar. Yüke ulaşan akımı kısıtlayarak çalışan seri düzelticiler daha yüksek verimlidir ve daha yaygın kullanılırlar. Daha da yüksek güçler için anahtarlama düzelticiler kullanılır.

10.3.5 Yarıiletken entegre düzelticiler

Paralel biçimli Zener düzenleyici ancak birkaç mA den düşük akımlarda ve kararlı dayanak³ gerilimleri elde etmekte kullanılır. Pratikte en yaygın kullanılan düzenleyici elemanları 78xx serisi olarak tanıyan seri biçimli yarıiletken entegre regülatörlerdir. Çıkış gerilimleri 2V ile 25V arasında çeşitli değerlerde olan bu üç uçlu elemanların giriş gerilimlerinin çıkış geriliminden en az 2V en fazla 10V olması durumunda 0 ile 1A çıkış akımı için kırıltı gerilimi 50mV tan düşüktür. Örnek devremizi 7805 kullanarak Şekil 10.3.7deki gibi oluştururuz.

³reference



Şekil 10.3.7: Entegre Düzelteçli Güç Devresi

Devrenin girişindeki 1V kırıptının Zenerli devrede ölçtüğümüz 1.3V kırıptıdan düşük olmasının nedeni Zenerin düzeltmeyi ortalama 20mA akımı toprağa vererek yapmasına karşın regülasyonun yalnızca 4mA akımı toprağa bırakmasıdır. 50mA yük akımı için çıkış kırıptısı 1mV tan daha düşüktür. Devredeki en az $2.2\mu\text{F}$ değerinde olması gereken C_2 kondansatörü çıkış geriliminin osilasyona girmemesi için gereklidir.

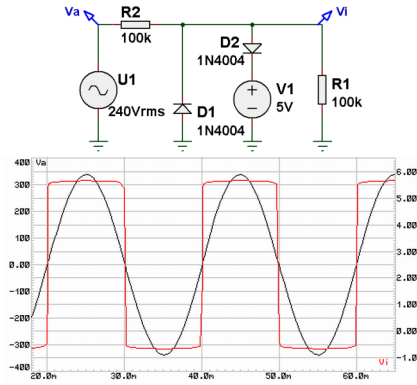
78xx ailesinin yanısıra çeşitli yaklaşımlara dayanan Entegre regülasyonlar da kullanılır. 5W tan yüksek güçlerde daha yüksek verimli anahtarlamalı güç kaynakları tercih edilir. Bilgisayar güç kaynaklarında da kullanılan anahtarlamalı düzelticiler giriş gerilimiyle üzerinden akım geçmesi sağlanan bir bobinin depoladığı enerjiyi bir yarıiletken anahtar düzeneği ile yüke aktararak çalışır. Devrede yalnızca anahtarlama yapan transistörler ya doyum, ya kesim, ya da anahtarlama geçiş bölgesinde güç harcadığından verim %95'in üstüne çıkar.

10.4 Voltaj Kırpıcı ve Katlayıcı Diyot Devreleri

Diyotlar sinyal biçimleme amacıyla voltaj kırpıcı olarak ta yaygın kullanım alanı bulurlar.

10.4.1 Diyotlu Voltaj Kırpıcılar

Elektronik sinyal işlemede sinyalin yalnızca bir bölgesiyle ilgileniyorsak ve diğer bölgeleri devremize zarar verebilecek özellikteyse sinyali alttan ve üstten kırparak istediğimiz değerler arasında sınırlandırırız. Bu işleme voltaj sınırlama, yapan devreye de kırpıcı devre adı verilir. Örneğin 240V AA gerilimin 1V u kesme noktasıyla ilgileniyorsak $V_A = 240$ V AA gerilimi bir direnç üzerinden devremizin girişine bağlayacağız. Devremiz 0-5V aralığında gerilimlere uygunsu gerilim dirençten gelen akımı $V_a > 5V$ olduğu bölgede $V_s = +5V$ kaynak gerilimine, $V_a < 0$ olduğu bölgede ise toprağa aktaracak bağlantıyı diyotlarla sağlayabiliriz.

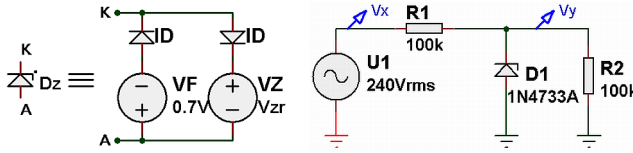


Şekil 10.4.1: Kırpıcı devre

10.4.2 Zener Diyotlu Kırpıcılar

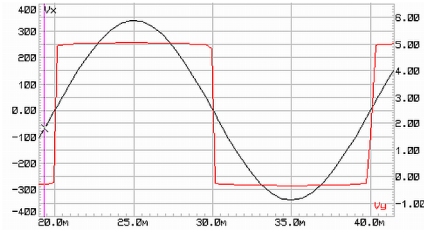
Bir Zener diyodun geriye kırılma gerilimi diyotların ileriye bariyer gerilimini modellediğimiz gibi bir ideal diyot ve bir gerilim kaynağıyla gösterilebilir. Örneğin 1N4733A'nın ideal Zener modeli aşağıdaki gibidir.

Zener ile oluşturulan kırpıcı devrelerde Zener gerilimi devremizde bulunmayan gerilim kaynağının yerini alabilir. Zenerin hem ileriye hem geriye eğilim gerilimlerini kullanarak Şekil 10.4.1'deki devreyi Şekil 10.4.2'deki gibi kurabiliriz.



(a) Zener Modeli

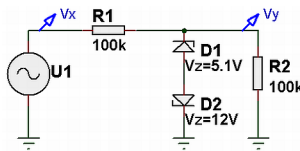
(b) Zenerli Kırpıcı



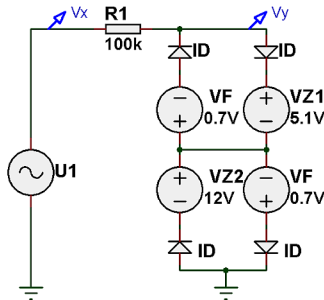
(c) Devredeki gerilimler

Şekil 10.4.2: Zener Modeli ve Zener Diyotlu Kırpıcı

Örnek 10.5. Aşağıdaki devre V_y çıkış gerilimini hangi değerler arasına sınırlar.



Çözüm: İki zenerin de Şekil 10.4.2deki modelle yeniden çizersek



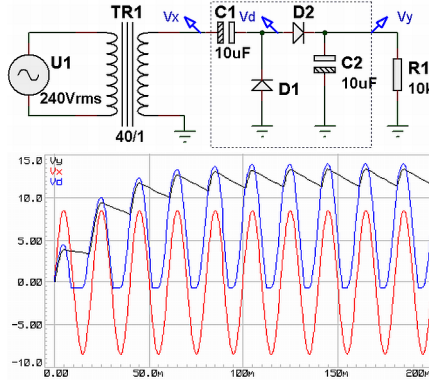
ileriye eğilimde $V_y = 5.1 + 0.7 = 5.8V$, geriye eğilimde $V_y = -12 - 0.7 = -12.7V$ elde ederiz. Devre U_1 gerilimini bu iki değer arasına sınırlar.

10.5 Voltaj katlayıcı diyot devresi

Voltaj katlayıcı devreler AA gerilimi iki veya daha fazla kata çıkararak doğrultur.

10.5.1 Yarım dalga katlayıcı

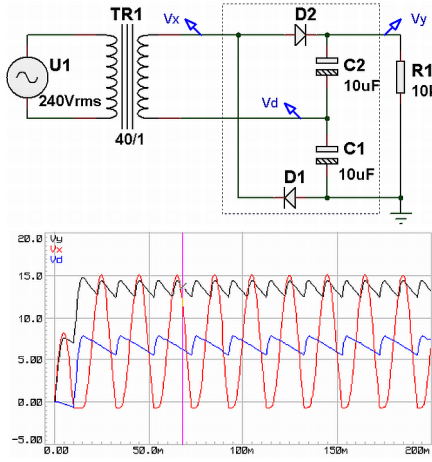
Yarım dalga katlayıcıda iki diyot ve iki kondansatör kullanılır. Negatif yarım periyotta birinci kondansatöre doldurulan gerilim pozitif yarım periyotta yükselen gerilime eklenerek çıkış süzgeci görevini üstlenen ikinci kondansatörüne aktarılır. Devrede D_2 diyodunun doğrulttuğu V_d gerilimi yeterince büyük kapasiteli C_1 kondansatörü nedeniyle V_x i takip eder, ancak V_x negatif tepedeyken C_1 tepe gerilimine şarj olduğundan ortalaması V_x in tepe değerine kayar. V_d yi doğrultan D_2 nin çıkışında tepe gerilimi $2 V_{x.tepe}$ ye ulaşır.



Şekil 10.5.1: Yarım dalga katlayıcı

10.5.2 Tam dalga katlayıcı

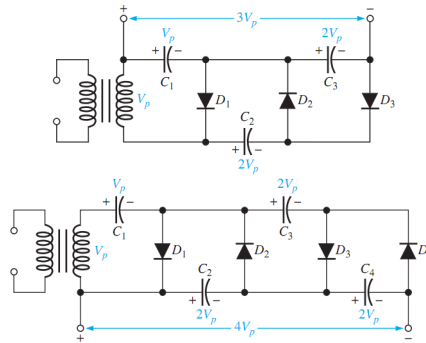
Farklı yarım periyodlarda doğrultma yapan iki yarım dalga doğrultucunun gerilimlerinin toplamı yarım dalga doğrultucunun iki katıdır ve tam dalga katlayıcı olarak adlandırılır.



Şekil 10.5.2: Tam dalga katlayıcı

10.5.3 Üçe ve dörde katlayıcı

Yüksek gerilim gereken yerlerde eldeki trafo geriliminin tepe değerini üçe ve dörde katlamak için kullanılır. Devre yarım dalga katlayıcısının ardışık bağlanmasıyla elde edilir.



Şekil 10.5.3: Üçe ve dörde katlayıcılar

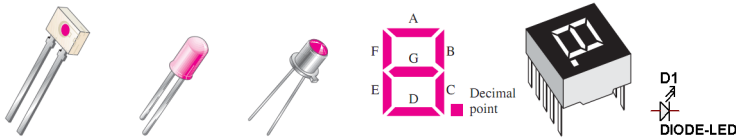
10.6 Özel Amaçlı Diyotlar

Özel amaçlı diyotlar arasında Zener diyotlar, fotovoltaiik diyotlar (güneş pilleri), varaktör diyotlar (değişken kapasitanslı diyot), ışık

salan diyotlar (LED), LASER diyotlar, Tunnel diyotlar en yaygın kullanılanlardır. Bunlardan Zener diyotları, varaktörleri ve foto-voltaik diyotları daha önce gördük. Burada kısaca LED ve LASER diyotları görelim.

10.6.1 LED Diyod

İleriye eğilim akımıyla ışık üreten bir eleman olan LED in devre sembolü aşağıdaki gibidir.

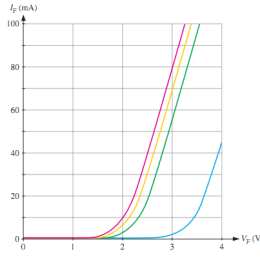


Şekil 10.6.1: LEDler ve LED sembolü

Bir p-n bağlantısından ileriye akım geçerse elektronların enerji seviyesi değiştirmesi nedeniyle elektroluminesans adı verilen bir olay gerçekleşir ve çıkan enerjinin bir bölümü foton olarak yayılır. LED diyotlarda fotonların enerji seviyesi gözle görülür ışık aralığında olduğundan ve ışık geçirebilecek biçimde paketleniğinden çıkan ışık görülebilir ve ışık üretmek amacıyla kullanılabilir.

LED diyotlar yıllar boyunca düşük verimleri ve sadece kırmızı yeşil ya da sarı renk ışıdamaları nedeniyle yalnızca gösterge ışığı amaçlı kullanılmış olmasına rağmen 90lı yıllarda geliştirilen süper-parlak⁴ LED teknolojisi mavi dahil her renk LED üretimine olanak verince aydınlatmada da yer almaya başlamıştır. İlk uygulamanın araç sektöründe olması özellikle olağanüstü uzun ömürlü olması ve titreşime dayanabilmesi nedeniyle gerçekleşmiştir. Günümüzde acil ışıklandırma ve trafik ışıkları gibi ışığın yönltilmesini gerektiren, çok güvenilir olması gereken, ısınma ve kıvılcım çıkarmaması gereken yerleri aydınlatmada özellikle tercih nedenidir. V-I karakteristikleri aşağıdaki gibidir.

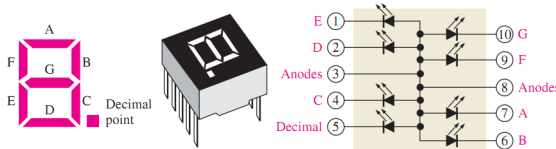
⁴superbright



Şekil 10.6.2: LED VI karakteristikleri

7-segment LED (7-parçalı sayısal LED) gösterge en yaygın sayısal gösterge biçimlerinden biridir. Yedi çubuk parça 8 oluşturacak şekilde bitleştirilmiştir. Elemanın uç sayısını azaltmak amacıyla LEDlerin ya anodları ya da katodları birleştirilir ve ortak-anod gösterge ya da ortak-katod gösterge adıyla bilinir.

Örnek 10.6. Şekil 10.6.3deki ortak anotlu kırmızı 7-seg gösterge segment başına 10mA akımla çalışıyor. 5V gerilim kaynağı kullanarak 5 yazmak için gereken devreyi çizelim.



Şekil 10.6.3: 7-Segment Sayısal Gösterge

Çözüm: 5 yazmak için A , C , D , F , ve G segmentleri yanmalıdır. Bunun için göstergenin 8.ucu +5V a bağlanmalıdır. Kırmızı LED için 10mA akımda $V_{d.ileri}=2V$ olduğuna göre akımı 10mA ile sınırlamak için devreye $(5 - 2)/0.010 = 300 \Omega$ seri direnç koymalıyız. Dirençlerin birer ucunu kaynağın eksi ucuna bağlayıp diğer uçlarını göstergenin 7, 4, 2, 9, 10 no.lu uçlarına bağlamalıyız.

10.6.2 LASER Diyod

LASER⁵ uyarılmış radyasyon yayılımıyla ışık güçlendirmesi anlamına gelen bir kısaltmadır. Monokromatik koherent, yani tek dalga boyunda

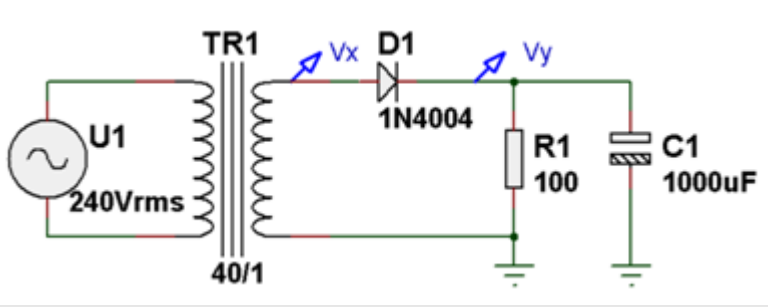
⁵light amplification by stimulated emission of radiation

düz hüzmeli ışık üretmekte kullanılır. Laser ile LED arasındaki temel farklardan biri Laserin p-n bağlantı düzlemine paralel oluşmasına karşın LED ışığının $p - n$ bağlantıda her yöne oluşması ve genellikle bağlantıya dik yöndeki bölümü LED yüzeyindeki mercekle yönlendirilmesidir.

Laser diyotlar özellikle ölçme sistemlerinde ve duyaçlarda yaygın olarak kullanılırlar.

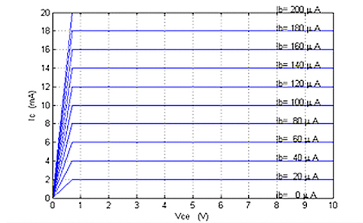
10.7 Problemler

Problem 10.1. Aşağıdaki devrede



a) Trafonun birincil sargısına 300V tepe gerilimi uygulanıyor. Trafonun sargı oranı 50:1 olduğuna göre çıkışındaki tepe gerilimi V_x kaç volttur.

b) Grafikte V_x gerilimi çizilmiştir.



C_1 kondansatörünün devreye bağlanmadığında oluşacak V_y gerilimini çiziniz ve tepe noktasındaki gerilimi hesaplayınız.

c) $C_1 = 1000 \mu F$ ve $R_1 = 100 \Omega$ olduğuna göre süzücü devrenin gerilim düşme zaman sabiti τ_{RC} kaç milisaniyedir?

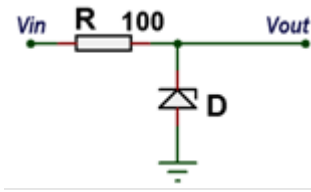
d) AA gerilimin frekansı 50Hz olduğuna göre bir periyodu T kaç saniyedir?

e) Kapasitör devredeyken yük direnci üzerindeki gerilimi yaklaşık $V_y = 5$ V sabit varsayarsak kondansatörü boşaltan sabit yük akımını hesaplayın.

f) Yük akımı $I_1 = 20$ mA sabit olsaydı V_y gerilimindeki kırırtı $\Delta V_y = i_1 T / C$ ile hesaplanabilir. Gerilimdeki kırırtı yaklaşık ne kadardır?

g) Eğer $T < 0.2 \tau_{RC}$ ise V_y gerilimindeki kırırtı yaklaşık $\Delta V_y = V_y(0) \frac{T}{\tau_{RC}}$ olarak hesaplanırsa kaç volt çıkıyor.

Problem 10.2. Bir sayısal devrenin giriş gerilimi -0.7 Volttan düşük, 5.5 Volttan yüksek olmamalı.



a) Girişinde aşağıdaki koruma devresi kullanılırsa D için en iyi seçenek aşağıdaki Zenerlerden hangisidir?

Zener	Vz (V)		Zener	Vz (V)
1N4728	3.3		1N4733	5.1
1N4729	3.6		1N4734	5.6
1N4730	3.9		1N4735	6.2
1N4731	4.3		1N4736	6.8
1N4732	4.7		1N4737	7.5

b) Seçtiğiniz diyotla en düşük ve en yüksek Vout gerilimi ne kadar olur?

Bölüm 11

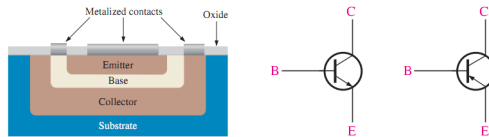
Transistörler

Burada konumuzu p - n - p ve n - p - n tip bipolar bağlantılı transistörlerle kısıtlı tutacağız.

11.1 Bipolar bağlantı transistörü

11.1.1 p - n - p ve n - p - n bağlantı

p - n - p bağlantı bir n -tipi baz¹ yarıiletkenin iki tarafına p -tipi yarıiletken oluşturarak elde edilir. Bir tarafındaki bağlantıya emiter²-baz bağlantısı, öbür tarafındakine kollektör³-baz bağlantısı denir. p - n - p bağlantı kristalleri biraraya getirerek, ya da tek bir kristal substrat üzerine önce p sonra n en son p tabakalar oluşturarak elde edilebilir.



Şekil 11.1.1: Planar epitaksiyel bipolar transistör yapısı ve sembolü. NPN transistörde ok emitere doğru, PNPde baza doğrudur.

p - n - p bağlantı gibi, ancak ortaya p -tipi bir baz kullanılarak oluşturulan bağlantıya p - n - p bağlantı denir.

p - n - p ya da n - p - n bağlantılar aracılığıyla oluşan üç uçlu elemana bipolar bağlantı transistörü⁴ denir ve BJT ile kısaltılır. Uçlardan

¹base (*taban* anlamına gelir)

²emitter (*yayaç* olarak ta kullanılır)

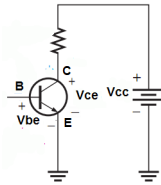
³collector (*toplaç* olarak ta kullanılır)

⁴bipolar junction transistor

yük yayacak olanı *emiter* (E), ortadaki baza bağlı olanı *baz* (B), yükleri toplayacak olanı ise *kollektör* (C) olarak adlandırılır.

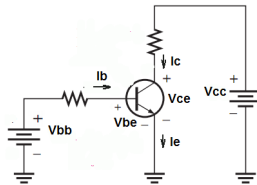
11.1.2 n-p-n Eğilimlendirme

$n-p-n$ BJT üç uçludur. Emiter E ve Kollektör C uçları n -tipi olduğundan akımı eksi yükler taşır. Baz B akımının E ile C arasında oluşacak akımı değiştirmesi beklenir. E ile C arasında akımın oluşması için E ucuna verilen eksi yükleri C ucundan toplamak gerekir. Bu amaçla gerilim kaynağımızın artısı C eksisi E ucuna bağlanır.



Şekil 11.1.2: Kollektor Emiter devresi

Geriye eğilimli durumda kalan BC bağlantısı nedeniyle V_{cc} gerilim kaynağıyla oluşan CE devresinde akım geçemez. Akımın geçebilmesi için p -tipi madde olan B de bir yolla eksi yük oluşturmak gerekir. Bu gerekli eksi yükleri BE bağlantısını ileriye eğilimlendirerek ya da bağlantıyı ışıkla uyararak sağlayabiliriz. Bu amaçla B ile E arasına B pozitif, E negatif olacak şekilde V_{be} gerilimi uygulayalım.



Şekil 11.1.3: Ortak Emiter Devresi

Çalışma prensibi

Devrede B , ve C ye giren akımları I_b , ve I_c ile E den çıkışı ise I_e ile gösterelim. V_{ce} gerilimi BE üzerinde oluşan $V_{be.ileri} = 0.7V$ ileriye bariyer geriliminden daha fazla olduğu sürece B ye giren eksi yüklerin çok büyük bir bölümü C ye ulaşır V_{cc} devresini tamamlayacaktır. Ancak E den B ye eksi yük girebilmesi için V_{be} gerilimini $0.7V$ a yükseltecek akımın B den geçmesi gerekecektir. Böylece $n-p-n$ yapısının sonucu I_c akımı I_b den defalarca daha büyük olur.

11.2 BJT parametreleri

Şimdi bu durumu bir de transistörün parametreleriyle açıklayalım. Transistörü bir düğüm olarak kabul edersek KCL gereği

$$I_e = I_b + I_c \text{ olur.}$$

11.2.1 Akım kazancı

Çalışma prensibinde belirlediğimiz gibi I_c akımı I_b akımına bağımlıdır. DA çalışma koşullarında ve düşük frekans aralığında I_c ile I_b arasındaki oranı DA akım kazancı olarak adlandırır, β_{DA} ya da h_{FE} ile gösteririz.

$$\beta_{DA} = h_{FE} = \frac{I_c}{I_b}$$

Yüksek güçlü transistörlerin akım kazancı 20 den bile düşük olmasına karşın düşük güçlü transistörlerin akım kazancı 400 e kadar çıkabilir. Biz örneklerimizde akım kazancını genellikle 50 ya da 100 kabul edeceğiz.

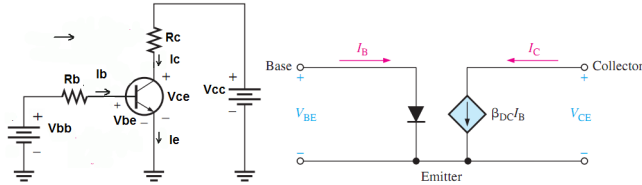
Benzer şekilde I_e ile I_c arasındaki oranı da α_{DA} ile gösterelim.

$$\alpha_{DA} = \frac{I_c}{I_e}$$

Düşük güçlü transistörlerin α_{DA} parametresi bire çok yakın olmasına karşılık $I_c = I_e - I_b$ olduğundan her zaman birden küçüktür. Örneklerimizde genellikle $\alpha_{DA} = 0.99$ kullanacağız.

11.2.2 Transistörün DA modeli

Transistörlerin en yaygın kullanıldığı ortak emiter konfigürasyonundaki ideal modeli BE bağlantısını bir diyot, CE bağlantısını ise $\beta_{DA}I_b$ değerinde I_b akımına bağımlı bir akım kaynağı olarak temsil eder.



Şekil 11.2.1: npn BJT ideal DA modeli

Modele konu olan devrenin tipik çözümlemesi için KCL, KVL, Ohm kanunu, ve akım kazancından yararlanılır.

$$I_c + I_b = I_e,$$

$$I_b R_b = V_{bb} - V_{be}, \Rightarrow I_b = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_b}$$

$$I_c = \beta_{DA} I_b,$$

$$V_{Rc} = I_c R_c = V_{cc} - V_{ce},$$

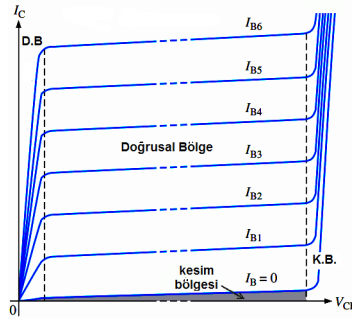
$$\Rightarrow V_{Rc} = \beta_{DA} \frac{R_c}{R_b} (V_{bb} - V_{be})$$

$$\Rightarrow V_{ce} = V_{cc} - \beta_{DA} \frac{R_c}{R_b} (V_{bb} - V_{be})$$

11.2.3 Kollektör karakteristik eğrileri

BJT akım kazancı az da olsa kollektör gerilimine bağlıdır ve bir dizi I_b akımı değerleri için V_{ce} ye karşılık I_c değerleri ölçülerek transistörün karakteristik davranışı Şekil deki gibi grafiğe aktarılabilir.

BJT karakteristik eğrilerinde I_c nin I_b ye bağlı olduğu bölgeye *doğrusal bölge*, V_{ce} nin çok düşük olması nedeniyle I_c nin $\beta_{DA}I_b$ den daha az olduğu bölgeye *doyum bölgesi*; V_{ce} çok yüksek olduğundan çıkış akımının başladığı bölgeye *kırılma bölgesi*; $I_b = 0$ olmasına rağmen I_c nin kollektör sızıntı akımı nedeniyle gözlemlendiği bölgeye de *kesim bölgesi* denir.



Şekil 11.2.2: Tipik BJT karakteristik eğrileri $I_{b1} < I_{b2} < I_{b3} \dots$ akım değerleri için bir dizi $I_c(V_{ce})$ eğrisinden oluşur. D.B: Doyum bölgesi, K.B.: Kırılma bölgesi

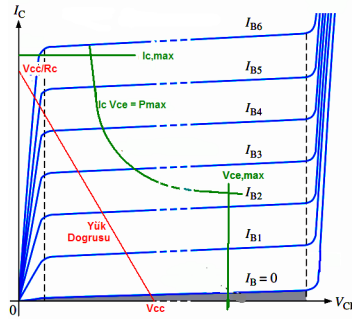
11.2.4 Emiter ortak DA yük doğrusu

V_{ce} gerilimi V_{cc} güç kaynağı ve R_c direncinin etkisiyle değişir. $I_c - V_{ce}$ düzleminde KVL : $I_c R_c = V_{cc} - V_{ce}$ bağıntısı bir doğru parçasıyla gösterilir. Yük doğrusunun $I_c = 0$ olduğunda V_{ce} eksenini kestiği nokta V_{cc} , $V_{ce} = 0$ olduğunda I_c eksenini kestiği nokta ise $I_{c0} = V_{cc}/R_c$ değeridir. BJT nin çalışma noktası her zaman bu yük doğrusunun üzerinde kalacaktır. Yük doğrusu üzerinde devrenin giriş gerilimi sıfır iken elde edilen çalışma noktasına dingin nokta⁵ adı verilir ve Q ile belirtilir. Giriş gerilimi değiştikçe devre yük doğrusu üzerinde Q noktası çevresinde kayarak çıkış gerilimini üretir.

BJT karakteristik eğri düzleminde çalışma alanı üç taraftan elemanın fiziksel özellikleriyle sınırlanır. BJT nin en yüksek akım değeri I_c nin üzerine çıkmaması gereken sınırı oluşturur. En yüksek gerilim değeri V_{ce} yi sınırlar. Bu iki sınırın yanısıra etiket gücü de $P = I_c V_{ce}$ çarpımını sınırlar.

Örnek 11.1. BJT transistör için $\beta_{DA} = 100$ veriliyor. Transistörün kırılma gerilimine ulaşmadığını ve $V_{ce} < 0.7V$ bölgesinde

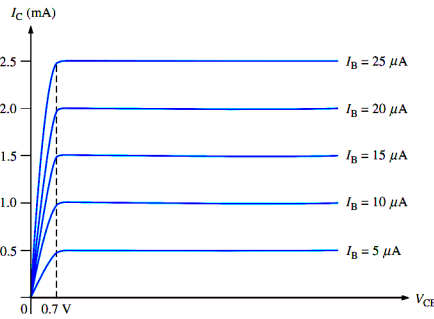
⁵quiescent point



Şekil 11.2.3: Yük doğrusu (kırmızı) ve çalışma bölgesi sınırları (yeşil).

doyuma ulaştığını varsayarak $I_b = 5, 10, 15, 20, 25\mu\text{A}$ değerleri için karakteristik eğrilerini çizim.

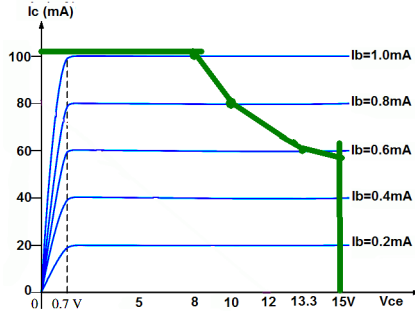
Çözüm: $I_b = 5, 10, 15, 20, 25\mu\text{A}$ değerlerini $\beta_{DA} = 100$ ile çarparak $I_c = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5\text{mA}$ değerlerini elde ederiz. Grafiğimiz aşağıdaki gibi olur.



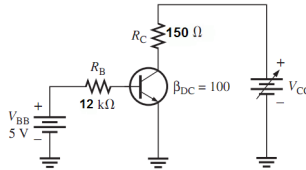
Örnek 11.2. BJT transistör için $P_{max} = 800\text{mW}$, $V_{ce,max} = 15\text{V}$, $I_{c,max} = 100\text{mA}$ $\beta_{DA} = 100$ veriliyor. Karakteristik eğrileri üzerinde çalışma bölgesini sınırlayın.

Çözüm: $\beta_{DA} = 100$ olduğuna göre $I_c = 100\text{mA}$ sınırına kadar 5 eğri çizmek için $I_b = \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\} \text{ mA}$ almalıyız. Karşılık gelen $I_c = \{20, 40, 60, 80, 100\} \text{ mA}$ olacaktır. Şimdi her bir I_c

değeri için 800mW sınırını veren V_{ce} gerilimlerini bulalım. $I_{c,1} = 20\text{mA}$ için $V_{ce,1} = 800/20 = 40\text{V}$; $V_{ce,2} = 800/40 = 20\text{mA}$; $V_{ce,3} = 800/60 = 13.3\text{mA}$; $V_{ce,4} = 800/80 = 10\text{mA}$; $V_{ce,5} = 800/100 = 8\text{mA}$ elde ederiz. Değerleri grafikte gösterirsek



Örnek 11.3. Önceki örnekte kullanılan transistör için aşağıdaki devrenin $V_{cc} = 12\text{V}$ alarak (a) yük eğrisini çizim. (b) Doyuma girmesi için I_b kaç olmalı? (c) çalışma noktasındaki I_c ne kadardır?



Çözüm: (a) $I_{max} = 12/150 = 0.08\text{A} = 80\text{mA}$. $V_{cc} = 12\text{V}$.

(b) Doyuma girmesi için $V_{ce} = 0.7\text{V}$.

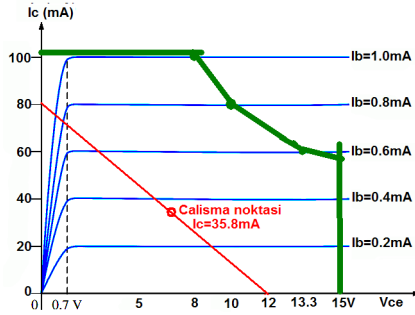
$$I_c = (V_{cc} - 0.7)/R_c = (12 - 0.7)/150 = 75.3\text{mA}.$$

$$I_b = I_c/100 = 0.753\text{mA}.$$

(c) Çalışma noktası için

$$I_b = (5 - 0.7)/12 = 0.358\text{mA}, \text{ ve } I_c = 100 \times 0.358 = 35.8\text{mA}.$$

Grafiğe koyarsak



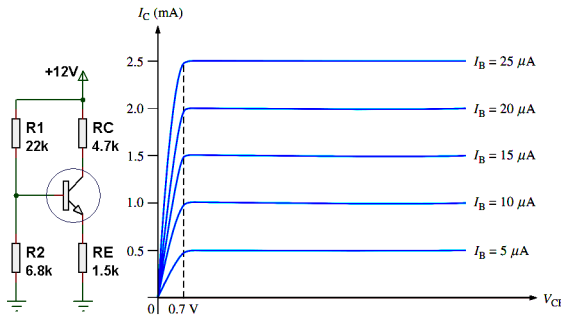
11.3 Yük doğrusunu kararlılaştırma ve gerilim kazancı

BJT nin β_{DA} değeri sıcaklıkla yaklaşık %50 oranında değişebilir. Bu değişimle devrenin giriş-çıkış karakteri de önemli derecede değişecektir. Sıcaklığın değişiminin devreyi etkilemesini önlemek için emiter kolu üzerine uygun bir R_e direnci yerleştiririz. Baza bağlı gerilim kaynağını da biri toprağa diğeri V_{cc} ye bağlı iki direncin Tevenin eşdeğerinden elde ederiz.

AA sinyallerin güçlendirilmesinde BJT devrelerin kullanımı yaygındır. BJT devrenin giriş tepe gerilimiyle çıkış tepe gerilimi arasındaki orana AA gerilim kazancı A_v denir.

$$A_v = \frac{V_{p,çıkıs}}{V_{p,giris}}$$

Örnek 11.4. Aşağıdaki devredeki BJT nin karakteristiği verilmiştir. Yük eğrisi ve Q noktasını bulalım.



Çözüm:

Transistörün çalışmasını yük eğrisi üzerine yansıtabiliriz. Bunun için yük doğrusunu bulacağız. $V_{cc} - V_{ce} = R_c I_c + R_e \alpha_{DA} I_c$, ve α_{DA} hemen hemen bire eşit olduğundan

$$V_{cc} - V_{ce} = (R_c + R_e) I_c ;$$

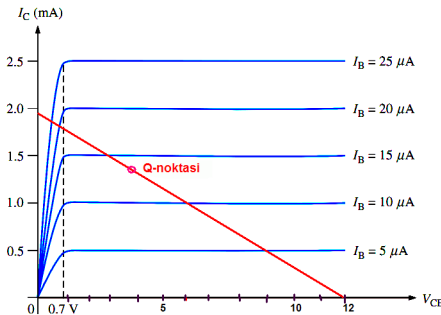
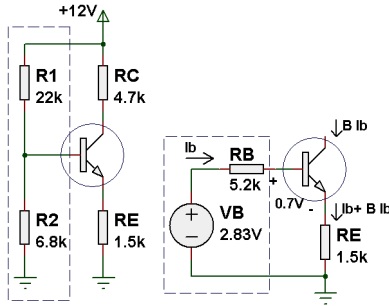
$$I_c = 0 \text{ olduğunda } V_{ce} = V_{cc} = 12V;$$

$$V_{ce} = 0 \text{ olduğunda } I_{c0} = V_{cc} / (R_c + R_e) = 12 / 6.2 = 1.935 \text{ mA}$$

Yük doğrusunu (I_c , V_{ce}) düzleminde (0, 12) den (1.935, 0) noktasına bir doğruyla gösteririz.

Q noktasını bulmamız için baz devresinin Tevenin eşdeğerinin bulalım. Önce grafikten $\beta_{DA} = \frac{I_c}{I_b}$ değerini saptayalım. $I_b = 10\mu\text{A}$

için $I_c = 1\text{mA}$ okuduğumuza göre $\beta_{DA} = \frac{1}{0.1} = 100$ çıkar. Baz devresinde $V_{cc} = 12\text{V}$ gerilimine bağlı $22\text{k}\Omega$ ve $10\text{k}\Omega$ dirençlerden oluşan bir gerilim bölücü var. Bölücünün açık devre gerilimi $12 \times 6.8 / (22 + 6.8) = 2.83\text{V}$, direnci ise $22 / 6.8 = 5.2 \text{ k}\Omega$. Baz-emiter voltajı 0.7V ve R_e üzerindeki gerilim $V_e = (I_b + \beta_{DA} I_b) R_e$ ile baz-emiter devresinde KVL yazarsak:



$$I_b R_b + I_b(1 + \beta_{DA})R_e = V_b - 0.7$$

$$I_{bQ} = \frac{2.83 - 0.7}{5.2 + (100 + 1)1.5} = \frac{2.13}{5.2 + 151.5} = 0.0136\text{mA}$$

$$= 13.6\mu\text{A};$$

$$I_{cQ} = 100 \times 0.0136 = 1.36\text{mA}$$

Yük doğrusu üzerinde $I_{cQ} = 1.37\text{mA}$ noktasını Q -noktası olarak işaretleriz.

Yukarıdaki örnekten gözlediğimiz önemli bazı noktalar kullanarak Q -noktasının yaklaşık yerini kolaylıkla bulabiliriz.

1- $I_c \cong I_e$ olduğundan dolayı $V_{ce} = V_{cc} - I_c(R_c + R_e)$ yük doğrusunu belirler.

2- Bazdaki gerilim bölücü V_{cc} yi bölerek V_b yi belirler. $V_b = V_{cc} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$.

3- $R_b = R_1 // R_2 < \beta_{DA} R_e / 10$ sağlanıyorsa $V_e = R_e I_e$ ye göre çok küçük kalan $V_{Rb} = R_b I_b$ gerilimi ihmal edilebilir. Bu durumda $V_e = R_e I_c = V_b - 0.7$ olur. Q -noktasının I_c değeri

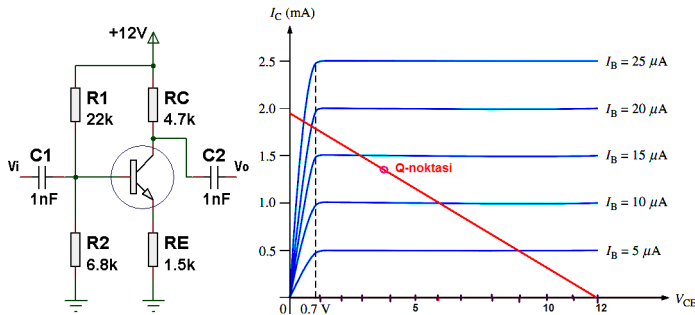
$$I_{cQ} = \frac{V_b - 0.7}{R_e} \text{ olur.}$$

Örnek 11.5. Aynı devredeki yük doğrusu ve yaklaşık Q noktasını ve devrenin gerilim kazancını bulalım.

Cözüm:

1- Yük doğrusunun eksenleri kesiği noktalar $V_{cc} = 12\text{V}$ ve

$$I_{c0} = \frac{V_{cc}}{R_c + R_e} = 12/6.2 = 1.935\text{mA}$$



$$2- V_b = V_{cc} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 2.83V,$$

$$3- I_{cQ} = \frac{V_b - 0.7}{R_e} = 2.13/1.5 = 1.42mA$$

Yaklaşık hesaplamada yaptığımız hata

$$\%E = 100 \times (1.42 - 1.37)/1.37 = \%3.6.$$

Çoğu uygulamada hatanın %10 sınırının altında kalması yeterlidir.

Devrenin yaklaşık gerilim kazancını V_b giriş voltajına karşı $V_c = I_c R_c$ çıkış voltajından hesaplayacağız. Yaklaşık hesapta $V_e = R_e I_c = V_b - 0.7$ varsayacağız.

Gerilim kazancını hesaplamak için $V_{i,tepe}$ geriliminin V_b ye ve V_c ye etkisini bulalım. Uygulanan $V_{i,tepe}$ gerilimi V_b gerilimini $V_{i,tepe}$ kadar arttırır. $V_{bt} = V_b + V_{b,tepe}$ gerilimini kullanarak $V_{et} = V_e + V_{e,tepe}$ ve $V_{ct} = V_c + V_{c,tepe}$ yi bulalım. Buradan $V_{o,tepe} = V_{ct} - V_c$ yi bulup $A_v = V_{\Delta c}/V_{\Delta b}$ yi hesaplayabiliriz.

$$V_{et} = V_e + V_{e,tepe} = (V_b + V_{b,tepe} - 0.7);$$

$$I_{ct} = V_{et}/R_e = (V_b + V_{b,tepe} - 0.7)/R_e;$$

$$\begin{aligned} V_{o,tepe} &= V_{ct} - V_c = I_{ct}R_c - I_cR_c \\ &= \frac{V_b + V_{b,tepe} - 0.7}{R_e} R_c - \frac{V_b - 0.7}{R_e} R_c = V_{b,tepe} \frac{R_c}{R_e} \end{aligned}$$

$$A_v = \frac{V_{o,tepe}}{V_{i,tepe}} = \frac{R_c}{R_e}$$

Örnekte çözümlediğimiz devrede gerilim kazancının transistörün özelliklerinden bağımsız ve yaklaşık R_c/R_e olduğunu görüyoruz. Birçok bipolar transistor katından oluşan devrelerde detaylı analiz yerine yaklaşık kazanç olarak $A_v = \frac{R_c}{R_e}$ kullanılır.

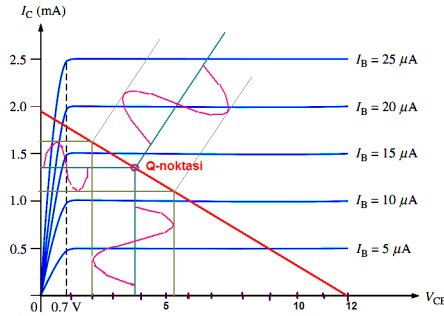
Elimizdeki devrenin giriş sinyalinin gücünü ne kadar arttırdığını bulalım. Bunun için maksimum çıkış gücünü giriş gücüne böleceğiz.

$$\text{Giriş gücü } P_i = \frac{V_i^2}{R_b}; \text{ Çıkış gücü } P_o = \frac{V_o^2}{4R_c}; \text{ Güç kazancı}$$

$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o^2/4R_c}{V_i^2/R_b} = A_v^2 \frac{R_b}{4R_c} = \frac{R_b R_c}{4R_e^2} \text{ kadardır.}$$

Gerilim kazancının yük doğrusu üzerinde gösterimi

Giriş geriliminin I_b akımında AA $5\mu A$ tepe akımlı değişim oluşturduğunu varsayalım. Bu değişim Şekil de görüldüğü gibi çalışma noktasının Q -noktasından yük doğrusu boyunca kaymasına neden olacaktır.



Şekil 11.3.1: Yük doğrusu üzerinde giriş ve çıkış sinyalleri

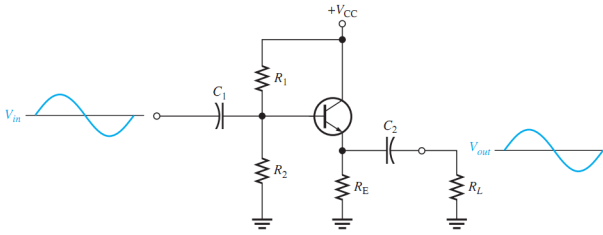
Değişimin I_c akımında yarattığı AA tepe akımı 0.5 mA olur. Gene aynı değişimle V_{ce} tepeden tepeye hemen hemen 1.6V değişir. Ancak V_{ce} gerilimi $R_c + R_e$ üzerinde bölünerek R_c üzerindeki bölümü çıkış gerilimini oluşturur. Bu şekilde elde edilen tek transistörlü yükselteç katının genel adı A-sınıfı yükselteç katıdır. A-sınıfı yükselteçler genellikle geniş bir frekans bandındaki sinyalleri ön yükseltme⁶ amacıyla kullanılır.

11.4 Sık kullanılan BJT devreleri

11.4.1 Emiter takipçi devresi

Güç kazancı bir sinyalin empedansını düşürerek te mümkündür. Emiter takipçi devresi gerilim kazancı tam bir olmasına karşın çok yüksek giriş ve çok düşük çıkış empedansı sayesinde sinyali güçlendirir.

⁶preamplification



Şekil 11.4.1: Emiter takipçi devresi

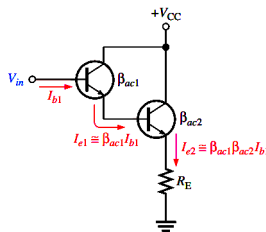
Devrenin gerilim kazancı $A_v = 1$ olmasına karşın çıkış empedansı R_e , giriş empedansı $R_1 // R_2$ olduğundan güç kazancı

$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o^2 / 4R_E}{V_i^2 / R_b} = A_v^2 \frac{R_b}{4R_c} = \frac{R_b}{4R_e} \text{ olur.}$$

11.4.2 Darlington katı

A-sınıfı yükselteç katında $R_b = R_1 // R_2 < \beta_{DA} R_e / 10$ koşulu nedeniyle çok yüksek giriş empedansı için çok yüksek β_{DA} değeri gerekir. İki transistörü Darlington bağlayarak β_{DA} değerlerini katlamak mümkündür. Darlington çiftin akım kazancı iki transistörün kazançlarının çarpımı kadardır.

$$\beta_{DA} = \beta_{DA1} \beta_{DA2} .$$



Şekil 11.4.2: Darlington transistör çifti

Örnek 11.6. 20A akımı anahtarlayan bir darlington katında ilk transistörün akım kazancı $\beta_{DA.1} = 100$, ikincinin akım kazancı

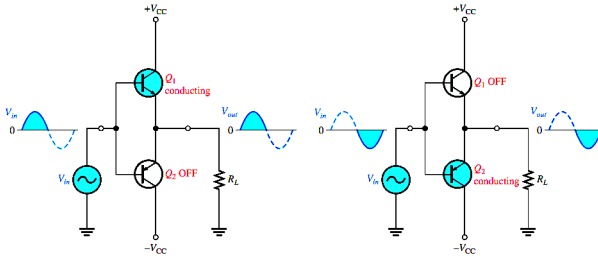
$\beta_{DA.2} = 20$, 20A kollektör akımında doyum voltajı $V_{CE.sat} = 1V$ olduğuna göre

- darlington katın toplam akım kazancı β_{DA} ne kadardır?
- transistör doyumda 20A geçirirken ne kadar güç harcar.

Çözüm: a) Akım kazancı $\beta_{DA} = \beta_{DA.1}\beta_{DA.2} = 20 \times 100 = 2000$,
b) Harcadığı güç $P = V_{CE.sat}I_C = 1V \times 20A = 20W$.

11.4.3 B-sınıfı yükselteç

Güçlendirici devrelerinin çıkış katları yükseltilecek bir giriş sinyali gelmediğinde boşa çekilen akımı azaltmak amacıyla genellikle pozitif ve negatif yarıperiyodu ayrı iki transistörün oluşturduğu özel bir emiter takipçisi devresi biçiminde yapılır. Bu devre biçimine de B-sınıfı ya da *push-pull*⁷ güçlendirici denir.



Şekil 11.4.3: B-sınıfı push-pull çıkış katı

11.4.4 C ve D sınıfı yükselteçler

C-sınıfı yükselteçler A-sınıfı gibi çalışan fakat frekans seçici rezonans devresiyle donatılmış AA yükselteç katlarıdır.

D-sınıfı yükselteçler ise çok yüksek güçlere ulaşabilmek için gerilimi yük süzgecine ya tam uygulayan ya da tümüyle kesen yüksek frekansta anahtarlama yapan çıkış transistörlerinden ve yük

⁷push-pull

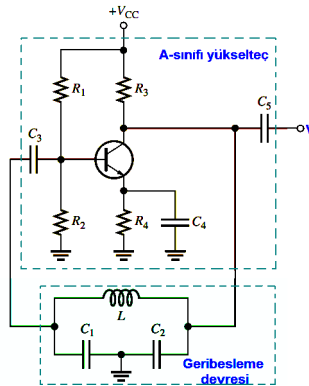
süzgeci adı verilen anahtarlama frekansını süzen rezonans devresinden oluşur. Bu yolla yüzlerce Watt gücünde ses frekansı yükselteçleri gerçekleştirilmek mümkündür.

11.4.5 Osilatör devreleri

A-sınıfı yükselteçler giriş geriliminin yönünü tersleyerek yükseltir. Gerilim kazancı birin üzerinde olan A-sınıfı bir yükselteç katının çıkış gerilimi 180° kaydırılarak girişe geri beslenirse faz kayması tam bir periyod olur ve devre kendi çıkışını tekrar tekrar yükselterek tekrarlamaya devam eder. Bu olaya osilasyon, devreye de geri beslemeli⁸ osilatör devresi denir.

Çeşitli standartlaşmış osilatör devrelerinden bazıları arasında Kolpit⁹ osilatör, Klap¹⁰ osilatör ve Hartley osilatör devrelerini sayabiliriz. Aşağıdaki Kolpit osilatörde yükselteç ve 180 derece faz kayması oluşturan geribesleme devreleri kesikli çizgiyle kutulanmıştır. Osilasyon frekansı Geribesleme devresinin rezonans frekansında

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}}, \quad C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \text{ gerçekleşir}$$



Şekil 11.4.4: Kolpit osilatör devresi

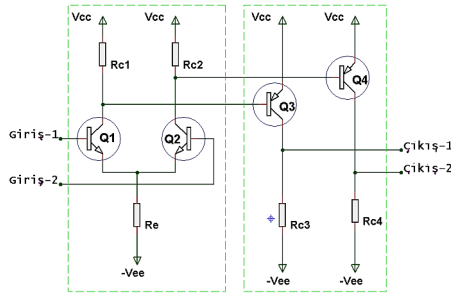
⁸feedback

⁹Colpitts

¹⁰Clapp

11.5 Farksal Yükselteçler

İki bipolar transistör emiterleri birbirine bağlanarak kullanılırsa bir *farksal yükselteç*¹¹ giriş katı oluşturur. Farksal giriş¹² katı Q1 ve Q2 nin bazlarındaki en ufak bir gerilim farkının yüzlerce kez yükseltmesini sağlar. Q3 ve Q4 ise voltaj yükseltmeyi onbinlere ulaştırırken çıkış geriliminin sınırlarını -Vee ve Vcc gerilimlerinin civarına kadar genişletir.



Şekil 11.5.1: Farksal giriş katlı donatım yükselteci

Farksal yükselteçlerin doğrusal çalıştıkları bölgede

$$V_{cıkıs1} = A_v(V_{giris1} - V_{giris2})$$

$$V_{cıkıs2} = A_v(V_{giris2} - V_{giris1}) \text{ olur.}$$

Bir farksal yükselteç, örneğin donatım¹³ yükselteci, karşılaştırmacı, toplayıcı, türev ve tümlev alıcı devreler oluşturmak için kullanılabilir. Farksal yükselteçlerin kullanımını ilerideki bölümde göreceğiz.

11.6 Diğer transistör çeşitleri

Bipolar transistörlerin dışında *alan etkili transistör*¹⁴ (FET) olarak adlandırılan geniş bir sınıf transistör çeşidi vardır. Alan etkili transistörler p- ya da n- tipi yarıiletkenlerden oluşan dar bir iletken kanalın elektrik alanı altında genişleyip daralması esasına bağlı olarak çalışır.

¹¹Differential Amplifier

¹²differential input

¹³instrumentation

¹⁴Field Effect Transistor

Kapı¹⁵ adı verilen elektrod aracılığıyla kanala uygulanan elektrik alanı değıştikçe kanal daralıp genişler ve kanal akımını değıştirir. Genel olarak FET ya p-kanallı ya da n-kanallı olabilir. Kapı elektrodu ise ya geriye eğilimli bir p-n bağlantıyla ya da kanalın üzerine oluşturulan yalıtkan silisyum oksit tabakasının üzeri metaleze edilerek elde edilir. Bu iki tasarım faktörüne bağlı olarak dört çeşit kombinasyon oluşur. Kapı elektrodu p-n bağlantıdan oluşan transistörlere bağlantı-FET (JFET)¹⁶ denir ve sembolünde kapı elektrodu diyot benzeri bir okla gösterilir. JFET ler kanal tipine göre p-JFET ya da n-JFET olarak adlandırılır. Silisyum oksit çok iyi bir yalıtkan ve dielektrik maddedir. Kapı elektrodu silisyum oksitle yalıtılıp metaleze edilmiş transistörlere metal-oksit-silikon FET (MOS-FET) denir.

MOS-FET in kanalı kapı gerilimiyle daralacak yönde tasarlanırsa bu tip transistörlere depleyasyon tipi MOS-FET (D-MOS-FET) denir ve sembolde kanal düz çizgiyle gösterilir. Aksine, kapı gerilimiyle genişleyecek yönde tasarlanırsa geliştirme tipi MOS-FET (E-MOS-FET)¹⁷ adı verilir ve sembolde kanal kesikli çizgiyle gösterilir. Sınıflandırmaya bu tasarım faktörünü de katarsak MOS-FET çeşitleri: p-E-MOS-FET, n-E-MOS-FET, p-D-MOS-FET ve n-D-MOS-FET olarak dörde çıkar.

MOS-FET devreler silikon üzerinde az yer kapladıkları ve çok az güç harcayarak çok yüksek hızlarda çalışabildikleri için özellikle sayısal devreler de ve anahtarlama devrelerinde başarıyla kullanılır. MOS-FET kullanarak A- B- C- D-sınıfı yükselteçler ve çok yüksek giriş empedanslı farksal yükselteçler oluşturulabilir. JFET olsun MOS-FET olsun transistör devreleri BJT benzeri çözümlenir. Ancak en büyük fark çözümlemede i_b akım yerine v_g gerilimine bağlı olarak çizilen $V_{DS} - I_S$ akım karakteristiğinin kullanılmasıdır.

11.7 Problemler

Problem 11.1. Aşağıdaki devrede

¹⁵gate

¹⁶Junction-FET

¹⁷enhancement-MOSFET

Bölüm 12

İşlemsel Yükselteç Devreleri ve Çözümlemesi

Transistör devreleri arasında tanıttığımız farksal yükselteçler yaygın olarak *işlemsel yükselteç*¹, kısaca *opamp*² adı altında analog entegreler olarak üretilir ve sinyal işleme amaçlı devrelerde kullanılır. Tipik özellikleri arasında nanoamperler seviyesinde düşük giriş akımına karşılık 50 mA i geçebilen en yüksek çıkış akımı, yüksek gerilim kazancı ($A_v > 10000$), ve böylesine yüksek gerilim kazancına rağmen 100kHz e varan frekans bantları sayılabilir. Bu bölümde işlemsel yükselteçlerle kurulan devreleri çözümleme yöntemlerini göreceğiz.

12.1 Ideal Opamp

Standard opampın Sembölü Şekil 12.1.1de görülmektedir. Yaygın kullanılan paketlenme biçimi aynı paket içinde bir, iki³, veya dört⁴ birim olan DIP⁵ ve SMT⁶ tipleridir.

İdeal opamp giriş empedansı açık devre varsayılacak derecede yüksek, çıkış empedansı ihmal edilecek derecede düşük, gerilim kazancı sonsuz varsayılacak derecede yüksek olan iki girişli bir çıkışlı bir devre elemanıdır. İdeal ve gerçek opampların bu dikkate değer parametreleri Şekil 12.1.2de görülmektedir. Günümüzdeki

¹operational amplifier

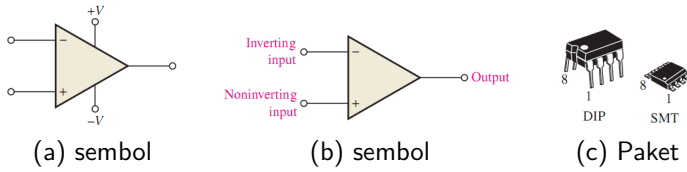
²operational amplifier

³dual

⁴quad

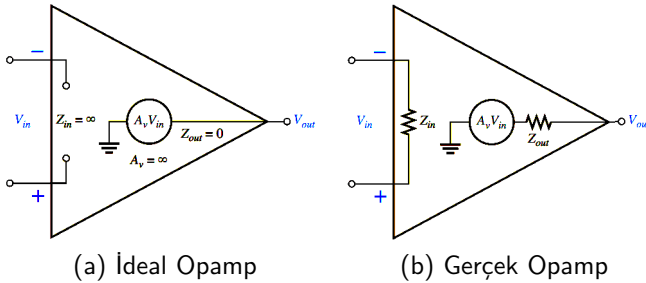
⁵dual inline package

⁶surface mount technology



Şekil 12.1.1: Opamp sembolleri ve Paketleri

gerçek opamplar genellikle farksal giriş katı, A-sınıfı güçlendirici ve buna bağlı B-sınıfı bir çıkış katından oluşur.



Şekil 12.1.2: İdeal ve Gerçek Opamp model parametreleri

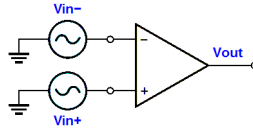
12.2 Giriş sinyal modları ve CMMR parametresi

12.2.1 Tek taraflı farksal mod

Opampın eksi-girişi ortak uca bağlandığında ortak uçla artı-girişi arasına verilen V_{in} giriş sinyali V_{out} çıkış ucunda doğrusal çalışma bölgesinde $V_{out} = -A_v V_m$ gerilimini oluşturur. Ancak A_v nin çok yüksek olması nedeniyle V_{out} çok dar olan doğrusal bölgeden hemen çıkarak ya $+V_{cc}$ ya da $-V_{ee}$ besleme gerilimi civarına ulaşır. Bu çalışma moduna *tek taraflı negatif farksal mod* denir. Benzer şekilde, eksi-giriş ortak uca bağliken artı-girişe verilen V_{in} doğrusal çalışma rejiminde çıkışta $V_{out} = A_v V_m$ gerilimini oluşturur. Bu çalışma moduna da *tek taraflı pozitif farksal mod* denir.

12.2.2 Çift taraflı farksal mod

Opampın eksi ve artı girişlerine ters yonde paylaştırılan V_{in} gerilimi çift taraflı farksal modu oluşturur. $V_{in} = (V_{in+} - V_{in-})$ eşit gerilimlerle paylaştırılarak sağlanırsa opampın çıkış geriliminin $V_{out:ol} = A_v(V_{in+} - V_{in-}) = A_v V_{in}$ çıkması beklenir. Yalnızca farksal mod denildiğinde kastedilen çift taraflı farksal moddur.



Şekil 12.2.1: Çift taraflı farksal mod

Çift taraflı farksal mod açık döngü gerilim kazancı⁷

$$A_{vol} = \frac{V_{out:ol}}{(V_{in+} - V_{in-})}$$

çıkış gerilimi V_{out} doğrusal bölgedeyken ve giriş ile çıkış arasında geri besleme yokken ölçülür.

12.2.3 Ortak mod

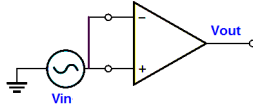
Opampın ortak çalışma modu CM^8 oluşması için Şekil 12.2.2deki gibi artı-giriş ile eksi-giriş birbirine bağlanır bu noktaya V_{in} gerilimi uygulanır. Bu durumda çıkıştan

$$V_{out:cm} = A_v(V_{in} - V_{in}) = 0 \text{ çıkması beklenir.}$$

Ortak mod gerilim kazancı $A_{vcm} = \frac{V_{out:cm}}{V_{in}}$ olarak ölçülür.

⁷open loop voltage gain

⁸common mode



Şekil 12.2.2: Ortak mod devresi

12.2.4 Ortak mod dışlama oranı

Ortak mod dışlama oranı⁹ ($CMMR$) opampın çift taraflı farksal mod açık döngü gerilimine göre ortak mod geriliminin oranıdır.

$$CMMR = \frac{V_{out.ol}}{V_{out.cm}} = \frac{A_{vol}}{A_{vcm}}$$

$CMMR$ genellikle desibel olarak ölçülür. Desibel dB ile kısaltılan bir logaritmik oran ölçüsüdür.

$$CMMR = 20 \log \frac{V_{out.ol}}{V_{out.cm}} = 20 \log \frac{A_{vol}}{A_{vcm}} \text{ dB}$$

Ortak modun dışlanması sayesinde her iki girişi aynı güçte etkileyen gürültü sinyalleri yükseltilmesi istenen giriş sinyaline göre $CMMR$ oranında bastırılmış olur. Tipik bir opampın $CMMR$ değeri $106 \text{ dB} = 200000$ civarındadır.

12.3 Opamp ile aritmetik işlemler

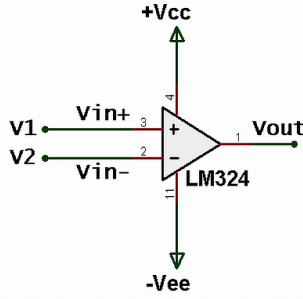
Opamp kullanılarak iki gerilimin karşılaştırılması, toplanması, birinin diğerinden çıkarılması, bir gerilimin integralini almak, türevini almak, istenen frekansta osilasyon, karedalga, üçgendalga gibi sinyaller üretmek mümkündür.

12.3.1 İki gerilimi karşılaştırmak

Eğer V_1 ve V_2 gerilimlerinin $V_1 > V_2$ olduğu anda çıkışta $+V_{cc}$, aksi takdirde çıkışta $-V_{ee}$ gerilimi elde etmek için V_1 gerilimini V_{in+} girişine, V_2 gerilimini V_{in-} girişine bağlamak yeterlidir.

V_{out} yalnızca $V_1 - V_{ee}/A_v < V_2 < V_1 + V_{cc}/A_v$ aralığında doğrusal bölgede çalışır. Devrede tipik olarak $V_{ee} = V_{cc} = 12V$

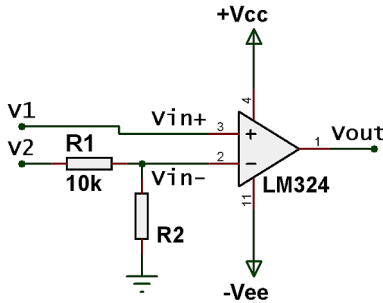
⁹common mode rejection ratio



Şekil 12.3.1: LM324 Bir paket içinde dört gerçek opamp barındıran bir entegre devredir.

kullanıldığı ve gerçek opamlarda $A_v > 10000$ olduğu düşünülürse V_1 gerilimi V_2 den yalnızca 1.2mV bile fazla olsa V_{out} gerilimi $+V_{cc}$ yakınlarında doyuma ulaşır.

Örnek 12.1. Aşağıdaki devrede $V_1 > V_2/2$ ise opampın çıkıştan $+V_{cc}$ değilse çıkıştan $-V_{ee}$ vermesini istiyoruz. R_2 direncinin değeri ne olmalıdır.

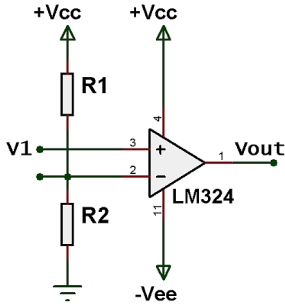


Çözüm: Devrede V_{in+} doğrudan V_1 e bağlı. V_2 nin yarıya bölünüp V_{in-} ye bağlanması gerekir. Gerilimi ikiye bölmek için

$$V_{in-} = V_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2} = V_2/2 \text{ olmalı. O halde}$$

$$2R_2 = R_1 + R_2, \text{ ve } R_2 = R_1 = 10k\Omega \text{ bulunur.}$$

Örnek 12.2. Aşağıdaki devrede $V_{cc} = 12V$, $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 2k\Omega$ olduğuna göre V_1 için çıkışı $+V_{cc}$ yapan koşulu bulun.

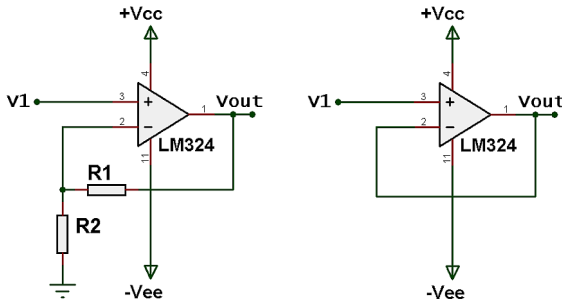


Çözüm: $V_{in-} = V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 12 \times 2/12 = 2V$ olduğuna göre $V_1 > 2V$ olduğunda çıkış $+V_{cc}$ civarında olur.

12.3.2 Gerilimi sabit değerle çarpmak

Terslemeyen Opamp Yükselteç

Bir gerilimi sabit değerle çarpmak o gerilimi yükseltmek demektir. Girişteki $V_{in} = V_1$ sinyalini birden büyük sabit k değeri ile çarparak $V_{out} = k V_{in}$ oluşturmak için Şekil 12.3.2deki devreyi kullanırız.



(a) Terslemeyen yükselteç (b) Birim kazançlı tampon

Şekil 12.3.2: Terslemeyen opamp yükselteç ve tampon

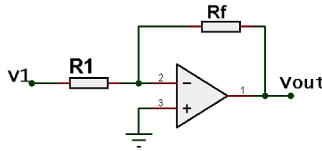
Devrede $V_{cc} = V_{ee} = V_s$ olduğunu ve $A_v = \infty$ olduğunu varsayarsak V_{out} geriliminin doğrusal çalışma bölgesinde kalması için

$V_{in+} = V_{in-}$ olmalıdır. $V_1 = V_{in+} = V_{in-} = V_{out} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ olacağına göre giriş sinyali $k = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$ ile çarpılmıştır. Opampın bu kullanımına *terslemeyen*¹⁰ *opamp yükselteç* de denir. Terslemeyen opamp devresinde R_2 kısadevre, R_1 açıkdevre kullanıldığında $k = 1$ olur ve girişi çok yüksek empedanslı, çıkışı ise düşük empedanslı bu devreye terslemeyen *gerilim takipçi* ya da *tampon* devre denir.

Tersleyen opamp yükselteç

Gerilimin empedansını düşürmek ve daha düşük yük direncini sürebilmesini sağlamak için *gerilim takipçi tampon devrede* $R_2 = \infty$, $R_1 = 0$ yapılarak $k = 1$ olması sağlanır.

Giriş gerilimini negatif bir sabitle çarpmak için Şekil 12.3.3deki opamp tersleyici devresi kullanılır. Girişteki V_{in} sinyalini $-k$ ile çarpmak için aşağıdaki devre kullanılır.



Şekil 12.3.3: Tersleyen opamplı yükselteç

Devre doğrusal bölgede çalışırken $V_{in-} = V_{in+} = 0$ olacaktır. Opampın V_{in-} girişi gerçekte toprağa bağlı olmamasına rağmen V_{out} doğrusal bölgedeyken $V_{in-} = 0$ olması nedeniyle hayali toprak¹¹ olarak adlandırılır. Devre bu noktada kurulan KVL ile kolayca çözümlenir.

$$\text{KCL: } V_1/R_1 = I_1 = I_2 = -V_{out}/R_f.$$

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_1} V_1. \text{ Böylece devrede}$$

¹⁰noninverting

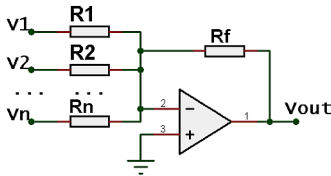
¹¹virtual ground

$$k = -\frac{R_f}{R_1} \text{ bulunur.}$$

Devredeki R_f direncine genellikle geribesleme¹² direnci denir. Tersleyen opamp devresinde oluşan hayali toprak pek çok aritmetik işlemin bu tür bir devrede kolayca gerçekleştirilmesini sağlar. Tersleyen opamp yükselteçte $R_f = R_1$ seçilmesi durumunda giriş sinyalinin yalnızca işaretini değiştiren devreye *tersleyen opamp tampon*¹³ da denir.

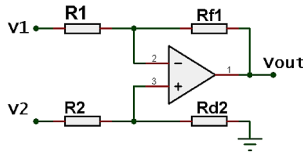
12.3.3 Gerilimlerin toplamı ve farkı

Tersleyen opamp devresine birden fazla giriş direnci ve giriş gerilimi bağlanırsa hayali toprakta KCL gereği bütün girişlerin etkileri birbirini etkilemeksizin toplanır ve çıkış gerilimi



$$V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_1}V_1 + \frac{R_f}{R_2}V_2 + \dots + \frac{R_f}{R_n}V_n\right) \text{ olur.}$$

Gerilim toplama devresi Şekil 12.3.4deki gibi tersleyen tampon devreyle birleştirilirse gerilimlerin farkını alabilir. Ya da çıkarılması gereken voltaj gereken derecede bölünerek V_{in+} girişine verilir.



Şekil 12.3.4: Opamplı gerilim çıkarma devresi

¹²feedback

¹³inverting opamp buffer

Devreyi çözümlmek için $V_{in-} = V_{in+}$ koşuluyla R_1 ve R_{f1} üzerindeki akımların birbirine eşit olması koşulu kullanılır. Superpozisyon kullanarak

$$V_2 = 0 \Rightarrow V_{out,V1} = -V_1 \frac{R_{f1}}{R_1},$$

$$V_1 = 0 \Rightarrow V_{out,V2} = V_2 \frac{R_{d2}}{R_2 + R_{d2}} \frac{R_1 + R_{f1}}{R_1},$$

Toplam çıkış gerilimi

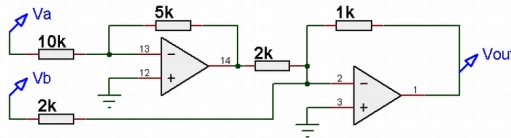
$$V_{out} = V_2 \frac{R_{d2}}{R_2 + R_{d2}} \frac{R_1 + R_{f1}}{R_1} - V_1 \frac{R_{f1}}{R_1}$$

$$V_{out} = \frac{V_2 R_{d2} (R_1 + R_{f1}) - V_1 R_{f1} (R_2 + R_{d2})}{R_1 (R_2 + R_{d2})}$$

Devrede $R_{d2} = R_f$, ve $R_1 = R_2$ seçilirse

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \frac{R_{f1}}{R_1} \text{ olur.}$$

Örnek 12.3. a) Aşağıdaki devrede V_{out} gerilimini V_a ve V_b cinsinden bulunuz. b) $V_a = 2$ ve $V_b = 4$ V olduğunda V_{out} kaç volt çıkar?



Çözüm: a) Birinci opampın çıkışı $V_1 = -\frac{5}{10} V_a$ olur. $V_{out} = -\frac{1}{2} V_1 - \frac{1}{2} V_b = \frac{1}{4} V_a - \frac{1}{2} V_b$ bulunur.

b) $V_{out} = \frac{1}{4} 2 - \frac{1}{2} 4 = 2.5V$ olur.

12.3.4 DAC devreleri

Sayısal¹⁴ devrelerin çıkışları ya 0 ya 1 olabilir. Yalnızca 0 ve 1 olabilen basamaklarla birden daha büyük sayıları ifade edilebilmek için ikili sayı sistemi¹⁵ kullanılır. En küçük basamak d_0 , ağırlığı 1 dir. İkinci basamak d_1 , ağırlığı 2, bu şekilde her basamakta ağırlık ikiye

¹⁴Digital

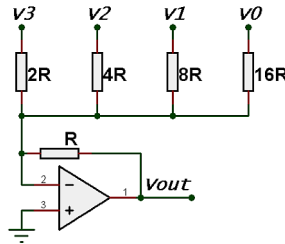
¹⁵binary numbers

katlanarak gider ve n .inci basamağın ağırlığı 2^n olur. Örneğin d_3 , d_2 , d_1 , d_0 diye adlandırdığımız dört ikili basamak kullandığımızda d_0 ın ağırlığı 1, d_1 in 2, d_2 nin 4 ve d_3 ün ağırlığı 8 olur. Bu dört basamakla en yüksek $1+2+4+8 = 15$ yazabiliriz. Örneğin 5 yazmak için $d_3 : d_2 : d_1 : d_0 = (0101)_{iki}$ olur. İkili sayıları sayıyla orantılı gerilime dönüştüren devrelere Sayısal Analog Dönüştürücü¹⁶ denir ve kısaca DAC olarak anılır.

Toplayıcı Opamp DAC devresi

Bir toplayıcı opamp devresindeki direnç değerleri gereken değerlere ayarlanarak girilen ikili sayıyla orantılı çıkış gerilimi elde edilebilir. Şekil 12.3.5deki devrede V_3 , ..., V_1 gerilimleri d_3V_{ref} , ..., d_0V_{ref} değerinde olduğunda çıkış gerilimi

$$\begin{aligned} V_{out} &= -V_{ref} \left(\frac{d_3 R}{2R} + \frac{d_2 R}{4R} + \frac{d_1 R}{8R} + \frac{d_0 R}{16R} \right) \\ &= -\frac{V_{ref}}{16} (8d_3 + 4d_2 + 2d_1 + d_0) \end{aligned}$$



Şekil 12.3.5: Toplayıcıyla yapılan Sayısal Analog Dönüştürücü.

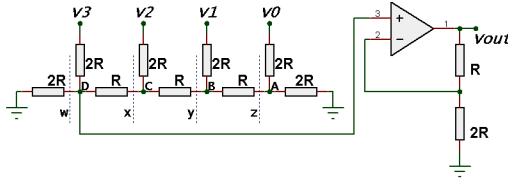
Örneğin devre $d_3 : d_2 : d_1 : d_0 = (1111)_{iki} = 15$ olduğunda $V_{out} = 15 V_{ref}/16$, $(0101)_{iki}$ olduğundaysa $V_{out} = 5 V_{ref}/16$ olur.

Terslemeyen R-2R merdivenli DAC

Değişik değerli dirençlerin birbirine oranla çok hassas ayarlanması çok zor bir iş olduğundan DAC yapımında birçok gerilim bölücünden oluşan R-2R merdiveni denen devreler yaygın olarak kullanılır.

¹⁶Digital-Analog-Converter

Devredeki $V_3... V_0$ gerilimleri $d_3...d_0$ ikili-basamakların durumuna bağlı olarak FET anahtarlarla ya V_{ref} ya da 0V gerilime bağlanır. Şekil 12.3.6deki devre girişinden akım çekmeyen terslemeyen opamp la R-2R devrenin çıkışını 3/2 kat yükselterek V_{out} un girişteki ikili sayıyla orantılı olmasını sağlar.



Şekil 12.3.6: R-2R Merdivenli Terslemeyen Sayısal Analog Çevirici

Devreyi süperpozisyon ve gerilim bölme kullanarak çözümleyeceğiz. Önce w , x , y ve z kesitlerinin solunda kalan dirençlerin eşdeğerini R_w , R_x , R_y ve R_z ile, sağında kalanları $R_{|w}$, $R_{|x}$, $R_{|y}$ ve $R_{|z}$ ile gösterelim ve giriş gerilimleri V_0 , V_1 , V_2 , V_3 sıfır olduğundaki değerlerini bulalım.

$$\begin{array}{l|l} R_w = 2R; & R_{|z} = 2R // 2R = R; \\ R_x = R_w // 2R + R = 2R; & R_{|y} = (R_{|z} + R) // 2R = R \\ R_y = R_x // 2R + R = 2R; & R_{|x} = (R_{|y} + R) // 2R = R \\ R_z = R_y // 2R + R = 2R; & R_{|w} = (R_{|x} + R) // 2R = R \end{array}$$

Devrede V_3 en yüksek ağırlıklı basamak olan d_3 basamağına karşı geliyor. Süperpozisyona V_3 ün V_{Dye} etkisini bularak başlayalım. V_2 , V_1 , V_0 girişleri 0V iken $R_{|x} = R$ olur ve devrede D düğümünden toprağa olan eşdeğer direnç $(R + R) // 2R = R$; D den V_3 e olan direnç $2R$ olduğundan

$$V_{D,V3} = V_3 \frac{R}{R + 2R} = \frac{d_3 V_{ref}}{3} \text{ çıkar.}$$

V_2 nin V_{Dye} etkisi için önce V_2 nin V_{Cye} etkisini bulalım. V_3 , V_1 ve V_0 girişleri sıfır olduğunda $R_{|y} = R$ ve aynı zamanda $R_{|x} = 2R$ olduğundan C düğümünden toprağa olan eşdeğer direnç te $(R + R) // 2R = R$ çıkar. Gene C den V_2 ye olan direnç $2R$ olduğundan

$$V_{C,V2} = V_2 \frac{R}{R + 2R} = \frac{d_2 V_{ref}}{3} \text{ bulunur.}$$

D düğümünden C düğümüne direnç R , D düğümünden toprağa olan direnç $2R // 2R = R$ olduğundan

$$V_{D,V2} = V_{C,V2} \frac{R}{R+R} = \frac{d_2 V_{ref}}{3} \frac{1}{2}$$

Benzer şekilde V_1 ve V_0 in V_D ye katkılarını da

$$V_{B,V1} = \frac{d_1 V_{ref}}{3}; V_{D,V1} = V_{B,V1} \frac{R}{R+R} \frac{R}{R+R} = \frac{d_1 V_{ref}}{3} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$$

$$V_{A,V0} = \frac{d_0 V_{ref}}{3}$$

$$V_{D,V0} = V_{A,V0} \frac{R}{R+R} \frac{R}{R+R} \frac{R}{R+R} = \frac{d_0 V_{ref}}{3} \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$$

Toplam etki ise

$$V_D = \frac{V_{ref}}{3} \left(\frac{d_3}{1} + \frac{d_2}{2} + \frac{d_1}{4} + \frac{d_0}{8} \right). \text{ Kesirleri parantez dışına alarak}$$

ve opampın gerilim kazancı $A_v = 3/2$ ile çarparak

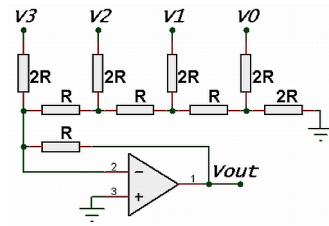
$$V_{out} = \frac{V_{ref}}{16} (8d_3 + 4d_2 + 2d_1 + d_0) \text{ olur.}$$

R-2R merdiveni istenilen sayıda ikili basamağı dönüştürecek kadar uzatılabilir. Ancak basamak sayısına uygun kesinlik elde etmek için dirençlerin ve anahtarlama transistörlerinin özelliklerinin çok düşük toleranslı olması gerekir. Örneğin D düğümüne bağlanan dirençler 8-basamağı doğru dönüştürmek için $1/400$ toleranslı olabilecekken 16-basamak için milyonda on toleranslı direnç gerekir.

Tersleyen R-2R merdivenli DAC

Benzer şekilde çalışan ama tersleyen opampın hayali toprağını kullanan devre Şekil 12.3.7de verilmiştir. Bu devrede $V_3, \dots, V_1$ gerilimleri $d_3 V_{ref}, \dots, d_0 V_{ref}$ değerinde olduğunda çıkış gerilimi

$$V_{out} = \frac{-V_{ref}}{16} (8d_3 + 4d_2 + 2d_1 + d_0) \text{ olur.}$$



Şekil 12.3.7: Tersleyen R-2R Merdivenli Sayısal Analog Çevirici

Örnek 12.4. Şekil 12.3.7deki tersleyen opampli $R - 2R$ DAC devresinde $V_{ref} = 8V$, $(d_3 d_2 d_1 d_0) = (1101)$ olursa V_{out} kaç volt çıkar.

Çözüm: $V_{out} = \frac{-V_{ref}}{16} (8d_3 + 4d_2 + 2d_1 + d_0)$ olacağına göre

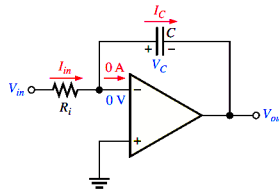
$$V_{out} = \frac{-8}{16} (8 \times 1 + 4 \times 1 + 2 \times 0 + 1 \times 1) = -6.5V.$$

12.4 Entegral ve Türev devreleri

Tersleyen opamp devresinin hayali toprağı sayesinde kondansatör kullanarak giriş sinyalinin zamana göre entegral ve türevini alabilen devreler tasarlanabilir.

12.4.1 Entegral alan opamp

İdeal entegral alıcı opamp devresinde tersleyen opampın geribesleme yoluna C kapasitansı girişe ise R direnç konur.



Şekil 12.4.1: Entegral alan opamp devresi

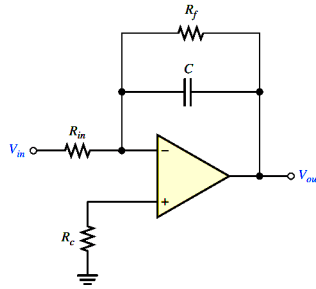
Devrede opampın eksi girişine ulaşan V_{in}/R akımı eğer V_{out} doğrusal çalışma bölgesindeyse C kapasitörünü yükleyerek V_{out} düğümüne ulaşır.

$$I_{in} = V_{in}/R_i = I_C = dV_C/dt.$$

$$V_C = \int dV_C = \frac{1}{C} \int I_C dt = \frac{1}{R_i C} \int V_{in} dt, V_{out} = -V_C;$$

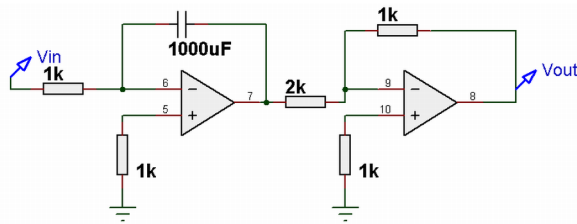
$$V_{out} = \frac{-1}{R_i C} \int V_{in} dt.$$

Pratikteki opampların çok az da olsa çalışma noktasını düzenleyecek giriş akımı gerektirmesi nedeniyle girişte sıfır uygulanan entegratörün çıkışı artıya ya da eksiye doğru kayar. Girişlerin farkından¹⁷ oluşan bu kaymayı önlemek için artı girişten toprağa R_i değerine yakın bir direnç kullanılır. Ayrıca devrenin çıkışını $V_{in} = 0$ iken $V_{out} = 0$ da kararlı çalışabilmesi için ve çok küçük olan giriş sızıntı akımının zamanla C üzerinde birikmemesi için kondansatöre paralel bir R_f direnci kullanılır. $R_f C$ zaman sabiti seçilirken çıkış sinyalinin entegral almakta kullanılacağı süre boyunca V_C nin R_f üzerinden boşalma hızının integrali fazla etkilemeyecek derecede uzun, ama V_{in} uzun süre sıfırda kalırsa V_c yi sıfıra düşürecek kadar kısa olması istenir.

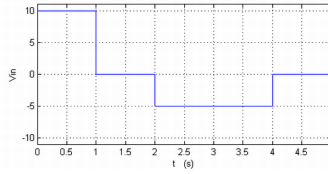


Şekil 12.4.2: Entegral alıcı opamp devresi

Örnek 12.5. Aşağıdaki entegratör ve yükselteçten oluşan devrenin $t=0$ anında çıkışı 0V olduğuna göre verilen giriş gerilimine karşılık çıkıştaki gerilimi çiziniz.



¹⁷offset



Çözüm: Birinci opampın çıkışı

$$V_1 = -\frac{1}{1k \cdot 1000\mu} \int_0^t V_{in} dt = -\int_0^t V_{in} dt$$

olur. İkinci opampın çıkışı

$$V_{out} = -\frac{1}{2} V_1 = \frac{1}{2} \frac{1}{1k \cdot 1000\mu} \int_0^t V_{in} dt = \frac{1}{2} \int_0^t V_{in} dt$$

olarak bulunur.

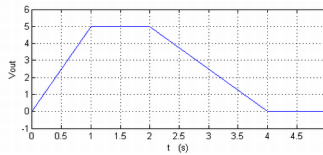
V_{in} in zamana göre entegralini V_{in} ile 0V arasında kalan alanı toplayarak elde edebiliriz.

$0 < t < 1$ aralığında $V_{int}(t) = \int_0^t V_{in} dt = 10t$ çıkar.

$1 < t < 2$ aralığında $V_{int}(t) = \int_1^t V_{in} dt = V_{int}(1) + 0$ olarak sabit kalır. Böylece

$V_{int}(2) = V_{int}(1) = 10$ olur.

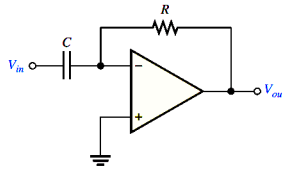
$2 < t < 4$ aralığında $V_{int}(t) = \int_2^t V_{in} dt = V_{int}(2) - 5(t - 2)$ olacağından entegral değeri düşerek $V_{int}(4) = 0$ olur. $V_{out} = V_{int}/2$ olduğuna göre çıkış gerilimi aşağıdaki gibi çizilir.



12.4.2 Türevleyici opamp devresi

Türevleyici¹⁸ opamp devresi bir sinyalin zamana bağlı türevini alır. Şekil 12.4.3deki devre tersleyici olduğundan türevin işaretini değiştirir. Örneğin sabit hızda yükselen gerilimin türevi çıkışta sabit bir negatif voltaj olarak gözlenir.

¹⁸differentiator



Şekil 12.4.3: Türevleyici opamp devresi

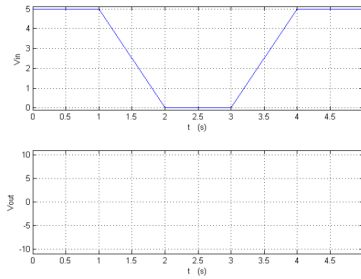
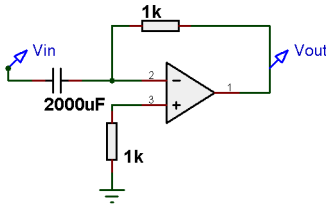
Devrede C kapasitansı üzerinden opampın eksi girişine ulaşan akım

$$i = C \frac{dV_{in}}{dt} ;$$

bu akımın çıkışta oluşturduğu V_{out} gerilimi

$$V_{out} = -iR = -RC \frac{dV_{in}}{dt} \text{ olur.}$$

Örnek 12.6. Aşağıdaki türev alıcının giriş sinyaline karşılık gelen çıkış sinyalini tamamlayınız.

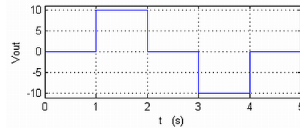


Çözüm

$$V_{out} = -RC \frac{dV_{in}}{dt} = -1k \cdot 2000\mu \frac{dV_{in}}{dt} = -2 \frac{dV_{in}}{dt}$$

at $0 < t < 1$ and $4 < t < 5$, $V_{in}(t) = 5$, $\frac{dV_{in}}{dt} = 0$, at
 $2 < t < 3$, $V_{in}(t) = 0$, $\frac{dV_{in}}{dt} = 0$

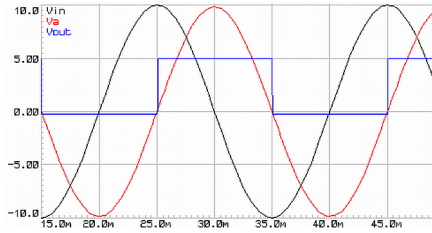
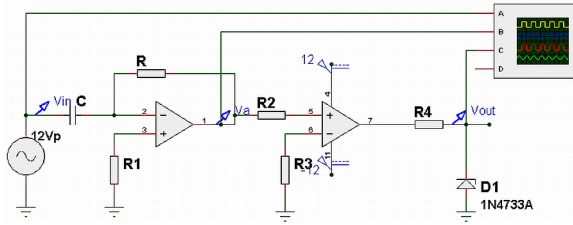
at $1 < t < 2$, $V_{in}(t) = 10 - 5t$, $\frac{dV_{in}}{dt} = -5$; at $3 < t < 4$,
 $V_{in}(t) = -15 + 5t$, $\frac{dV_{in}}{dt} = 5$;



Örnek 12.7. Türev alıcı ve karşılaştırıcı opamplar kullanarak $V_p = 10V$ olan bir AA $V_{in} = V_p \sin(\omega t)$ voltajının tam 90° ye geldiği anda $5V$ a çıkan bir devre kuralım.

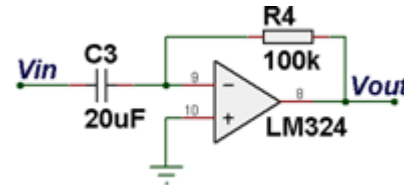
Çözüm Türev alıcının çıkışı

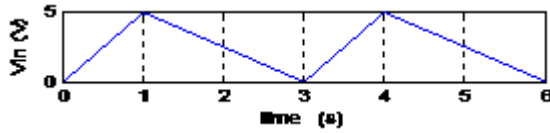
$-RC \frac{dV_{in}}{dt} = -RC\omega V_p \sin(\omega t + 90^\circ)$ olacağından eğer devrede $RC = \omega$ seçersek çıkışta $V_a = -10V_p \sin(\omega t - 90^\circ)$ elde ederiz. V_a 'nın sıfırı kesip negatife indiği an V_{in} tam 90° ilerlemiş olur. Bu noktada $+5V$ üretecek bir karşılaştırıcı devre kullanırız.



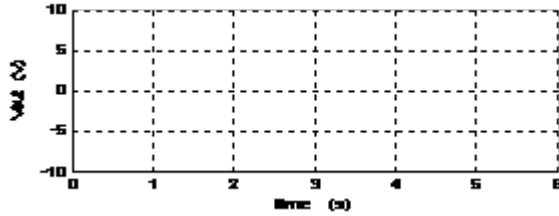
12.5 Problemler

Problem 12.1. Aşağıdaki devrede

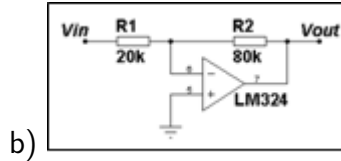
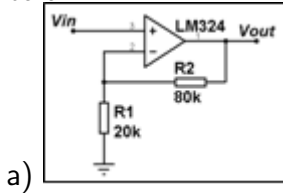




Giriş gerilimi V_{in} testere dişi biçimindedir.
Çıkış gerilimi V_{out} u bulup çizin.



Problem 12.2. Aşağıdaki (a) ve (b) devrelerinin gerilim kazancını bulun.



Kaynakça

- [Alexander,2009] Alexander, C. K., M. N. O. Sadiku Fundamentals of electric circuits, 4th ed. McGraw-Hill, 2009
- [Bird,2003] Bird, J. , Electrical Circuit Theory and Technology, 2nd Ed., Newnes, 2003
- [Floyd,2007] Floyd, T. L. , Electronics Fundamentals: Circuits, Devices, and Applications, Pearson Int. 7. Ed. 2007.
- [Nahvi,2003] M. Nahvi, J.A.Edminister, Schaums outline of Theory and Problems of Electric Circuits, 4th Ed. McGraw-Hill, 2003

Kısım IV

Ekler

Ek A

Matematiksel Bağıntılar

A.1 Matris ve Vektör İşlemleri

Sayı Matris çarpımı Bir $d \in R$ sayısı ile herhangi bir $A = [a_{i,j}]_{n \times m}$ matrisi ya da $b = [b_i]_n$ vektörü çarpılınca matris ya da vektördeki elemanların her biri d ile çarpılır.

$$dA = [d a_{i,j}]_{n \times m} \text{ ve } db = [d b_i]_n \\ b = [b_i]_n \text{ olarak verilsin.}$$

Matris Vektör çarpımı $A = [a_{i,j}]_{n \times n}$ matrisi ile $b = [b_i]_n$ vektörü çarpılırsa ortaya çıkan

$$c = Ab$$

vektörünün i .nci elemanı b 'nin elemanlarının sırasıyla A 'nın i .nci satırındaki karşı gelen elemanla çarpımlarının toplamından bulunur.

$$[c_i]_n = Ab = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \cdots \\ c_n \end{bmatrix},$$

$$c_i = \sum_{j=1}^n a_{i,j}b_j = a_{i,1}b_1 + a_{i,2}b_2 + \cdots + a_{i,n}b_n.$$

2x2 matris tersi $\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{ad - bc} \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}^{-1}$

3x3 matris tersi Öncelikle 3x3 matris determinantı bulunur. Ardından kofaktör matrisi determinanta bölünür.

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix},$$

Determinant

$$|A| = a_1(b_2c_3 - b_3c_2) + a_2(b_3c_1 - b_1c_3) + a_3(b_1c_2 - b_2c_1)$$

Matris tersi

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \begin{bmatrix} b_2c_3 - b_3c_2 & b_3c_1 - b_1c_3 & b_1c_2 - b_2c_1 \\ c_2a_3 - c_3a_2 & c_3a_1 - c_1a_3 & c_1a_2 - c_2a_1 \\ a_2b_3 - a_3b_2 & a_3b_1 - a_1b_3 & a_1b_2 - a_2b_1 \end{bmatrix}.$$

Matris denklemi çözümü $Ab = c$ denkleminde $c = [c_i]_n$ bilinenler vektörü, ve $b = [b_i]_n$ bilinmeyenler vektörü olsun. $A = [a_{i,j}]_{n \times n}$ matrisinin determinantı olan $|A|$ sıfır değilse bu denklemi sağlayan yalnızca bir sayısal b çözüm vektörü ve yalnız bir A^{-1} matrisi vardır. Çözüm vektörü

$$b = A^{-1}c,$$

ile, ya da Gauss yoketme yöntemiyle bulunabilir.

A.2 Sanal Uzak Vektörleri

Kartezyen vektör

$a + bj$ biçiminde birbirine dik gerçekte ve sanal eksenlerdeki koordinatları verilmiş vektördür.

Sanal eksen oluşturur j değişkeni

$$j \times j = -1 \text{ bağıntısını sağlar.}$$

Polar vektör

$r\angle\theta$ biçiminde uzunluğu ve gerçekte eksene göre açısı belirtilerek yazılmış vektördür.

Kartezyen ve polar koordinat dönüşümü

$$a + bj \text{ biliniyorsa } r = \sqrt{a^2 + b^2};$$

$\theta = \arcsin(b/r)$, $\theta = \arccos(a/r)$ ya da $\theta = \arctan(b/a)$ ile bulunur.

$$r\angle\theta \text{ biliniyorsa } a = r \sin(\theta), \text{ ve } b = r \cos(\theta) \text{ ile bulunur.}$$

Vektörel toplam

Kartezyen vektörlerin gerçekte bileşenlerinin toplamı toplam gerçekte bileşeni, sanal bileşenlerinin toplamı da toplam sanal bileşeni oluşturur.

$$(a_1 + jb_1) + (a_2 + jb_2) = (a_1 + a_2) + j(b_1 + b_2)$$

Polar vektörler kartezyene dönüştürülüp toplamı alındıktan sonra polar vektöre dönüştürülür.

Vektörel çarpım

Kartezyen vektörlerin çarpımı

$$(a_1 + jb_1) \times (a_2 + jb_2) = (a_1a_2 - b_1b_2) + j(a_1b_2 + a_2b_1)$$

bölümü

$$\begin{aligned} \frac{a_1 + jb_1}{a_2 + jb_2} &= \frac{(a_1 + jb_1) \times (a_2 - jb_2)}{a_2^2 + b_2^2} \\ &= \frac{(a_1a_2 + b_1b_2) + j(a_2b_1 - a_1b_2)}{a_2^2 + b_2^2} \end{aligned}$$

Polar vektörlerin çarpımı

$$(r_1 \angle \phi_1) \times (r_2 \angle \phi_2) = r_1 r_2 \angle (\phi_1 + \phi_2)$$

Ek B

Bilgi sayfası

B.1 DA devreler

Metrik Birim Sistemi: metre “m”, kilogram “kg”, saniye “s” .

Metrik birim katsayıları: P (peta)= 10^{15} ; T (tera) 10^{12} ; G (giga) 10^9 ; M (mega) 10^6 ; k (kilo) 10^3 ; m (mili)= 10^{-3} ; μ (mikro) 10^{-6} ; n (nano) 10^{-9} ; p (piko) 10^{-12} ; f (femto) 10^{-15} ;

İş ve Enerji: $dw = f dl$; $w = \int f dl$. Sabit bir F kuvvetine karşı L kadar yol $W = F L$ kadar işe karşılık gelir. Birimi Jul (J).

Güç: Birim zamanda aktarılan iştir $P = U.I$. Birimi Jul/saniye (J/s) ya da Watt (W).

Toplam yük $q = \int i dt$. i sabitse $Q = I T$.

Yük birimi Kulomb, (Kul) ya da (Coul).

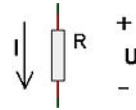
Gerilim veya Voltaj: $U = \frac{W}{Q}$: Bir düğümden diğerine geçen 1 Kul. yükle aktarılan enerjidir. Birimi Volt (V).

Ohm Kanunu

$U = R I$ veya $I = G U$.

Direnç R birimi Ohm (Ω)

İletkenlik $G = 1/R$ birimi Mho ($\mathcal{U}$) yada Siemens (S).



Dirençte güç: $P = IU = U^2/R = I^2 \times R$.

Etiket gücü (nominal güç) birim zamanda yayabileceği ısı ile sınırlı.

Direnç Renk kodları

renk	bant-1	bant-2	bant-3	bant-4
eksik			eksik	20%
gümüş			0.1	10%
altın			0.01	5%
siyah	0	0	1	
kahve	1	1	10	1%
kırmızı	2	2	100	0.1%
portakal	3	3	1000	0.01%
sari	4	4	10 000	
yeşil	5	5	100 000	
mavi	6	6	1000 000	
mor	7	7	10 000 000	
gri	8	8	100 000 000	
beyaz	9	9	1000 000 000	

%10 toleranslı standard dirençler

(10 12 15 18 22 27 33 39 47 56 68 82)

Düğüm: Bir devrede birbirine ideal iletkenlerle bağlanmış bütün uçlar bir **düğüm oluşturur**.

Devre döngüsü birbirine komşu düğümlerin sırayla dizilmesinden oluşan zincirdir.

Seri bağlı iki elemandan aynı akım geçer.

Seri dirençlerin eşdeğeri: $R_E = R_1 + R_2 + \dots$

Paralel bağlı elemanlar aynı gerilimi alır.

Paralel Direnç Eşdeğeri: $1/R_E = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots$

Yalnız iki direnç için $R_E = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$

Akım ölçme iletkeni kesip ampermetre bağlanır.

Gerilim ölçme iki düğüm arasına voltmetre bağlanır.

Kirşof gerilim kanunu (KVL): Kapalı bir elektrik çevriminde seçilen bir yöndeki gerilimlerin toplamı sıfırdır.

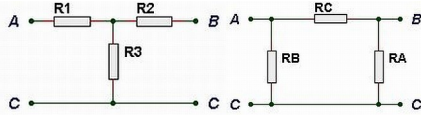
Kirşof akım kanunu (KCL): Bir düğüme bağlı bütün elemanlardan giren toplam yük sıfırdır.

Gerilim bölücü: Seri dirençler toplam gerilim V yi değerleri oranında böler. $V_1 = V R_1 / (R_1 + R_2)$

Akım Bölünmesi: Paralel dirençler akımı $I_1 = I \times G_1 / (G_1 + G_2)$ olarak böler.

Uç Eşdeğeri: uçları arasına aynı voltaj uygulandığında uç akımları aynı olan devrelerdir.

Yıldız-Üçgen eşdeğeri



$R_1 = R_B R_C / (R_A + R_B + R_C)$ (komşular bölü toplam)

$R_A = (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3) / R_1$; (ikili çarpımlar toplamı bölü uçtaki direnç)

Çevrim-Gerilim Yöntemi: $\mathbf{R} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{U}$ matris denklemi için

a) bağımsız çevrimleri numarala. Çevrim akımları: $\mathbf{I} = (I_1 \dots I_n)^T$

b) hem I_i hem I_j çevrimi üzerindeki direnç $\mathbf{R} = [r_{ij}]_{n \times n}$ daki r_{ij} direncidir. I_i ile I_j nin yönleri ters ise r_{ij} eksidir.

c) $u_i \in \mathbf{U}$ değerleri I_i çevrimindeki gerilim kaynaklarının toplamıdır.

Gerilim-Akım Kaynağı Eşdeğeri: Bir U_S gerilim kaynağı ve seri R_S direncinin eşdeğeri $I_S = U_S / R_S$ akım kaynağına paralel R_S direncidir.

Düğüm Akımları Analizi: $\mathbf{I} = \mathbf{G} \mathbf{U}$ matris denklemini bulurken

a) bir düğümü ortak düğüm seç ve diğer düğümleri numarala. b)

Her düğümün ortak düğüme karşı gerilimini $\mathbf{U}$ vektörüne değişken olarak al. c) i .nci düğüme giren akım kaynağını $\mathbf{I}$ vektörünün i_i

değeri olarak kullan. d) $\mathbf{G}$ matrisinin g_{ii} elemanı i .nci düğümden diğer bütün düğümlere olan iletkenliklerin toplamıdır. g_{ij} , $i \neq j$ ise i .nci düğümü j .inci düğüme bağlayan iletkenliğin eksi işaretlisidir.

Tevenin eşdeğeri U_T gerilimiyle seri R_T direncidir. Devrenin iki düğümü arasında açık uç gerilimi U_T , ve kısa devre akımı I_N bel-liyse $R_T = U_T / I_N$ dir. Tüm kaynaklar sıfırlandığında devrenin eşdeğer direnci de R_T dir.

Norton eşdeğeri I_N akım kayn. ve paralel R_T direncidir.

Maksimum güç teoremi: Tevenin eşdeğeri R_T ve U_T dan oluşan bir devreye bağlı R_L yük direncine en yüksek güç $R_L = R_T$ iken aktarılır. Aktarılan en yüksek güç $P_L = U_T^2 / (4 R_T)$ olur. Yük di-renci daha yüksekse aktarılan güç düşer ama güç nakli verimi artar.

Süperpozisyon teoremi: Birden çok kaynaklı devrenin bir akım kolundaki akım, güç kaynaklarının her birinin o kolda diğer kay-naklar sıfırlandığında oluşturduğu akım katkılarının toplamı kadardır.

Akım kaynağı sıfırlama: kaynağın yerini açık devre bırak.

Gerilim kaynağı sıfırlama: kaynağın yerine kısa devre koy.

Sayı Matris çarpımı: $d \in R$; $A = [a_{i,j}]_{n \times m}$; $b = [b_i]_n \Rightarrow dA = [d a_{i,j}]_{n \times m}$ ve $db = [d b_i]_n$

Matris Vektör çarpımı: $A = [a_{i,j}]_{n \times n}$ matrisi ile $b = [b_j]_n$ vektörü çarpılırsa $c = Ab$ vektörünün i .nci elemanı

$c_i = \sum_{j=1}^n a_{i,j} b_j = a_{i,1} b_1 + a_{i,2} b_2 + \dots + a_{i,n} b_n$ olur

2x2 matris tersi: $\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{ad - bc} \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}^{-1}$

3x3 $A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}$ **matrisinin determinanı:**

$|A| = a_1(b_2 c_3 - b_3 c_2) + a_2(b_3 c_1 - b_1 c_3) + a_3(b_1 c_2 - b_2 c_1)$

3x3 A matrisinin tersi

$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \begin{bmatrix} b_2 c_3 - b_3 c_2 & b_3 c_1 - b_1 c_3 & b_1 c_2 - b_2 c_1 \\ c_2 a_3 - c_3 a_2 & c_3 a_1 - c_1 a_3 & c_1 a_2 - c_2 a_1 \\ a_2 b_3 - a_3 b_2 & a_3 b_1 - a_1 b_3 & a_1 b_2 - a_2 b_1 \end{bmatrix}$.

Matris denklemi çözümü: $Ab = c$ denkleminde $c = [c_i]_n$ bilinenler vektörü, ve $b = [b_i]_n$ bilinmeyenler vektörü olsun. $A = [a_{i,j}]_{n \times n}$ matrisinin determinanı $|A|$ sıfır değilse bu denklemi sağlayan bir sayısal b çözüm vektörü ve bir A^{-1} matrisi vardır. Çözüm vektörü $b = A^{-1}c$ olur.

B.2 AA Devreler

Kapasitans C: $W = \frac{1}{2} C V^2$. $v(t) = \frac{1}{C} \int i dt$. $i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$

Endüktans L: $W = \frac{1}{2} L I^2$. $i(t) = \frac{1}{L} \int v dt$. $v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$

Paralel eşdeğer $C_E = C_1 + C_2 + \dots$; $\frac{1}{L_E} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_1} + \dots$

Seri Eşdeğer $\frac{1}{C_E} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_1} + \dots$; $L_E = L_1 + L_2 + \dots$

Kalıcı durum: $C \Rightarrow$ açık devre; $L \Rightarrow$ kısa devre;

Geçici durum: Zaman sabiti $\tau = RC$; $\tau = R/L$;

Üstel artış: $y(t) = Y_{\infty}(1 - e^{-t/(L/R_T)})$ **düşüş:** $y(t) = Y_o e^{-t/(L/R_T)}$

$(t/\tau, v/V_\infty)$ değerleri: $(t/\tau < 0.2, v/V_\infty = t/\tau)$, $(0.5, 0.394)$, $(1, 0.632)$, $(2, 0.865)$ $(3, 0.95)$

Sinüs eğrisi: $A_p \sin(\omega t + \phi)$

Genlik , tepe değeri A_p , Mutlak ortalama değeri $A_{mo} = 0.637 A_p$

Kare-ortalama-kök değeri $A_{rms} = A_p / \sqrt{2} = 0.707 A_p$.

Periyod T : Tekrarlama süresi (saniye, s). $T = 1/f$

Frekans $f = 1/T$ (Hertz, Hz),

Açısal hız $\omega = 2\pi f$ (radyan/saniye, rad/s)

Magnetomotif kuvvet $\mathcal{F}_m = N I$ (Amper-tur, A-t)

Magnetik Akı $\phi_m = \mathcal{F}_m / R$ (Weber, Wb).

Relüktans $\mathcal{R}$ (A-t/Wb);

Düz iletkende kuvvet ve gerilim: $F_n = B I L$; $V_{ind} = B L S_n$.

Bobinde gerilim: $v_{ind} = N (d\phi_m / dt)$.

İdeal trafo: $n = \frac{N_a}{N_b} = \frac{I_b}{I_a} = \frac{V_a}{V_b}$; $V_a I_a = V_b I_b$;

İkincil taraftaki R_s in birincil taraftaki etkisi: $R_{pe} = R_s / n^2$

AA devrede R fazı etkilemez. Akımı C ileri L geri kaydırır.

$$Z_C = X_C \angle -\frac{\pi}{2} = \frac{1}{2\pi f C} \angle -\frac{\pi}{2} = \frac{-j}{2\pi f C} ;$$

$$Z_L = X_L \angle \frac{\pi}{2} = 2\pi f L \angle \frac{\pi}{2} = 2\pi f L j$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} ; X_L = 2\pi f L$$

L ve C de güç çıkmaz $P_L = P_C = 0$.

Reaktif güç Q (Volt-Amper reaktif, VAR) oluşur.

$$Q_C = V_C I_C = V_C^2 / X_C = I_C^2 X_C, \text{ (üretilen)}$$

$$Q_L = V_L I_L = V_L^2 / X_L = I_L^2 X_L, \text{ (tüketilen)}$$

Rezonans: $X_C = X_L$ ve $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC})$;

Seri $V_C + V_L = 0$. Paralel $I_C + I_L = 0$

Kalite faktörü $Q_{LC} = X_L / R$ frekans seçiciliğini belirler.

3-Faz, Dengeliyse toprak akımı sıfır. $V_\Delta = \sqrt{3}V_Y$; $P_\Delta = 3P_Y$

Y gerilimler $V_a = V_Y \angle 0^\circ$, $V_b = V_Y \angle 120^\circ$, $V_c = V_Y \angle -120^\circ$

Δ gerilimler $V_{ba} = V_\Delta \angle 150^\circ$, $V_{ac} = V_\Delta \angle 150^\circ$, $V_{cb} = V_\Delta \angle -90^\circ$

Dizin

- açık döngü gerilim kazancı, 171
- açık devre, 21
- açık uç gerilimi, 54, 63
- açısal hız, 88
- admittans, 106
- akım, 22
- akım bölünmesi, 45
- akım kazancı, BJT, 153
- akım kolu, 43
- akımın yönü, 21, 27
- aktif devre elemanı, 21
- alan etkili transistör, 166
- alternatif akım, 87
- alüminyum, 127
- Amper, 8
- ampermetre, 28
- anahtar, 21
- anod, 24
- antimon, 128
- arsenik, 128
- asenكرون motor, 121

- bağımsız çevrimler, 56
- bağlantı gerilimi, 128
- balast, 113
- bariyer gerilimi, 128
- batarya, 3, 20
- beşinci grup elementleri, 128
- bilezik, 93
- bipolar bağlantı transistörü, BJT, 151
- birim çarpanı, 1
- birim katsayısı, 1, 25
- bobin, 73, 79
- bor, 127

- C-sınıfı yükselteç, 164
- CMMR, 172
- çevrim, 20
- çevrim gerilimleri yöntemi, 49, 56
- çığ etkisi, 128
- çift taraflı farksal mod, 171

- D-sınıfı yükselteç, 164
- dördüncü grup element, 127
- düğüm, 20, 43
- düğüm akımları yöntemi, 49, 59
- düğüm gerilimleri vektörü, 59
- DA, 22
- DA-jeneratör, 92
- DAC, 178
- dayanak gerilimi, 140
- dB, 172
- değişken kondansatör, 74
- delik, 127
- desibel, 172
- devre döngüsü, 20
- dielektrik, 73
- dielektrik dayanımı, 75

- dingin nokta, 155
direnç, 11, 20
doğru akım, 22
doğrultucu devre, 134
doğrusal çalışma bölgesi, 170
doğrusal bölge, BJT, 154
doğrusallık, 66
doyum bölgesi, BJT, 154
dual benzerlik, 81
duyaç, 4
duyarlık, 2
- eşdeğer direnç, 33
Eşdeğer direnç yöntemi, 49
eşdeğer endüktans, 82
eşdeğer kapasitans, 75
elektrik akımı, 8
elektrik devresi, 19
elektrik enerjisi, 92
elektro-motor-kuvvet, 25
elektrolitik kondansatör, 73
elektroliz, 3
elektroluminesans, 146
elektromanyetik enerji dönüşümü, 89
elektron, 6
EMK, 25
empedans, 106
empedans denkleştirme, 65
endüktör, 20
endüktans, 81
enerji iletim verimi, 97
enerjinin sakınımı, 3
entegral alıcı opamp devresi, 181
etiket gücü, 13
etkileşim endüktansı, 97
- fırça, 93
Farad, 74
Faraday kanunu, 92
farksal mod, 171
farksal yükselteç, 166
faz farkı, 89
Faz-faz gerilimi, 123
Faz-nötr gerilimi, 123
faz-nötr gerilimi, 121
fazdan faza gerilim, 122
fazor, 104
FET, 166
fosfor, 128
frekans, 88
- güç, 5
geçici davranış, 76
geçici dönem, 76
Genlik, 88
gerilim ölçümü, 28
gerilim bölücü, 39
gerilim farkı, 9
gerilim kaynağı, 34
gerilim takipçi, 175
geriye eğilimli çalışma, 128
geriye kırılma gerilimi, 128
germanyum, 127
- hata, 2
hava göbekli bobin, 81
hayali toprak, 175
Henry, 81, 82
Hertz, 88
- ısı enerjisi, 5
iş, 4
ideal devre elemanı, 19
ideal diyot modeli, 131

- ideal opamp, 169
ideal transformator, 98
ikili sayı sistemi, 177
ileriye eğilimli çalışma, 128
iletken, 7, 20
iletkenlik, 12
indium, 127
- jeneratör, 3
jenerator, 20
JFET, 167
Jul., 4
- kırılma bölgesi, BJT, 154
kırılma gerilimi, 128
kısa devre, 21
kısa devre akımı, 54, 63
kalıcı durum, 76
kalıcı miknatıs, 79
kalite faktörü, 118
kalori, 5
kanal, 166
kapı, 167
kapalı devre, 21
kapasitor, 73
karakteristik, BJT, 154
katod, 24, 129
KCL, 37, 44
kesim bölgesi, BJT, 154
kesinlik, 2
kesme noktası, 87
Kirşof akım kanunu, 37
Kirşof gerilim kanunu, 37
Kolpit osilatör, 165
komutator, 93
komutator-fırça, 94
kondansator, 20, 73
kondansator bobin duallığı, 81
Kulomb, 8
kutup, 90
KVL, 37
KVL KCL yöntemi, 49, 55
- lambda, 20
Laser, 148
LED, 35, 146
- maksimum güç aktarma teo-
remi, 64
manyetik akı, 90
manyetik alan, 79
matris denklemi, 56
mekanik enerji, 92
mekanik iş, 4
mercimek kondansatör, 73
metal-oksit-silikon FET, 167
metrik sistem, 1
mhO, 12
miknatıs, 89
MOS-FET, 167
motor, 20
- n -tipi madde, 128
nötr, 28, 121
Newton, 4
nominal güç, 13
Norton eşdeğeri, 63
- Ohm, 12
Ohm Kanunu, 11
ohmmetre, 33
Omega, 12
ortak çalışma modu, 171
ortak anotlu sayısal gösterge,
147

ortak düğüm, 23, 59
ortak mod dışlama oranı, 172
ortak nokta, 121
osilatör, 165
ölçü aleti, 20
öz endüktans, 80

p -tipi madde, 127
paralel bağlantı, 25, 43
paralel dirençler, 43, 44
periyod, 87
pil, 3
polarite, 21
polimer film kondansatör, 74
proton, 6

R-2R merdiveni, 180
radyan, 88, 89
reaktans, 106
reaktif güç, 108
referans düğümü, 23, 59
rezonans frekansı, 120, 165
RL devre, 84
RLC devreler, 119

süperpozisyon teoremi, 66
sayısal analog dönüştürücü (DAC),
178
sayısal devre, 177
seramik disk kondansatör, 73
serbest elektron, 7, 128
seri bağlantı, 22
seri dirençler, 23
seri rezonans, 117
Siemens, 12
sigorta, 21
silikon, 127
silisyum, 127

sinüs eğrisi, 87, 88
sincap kafesli motor, 121
sinyal, 4
standart direnç, 18, 34
suseptans, 106
şase, 28

türevleyici opamp devresi, 183
tek taraflı farksal mod, 170
tepe değer, 87
tepe noktası, 88
terminal, 19
terslemeyen opamp yükselteç,
175
tersleyen opamp yükselteç, 176
tersleyen toplayıcı opamp, 176
Tevenin eşdeğeri, 63
toprak düğümü, 23
trafo, 98
transformatör, 98

uç, 19
uç eşdeğeri, 33
üç fazlı devre, 122
üç fazlı güç, 120
üçüncü grup element, 127
üçgen gerilimi, 122
üçgen-Yıldız eşdeğeri, 51
üreteç, 24

varikap, 74
voltaj, 9
voltmetre, 28

Watt, 10
Weber, 90

Y-gerilimi, 121

yük, [7](#), [40](#)

Yük doğrusu, [155](#)

yüksek gerilim hattı, [97](#)

yıldız gerilimi, [121](#)

yıldız-üçgen eşdeğeri, [51](#), [52](#)

yağlı kondansatör, [73](#)

yalıtkan, [7](#), [73](#)

yarı iletken, [7](#)

zaman sabiti, [77](#)

Zener, [130](#)

Zener gerilimi, [128](#)

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK DEVRELER VE ANALİZİ

MEHMET BODUR



TMMOB ELEKTRİK MÜHENDİSLERİ ODASI

İhlamur Sokak No:10 Kızılay Ankara
Tel: [312] 425 32 72 Faks: [312] 417 38 18
EMO Kitap: <http://kitap.emo.org.tr>

EMO Yayın No: EK/2012/520
ISBN: 9752711286