

Дизајн на електронски уреди

Атанас Танушевски



УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
СКОПЈЕ, 2024

Дизајн на електронски уреди

Атанас Танушевски



УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
СКОПЈЕ, 2024

Издавач:

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје
Бул. „Гоце Делчев“ бр. 9, 1000 Скопје
www.ukim.edu.mk

Уредник за издавачка дејност на УКИМ:

проф. д-р Биљана Ангелова, ректор

Уредник на публикацијата:

проф. д-р Атанас Танушевски, Природно-математички факултет– Скопје

Рецензенти:

1. проф. д-р Ненад Новковски
2. проф. д-р Александар Скепаровски

Техничка обработка:

проф. д-р Атанас Танушевски, Природно-математички факултет– Скопје

Лектура на македонски јазик:

м-р Лилјана Јовановска

Илустратор:

проф. д-р Атанас Танушевски, Природно-математички факултет, Скопје

CIP - Каталогизација во публикација
Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје

621.38-11(075.8)

ТАНУШЕВСКИ, Атанас

Дизајн на електронски уреди [Електронски извор] / Атанас Танушевски ;
[илустратор Атанас Танушевски]. - Скопје : Универзитет "Св. Кирил и
Методиј", 2024

Начин на пристапување (URL):

https://www.ukim.edu.mk/e-izdanija/PMF/Dizajn_na_elektronski_uredi.pdf.

- Текст во PDF формат, содржи 263 стр., илустр. - Наслов преземен од
екранот. - Опис на изворот на ден 07.02.2024. - Библиографија: стр.
259-263

ISBN 978-9989-43-509-6

а) Електронски уреди -- Дизајн -- Висошколски учебници

COBISS.MK-ID 62912517

СОДРЖИНА

Вовед	1
1. ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИ МРЕЖНИ УРЕДИ	
1.1. Магнетни кругови	4
1.2. Примена на законите од Електромагнетизам	8
1.3. Трансформатор	12
1.4. Параметри на мрежен трансформатор	15
1.5. Изработка на мрежен трансформатор со константен напон	17
1.6. Електронски регулатор на напон	21
1.7. Современи уреди за електронска регулација на напонот	23
1.8. Електрично коло за регулација на напонот	26
1.9. Изработка на електронски регулатор на напон	29
1.10. Претворувач од прав напон/прав напон (DC/DC) со повратна врска	33
1.11. Енергетски претворувач на прав напон	37
1.12. Претворувач на прав напон со трансформаторска повратна врска	40
1.13. Изработка на претворувач на прав напон со трансформаторска повратна врска	45
1.14. Претворувач на прав напон со проследување и трансформаторска повратна врска	49
1.15. Мултипликатори на напон	52
1.16. Изработка на мултипликатор на напон	57
1.17. Претворувач на прав напон во неизменичен напон (инвертор)	58
1.18. Полубранов и целобранов инвертер	63
2. ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИ УРЕДИ	
2.1. Електроакустични претворувачи	67
2.2. Електродинамични претворувачи	71
2.3. Електромагнетен микрофон и звучник	74
2.4.1. Проточен магнетометар	80
2.4.2. Индукциски магнетометар	82
2.5. Тахометар	84

2.6.	Кондензаторски микрофон	87
2.7.	Механички и електрични својства на кондензаторски микрофон	90
2.8.	Мерење на ниво на звук	94
2.9.	Електростатски звучник	97
3. ЕЛЕКТРОСТАТСКО-МЕХАНИЧКИ ПРЕТВОРАЧИ		
3.1.	Пиезоелектричен претворувач	101
3.2.	Механички и електрични својства на пиезоелектричен претворувач	104
3.3.	Еквивалентен круг на пиезоелектричен претворувач	106
3.4.	Примена на пиезоелектричен претворувач и мерење на дебелината на тенки филмови со кварцен кристал	110
3.5.	Електрети	115
3.6.	Примена на електретите	119
3.7.	Магнетостриктивни претвораачи	121
4. ПОЛУСПРОВОДНИЧКА ТЕХНОЛОГИЈА		
4.1.	Фотолитографија	124
4.2.	Технологија за добивање на различни структури врз силициумска плочка	128
4.3.	Допингување на силициумска плочка	133
4.4.	Вертикален p– n премин и MOS-FET транзистор	136
4.5.	Хомоепитаксија и хетероепитаксија	138
4.6.	Метализација на структурните елементи врз силициумска плочка	140
4.7.	Технологија на полупроводнички интегрирани уреди	142
4.8.	Технологија на печатени плочки	143
4.9.	Интегрално коло	146
4.10.	Аудио засилувач со интегрално коло ТВА820М	148
5. ЕЛЕКТРОНСКИ КОЛА НА ОПЕРАЦИОНИ ЗАСИЛУВАЧИ		
5.1.	Вовед во операциски засилувач	152
5.2.	Примена на операциски засилувач за собирање, вадење и мерење на отпор	156
5.3.	Примена на операциски засилувач за интегрирање и диференцирање	159
5.4.	Претворање на струја во напон и напон во струја со операциски засилувач	162
5.5.	Напонски следач и инструментален засилувач	165
5.6.	Винов осцилатор со операциски засилувач	168
5.7.	Шмитово коло за активирање на електричен круг	170

5.8. Функциски генератор	174
5.9. Изработка на интегратор, диференцијатор и Винов осцилатор со операциски засилувач LM741	177
6. АВТОМАТСКА РЕГУЛАЦИЈА НА ПРОЦЕСИ	
6.1. Вовед во контролори	180
6.2. Видови на контролори	183
6.3. Тиристор и тријак	187
6.4. Карактеристики на тријак и дијак	190
6.5. Автоматска регулација на температурата на вода во сад	194
7. ПОСЕБНИ ЕЛЕКТРОНСКИ УРЕДИ	
7.1. Тајмер (временско процесирање) 555	198
7.2. Моностабилен и астабилен мултивибратор	201
7.3. Осцилатор контролиран од напон (VCO)	205
8. ОСНОВИ НА МЕРНИТЕ ИНСТРУМЕНТИ	
8.1. Аналогни уреди	208
8.2. Аналоген инструмент со подвижна намотка во постојано магнетно поле	212
8.3. Аналоген електричен ампериметар за права струја	215
8.4. Аналоген електричен волтметар и омметар за права струја	217
8.5. Дополнителни уреди за мерење на наизменична струја и аналоген електричен мултиметер	219
8.6. Електронски аналогни уреди за мерење на прав напон и струја	221
8.7. Електронски аналогни уреди за мерење на наизменичен напон и струја	224
8.8. Дигитални волтметри	227
9. ЕКРАНИ НА ИНСТРУМЕНТИТЕ	
9.1. Екрани од вакуумски уреди	231
9.2. Дизајн на екран со лед диоди	236
9.3. Примена на течните кристали во екрани	240
9.4. Екран со течни кристали	244
9.5. Техника на адресирање на екран со течни кристали	249
9.6. Контрола на рамните екрани со допир	255
Литература	259

Предговор

Современите апарати и инструменти за мерење, регистрација и запишување на податоци содржат повеќе уреди, со цел да имаме веродостојност на податоците и нивна долготрајност. Книгата *Дизајн на електронски уреди* дава можност да се запознаеме со некои уреди во инструментите и апаратите кои се неопходни за нивно функционирање. Затоа, неопходно е добивање на познавања за уредите за претворба на: механички во електрични величини, на еден вид електрични во друг вид електрични величини, на електрични во механички величини и на електрични во оптички величини. Покрај тоа, во книгата се дадени основите за изработка на полупроводници и печатени плочи, со цел студентите да добијат познавања за видот и некои карактеристики на електронските елементи кои можат да бидат употребени во уредот, како и техниката на нивно поставување на печатените плочи. Книгата *Дизајн на електронски уреди* е наменета за студентите на Институтот за физика при Природно-математичкиот факултет, но може да им послужи и на студентите на Електротехничкиот факултет, како и на студентите на Машинскиот факултет.

Материјалот е поделен во девет поглавја, со цел да се опфатат содржини со кои студентите ќе се стекнат со нови знаења, а во исто време изучување на различните процеси и појави кои се применуваат во уредите. Книгата *Дизајн на електронски уреди* е поделена на девет поглавја, со цел подобро изучување на различни уреди. Обработени се вкупно 75 теми, со различна застапеност по одделни поглавја, а прикажани се 174 слики и 3 табели.

Така, во првото поглавје се изучуваат уредите за напојување на електронските инструменти и апарати, во зависност од нивната примена. Така, на пример, за уреди кои се приклучени на напон од градска мрежа обично се користи трансформатор, за трансформација од 220 V на напон што е потребен за нивното работно подрачје.

Во второто поглавје се опфатени електроакустичните уреди за трансформација на електричната енергија во енергија на акустични (звучни) бранови и обратно. Во зависност од уредот, се разликуваат електроакустичните емитери и приемници на звук (сензори). Во оваа група приемници на звук се уредите како микрофони, а во групата на електроакустичните емитери спаѓаат слушалки, звучници и други уреди на вибрации.

Во третото поглавје се изучуваат претворачи кои се карактеризираат со четири физички величини, две се измерениот напон и струја, а другите две се силата што дејствува на елементот и измерената брзина. Всушност, овие претворачи се електростатско-механички претворачи и механичко- електростатски претворачи.

Во четвртото поглавје се изучуваат основите на електронските уреди (транзистори, отпорници, кондензатори, диоди и друго) кои се електрично поврзани со метални водови или се електрично изолирани помеѓу себе. За таа цел, објаснети се различните технологии за реализација на електронските уреди, како и технологијата за нивно поставување на печатени плочи.

Во петтото поглавје се дадени некои основни карактеристики на операцискиот засилувач, изведен со интегрирано коло. Исто така, дадени се основите на електронските кола на операциските засилувачи за извршување на математички операции и решавање на диференцијални равенки.

Во шестото поглавје се изучуваат основите на системите за контрола на процеси, со отворена повратна врска и затворена повратна врска. За таа цел, за контрола на одредени процеси потребно е воспоставување цели и променливи што треба да се контролираат, опсег на дејствување, моделирање и анализа.

Во седмото поглавје се дадени основите на посебни електронски уреди кои се неопходни во конструкција на електронските уреди. Во зависност од инструментот или апаратот, потребно е да се изучат основите на тајмери, уред за аналогно-дигитална конверзија, напонски осцилатори, уред за активација на одредено коло и други.

Во осмото поглавје се дадени основите на современите електронски уреди кои можат да бидат составени од аналогни и дигитални кола и служат за мерења на напони, струја, и отпори и друго. Така, на пример, електричните сигнали од сензорите се аналогни, а за засилување и прилагодување на аналогниот сигнал користи операциски засилувач.

Во деветтото поглавје се дадени основите на екраните, со цел прикажување на измерената величина од даден инструмент. Покажувањето на аналогните инструменти обично се остварува со стрелка, прицврстена на подвижна намотка во постојано магнетно поле, а вредноста на величината се гледа од положбата на стрелката на дадена скала. Од друга страна, во дигиталните инструменти отчитувањето на вредноста на величината е на екран, во форма на бројки од декадниот систем. Прикажувањето на бројките на екранот кај дигиталните инструменти може да биде како резултат на светењето на LED диоди, примена на течни кристали за екран или на екран со светење на гасот под низок притисок, во вакуум цевка.

Вовед

Во денешно време мерењето, регистрацијата и запишувањето на одредена физичка величина се прави со инструменти и апарати, без разлика дали тие се со мали димензии и преносливи или се масивни. Затоа, во книгата *Дизајн на електронски уреди* се изучуваат различни уреди кои наоѓаат примена во инструменти и апарати.

Така, во зависност од нивната примена, напојувањето на инструментите и апаратите може да биде со напон од градска мрежа или напонот ќе биде со друга форма и фреквенција. При напојување со градска мрежа, напонот од 220 V се трансформира во саканата вредност на напонот, притоа треба да се внимава на потребната моќност што треба да ја испорачува трансформаторот. Од друга страна, наизменичниот напон од трансформаторот се претвора со прав стабилизирани напон, со помош на електронски регулатор на напонот, бидејќи инструментите и апаратите работат обично на прав напон. Меѓутоа, во некои уреди е потребна друга форма на напонот, па затоа се изучуваат уредите: за претворба од прав напон/прав напон (DC/DC), мултипликатори на напон и на претвораач на прав напон во наизменичен напон (инвертор).

Друг вид уреди се електроакустичните уреди за трансформација на електрична енергија во енергија на акустични (звучни) бранови и обратно. Овие претвораачи се користат за зрачење и прием на еластични деформации на некоја средина во ултразвучната техника (недеструктивна контрола), во хидроакустика (хидролокација, подводна комуникација, сонари), во акустоелектроника (претвораачи на физички големини, електрични филтри, дефекти на материјали и друго), во медицина (ултразвучна дијагноза и набљудување), во системи за безбедност. Посебен осврт во книгата *Дизајн на електронски уреди* е даден на уредите: електромагнетен микрофон и звучник, магнетометар, тахометар, кондензаторски микрофон, уредот за мерење на ниво на звук и електростатски звучник.

Исто така, се изучуваат електростатско-механички претвораачи и механичко-електростатски претвораачи. Типичен претставник на овие уреди е пиезоелектричен претвораач којшто се применува во мерната технологија, бесконтактно тестирање на материјали, медицината и електрониката, а во исто време може да биде електростатско-механички претвораач и механичко-електростатски претвораач.

Во изработката на уредите значајна е употребата на соодветни електронски уреди (транзистори, отпорници, кондензатори, диоди и

друго), кои се прават во форма на дискретни полупроводнички компоненти и интегрирани кола, а електрично поврзани со метални водови или се електрично изолирани помеѓу себе. Овие електронски уреди можат да бидат во форма на технологија на дебел филм и технологија со тенок филм. Овие електронски уреди се поставуваат на печатени плочи, со помош на технологија на поврзување на уредите со помош на плочка со дупчиња (ТНТ) и технологија на поврзување на уреди со помош на залемување на површината на плочката (SMT). За таа цел, се применува методата на фотолитографија која придонесува за: минијатуризација на електронските уреди (транзистори, отпорници, кондензатори, диоди и друго), допингување на силициумска плочка, хомоепитаксија и хетероепитаксија, изработка на интегрално коло, метализација на структурните уреди и елементи врз силициумска плочка, како и технологија на печатени плочки.

Во современите инструменти и апарати посебно место има операциски засилувач. Имено, операцискиот засилувач има голема примена поради неговите својства: бесконечен влезен импеданс, бесконечен опсег на фреквенции кои се засилуваат, нулта излезна импеданса и голема вредност на коефициентот на засилување од $A = 10^5$. Покрај тоа, операциски засилувач во соодветни електронски кола може да извршува низа математички операции, како што се собирање, вадење, интегрирање и диференцирање. Друга примена на операцискиот засилувач е како претворац на струја во напон и напон во струја, инструментален засилувач, осцилатор и функциски генератор.

Покрај тоа, современите инструменти и апарати можат да служат за автоматска регулација, т.е. контрола на процеси, со отворена повратна врска и затворена повратна врска. За таа цел, компонентата или процесот што треба да биде контролиран треба да се претстави со блок шема, при што од односот на влезниот сигнал и излезниот сигнал е даден процесот што треба да се направи на влезниот сигнал, за да добиеме соодветен излезен сигнал. Системите за автоматска контрола можат да бидат во форма на контролори со две позиции (вклучено/исклучено), линеарни (пропорционални) контролори, контролори за интеграција и контролори за диференцијација. Затоа, се изучува наједноставниот автоматски елемент за регулација на температурата на сад со вода (релеј, тиристор, или тријак) којшто го контролира уредот за извршување (грејач).

За реализација на одредени електронски уреди неопходна е конструкција на посебните електронски уреди. За таа цел, се изучува уредот тајмер и неговата примена за моностабилен и астабилен мултивибратор, осцилатор контролиран од напон. Овие уреди се неопходни во електронските уреди кои можат да бидат составени од аналогни и дигитални кола. Во аналогните уреди се користат аналогни

сигнали, каде што со помош на операциски засилувачи се вршат различни операции. Посебна примена на аналогните уреди е нивна примена во инструмените кои се базираат на движење на подвижна намотка во постојано магнетно поле. Аналогните инструменти имаат примена за мерење на: јачина на правата струја, прав напон и отпор, примена за мерење на наизменична струја и нивна примена како аналоген мултиметар. Друг вид аналогни инструменти се аналогни уреди за мерење на наизменичен напон и струја, како и дигитални волтметри.

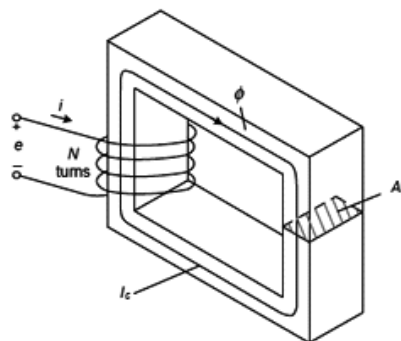
Посебен интерес е прикажувањето на вредноста на измерената величина на екранот на даден инструмент. Екраните на аналогните инструменти се отчитуваат од положбата на стрелката, на дадена скала. Додека пак, во дигиталните инструменти отчитувањето на вредноста на величината е во форма на бројки од декадниот систем. Прикажувањето на бројките на екранот кај дигиталните инструменти може да биде како резултат на вакуумска цевка на Некси, светлината која ја емитираат вжештени жици во внатрешноста на вакуумска цевка, вакуумски флуоресцентни екрани, светлината емитирана од лед (LED) диоди, екран со течни кристали (LCD). Исто така, од интерес е контрола на мерењето со помош на допир на екранот со течни кристали. Затоа, се изучува екран со отпорни електроди и екран со површински капацитативен сензор.

1. ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИ МРЕЖНИ УРЕДИ

Овие уреди служат за напојување на сите електрични уреди кои се приклучени на напон од градска мрежа или на батерија, при што напонот треба да го трансформираат во соодветен напон, потребен за нивното работно подрачје.

1.1. Магнетни кругови

Индукторот и трансформаторот се присутни речиси во сите електрични кругови, со изразена моќност. Индукторот (намотка) е уред што складира енергија, во даден електричен круг. Исто така, индукторите се употребуваат како филтри за наизменични струи и ограничување на промената на јачината на струјата. Од друга страна, трансформаторот е уред за пренос на енергијата, за претворба на моќност добиена од голем напон и мала струја, во моќност од мал напон и голема струја, и обратно. Во аналогија со механиката, индукторот е сличен на ветерница која ја складира енергијата, а трансформаторот е сличен на менувачот кај автомобилот. Покрај тоа, кај трансформаторот треба да има електрична изолација на примарната и секундарната намотка, со максимален пренос на моќноста.



Слика 1.1. Магнетен круг.

Амперовиот закон го опишува взаемнодејството на електричната струја и магнетното поле. Во случај кога тече струја со јачина I низ соленоид со затворено железно јадро (слика 1.1.), N број на навивки, со должина l и површина на напречен пресек A_c , важи:

$$\oint_C H \cdot dl = NI \quad (1.1.1)$$

каде што NI се вика магнетодвижечка сила и се означува со Φ . Ако земеме дека напречениот пресек на јадрото е константен и јачината на магнетното поле е константно во железно јадро, тогаш равенката 1.1.1 може да се напише како:

$$H_c \cdot l_c = NI \quad (1.1.2)$$

Јачината на магнетното поле доведува до магнетна индукција:

$$B_c = \mu_r \mu_0 \cdot H_c \quad (1.1.3)$$

каде што μ_r е релативната магнетна пермеабилност, μ_0 е магнетна пермеабилност на вакуумот ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$). Струјата што тече низ N

навивки предизвикува појава на магнетно поле долж јадрото, слично како на појавата на течење на струја во електричните кругови, при постоење на електромоторната сила на краевите на спроводник (слика 1.1). Магнетниот флукс во јадрото е даден со равенката:

$$\phi = B_c \cdot A_c = \mu_r \mu_0 H_c A_c \quad (1.1.4)$$

каде што A_c е површината на јадрото. Оттука, за јачината на магнетното поле се добива:

$$H_c = \frac{\phi}{\mu_r \mu_0 A_c} \quad (1.1.5)$$

Ако ја земеме во обзир последната равенка, Амперовиот закон ќе гласи:

$$NI = H_c \cdot l_c = \phi \frac{l_c}{\mu_r \mu_0 A_c} = \phi \cdot R_c \quad (1.1.6)$$

каде што R_c се вика релуктанса или магнетен отпор на магнетниот круг.

Од последната равенка може да се види дека таа е слична со равенката за Омовиот закон за електричен круг. Врската помеѓу магнетодвижечката сила и магнетниот отпор е дадена со равенката:

$$\Phi = \phi \cdot R_c \quad (1.1.7)$$

Оттука за магнетен отпор (релуктансата) се добива:

$$R_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c} \quad (1.1.8)$$

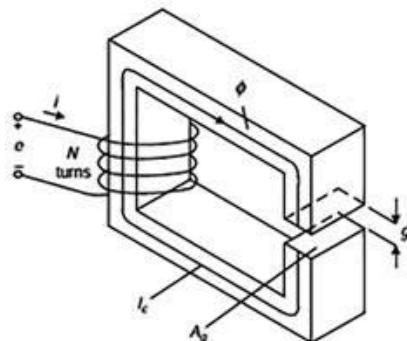
каде што l_c е должина на јадрото, μ_r релативна пермеабилност, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$ е магнетната пермеабилност на вакуум и A_c е површина

на јадрото. Постои аналогија помеѓу магнетниот отпор во магнетниот круг и отпорот во електричниот круг. Слично како кај електричниот отпор, магнетниот отпор во последната равенка е пропорционален на должината на кругот и обратнопропорционален на површината на напречниот пресек.

Материјал	Состав	Маг. Пермеабилност μ_r	Маг. индукција B_s (Т)	Кириева температура (°C)	Коерцитивна сила (A/m)	Густина g/cm^3
Магнезил	3% Si 97% Fe	$1,5 \times 10^3$	1,5-1,8	750	32-48	7,3
Супермендур*	49% Co 49% Fe 2%V	$0,8 \times 10^3$	1,9-2,2	940	12-28	8,15
Ортонол	50% Ni 50% Fe	2×10^3	1,42-1,58	500	7,9-16	8,24
Пермалој легура со квадратен пресек	79% Ni 17%Fe 4% Mo	$(12-100) \times 10^3$	0,66-0,82	460	1,6-3,2	8,73
Супермалој	78% Ni 17%Fe 5% Mo	$(10-50) \times 10^3$	0,65-0,82	460	0,024-0,64	8,76
Аморфна легура 2605-SC	81%Fe 13.5%B 3.5% Fe	3×10^3	1,5-1,6	370	0,24-6,4	7,32
Аморфна легура 2714A	66% Co 15% Si 4% Fe	20×10^3	0,5-0,58	205	0,640-1,6	7,59
Ферит	MnZn	$(0,75-15) \times 10^3$	0.3-0.5	100-300	3,2-20	4,8

Табела 1.1. Карактеристики на магнетен материјал.

При употреба на јадро од феромагнетен материјал (табела 1.1), магнетниот флуks е ограничен од видот на материјалот и струјата што тече низ навивките, која е доволна за да немаме заситување на магнетната индукција. Од друга страна, со вметнување на процеп во јадрото (слика 1.2) потребна е поголема јачина на струјата за да се добие заситување на магнетната индукција, поради растење на магнетниот отпор. Воздушниот



Слика 1.2. Магнетен круг со воздушен процеп.

процеп дозволува да се складира повеќе енергија. Оваа конфигурација на магнетниот круг е основа на голем број индуктори. Од друга страна, индукторот може да биде со феромагнетно јадро. Магнетниот отпор се должи на должината на магнетниот круг и процепот на јадрото (слика 1.2), со замена во равенката (1.1.8) се добива:

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} \quad (1.1.9)$$

каде што l_g е должина на воздушниот процеп, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$ е магнетната пермеабилност на вакуум и A_g е површина на воздушниот процеп.

Ако земеме дека должината на воздушниот процеп е помала од должина на јадрото ($g < l_c$), тогаш еквивалентната вредност на магнетниот отпор е дадена со равенката:

$$R_{eq} = R_c + R_g = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c} + \frac{l_g}{\mu_0 A_g} = \frac{l_c}{\mu_0 A_c} \left(\frac{1}{\mu_r} + \frac{l_g}{l_c} \right) = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_{ef} A_c} \quad (1.1.10)$$

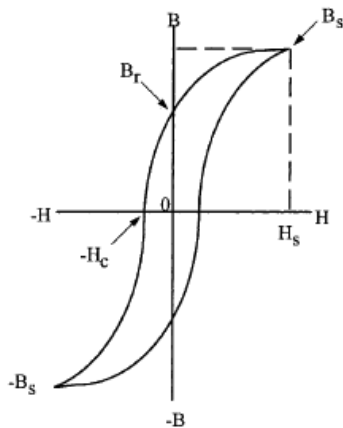
Од последната равенка се добива дека магнетниот отпор на јадро со воздушен процеп е сличен со вредноста на магнетниот отпор на затворено јадро, со таа разлика што наместо релативна пермеабилност (табела 1.1) имаме ефективна магнетна пермеабилност:

$$\mu_{ef} = \frac{1}{\frac{1}{\mu_r} + \frac{l_g}{l_c}} \quad (1.1.11)$$

Во случај кога $\mu_r \gg 1$, ефективна магнетна пермеабилност е дадена со равенката:

$$\mu_{ef} \approx \frac{l_c}{l_g} \quad (1.1.12).$$

За изработка на јадро на трансформатор се користи феромагнетниот материјал, со одредени карактеристики што ќе одговараат на неговата примена, цена и големина. Покрај тоа, треба да се води сметка и за фреквенцијата на која ќе работи и индуктивитетот на намотката. За магнетен материјал може да се користи челик со допингуван со силициум, легура на никел – железо, легура кобалт – железо, аморфни метални легури и ферити. Карактеристики на магнетниот материјал: вредност на магнетната индукција при заситување B_s , магнетната пермеабилност μ_r , остаточната магнетна индукција B_r и коерцитивната сила H_c се дадени во табела 1.1 и слика 1.3.



Слика 1.3. Хистерезис на мек магнетен материјал.

1.2. Примена на законите од Електромагнетизмот

Магнетното поле може да се определи со векторот на магнетната индукција или со јачината на магнетното поле. Во случај кога тече струја I низ бесконечно долг спроводник, тогаш магнетната индукција е дадена со равенката:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (1.2.1)$$

каде што R е растојанието помеѓу точката во која се одредува магнетната индукција и спроводникот. Оваа магнетно поле може да се прикаже со магнетни силиви линии во вид на концентрични кругови, чија јачина ќе зависи од растојанието од спроводникот (слика 1.4). Од друга страна, ако имаме спроводник во вид на кружница, тогаш магнетното поле е дадено со равенката:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r} \quad (1.2.2).$$

каде што r е радиусот на кружниот спроводник. Додека пак, ако имаме спроводник во вид на соленоид (слика 1.5), тогаш магнетната индукција во средината на соленоидот е дадена со равенката:

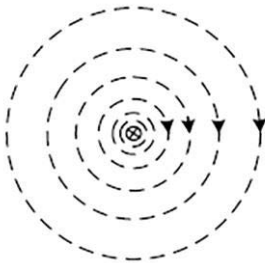
$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \quad (1.2.3).$$

каде што N е бројот на навивки и L е должината на соленоидот. Во случај кога се работи за трансформатор, променливиот напон во примарната намотка ќе доведе до променливо магнетно поле:

$$\phi_{(t)} = \phi_{\max} \cos \omega t \quad (1.2.4).$$

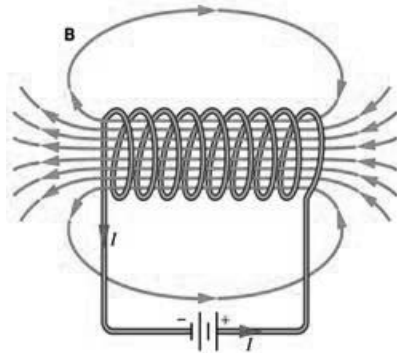
Оваа променливо магнетно поле ќе предизвика индуцирање на електромоторна сила во секоја навивка во секундарната намотка, дадена со равенката:

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{dB \cdot A}{dt} = \phi_{\max} \cdot 2\pi f \sin \omega t \quad (1.2.5).$$



⊗ Течење на струја низ спроводникот, во насока кон сликата.

Слика 1.4. Магнетен поле создадено од течење на струја долж даден спроводник.



Слика 1.5. Магнетно поле создадено од течење на струја низ солениод.

Максималната вредност на напонот во секоја навивка на секундарот е дадена со изразот:

$$\varepsilon_{\max} = 2\pi f \cdot \phi_{\max} \quad (1.2.6).$$

Оттука, напонот во примарната намотка доведува до променлив магнетен флуks и индуцирање на напон на краевите на секундарната намотка:

$$V_s = N_s \varepsilon_{\max} = 2\pi f \cdot N_s \phi_{\max} \quad (1.2.7).$$

Додека пак, ефективната вредност на напонот во секундарната намотка е дадена со равенката:

$$V_{s,ef} = \frac{V_s}{\sqrt{2}} = 4,44f \cdot N_s \phi_{\max} \quad (1.2.8).$$

Максималната вредност на напонот во примарната намотка е дадена со равенката:

$$V_p = 2\pi f \cdot N_p \cdot \phi_{\max} \quad (1.2.9).$$

Магнетниот флуks може да се изрази преку магнетната индукција со равенката:

$$\phi_{\max} = B_{\max} \cdot A \quad (1.2.10).$$

Од равенката 1.2.5 следува дека за конечни димензии на магнетното јадро, вредноста на магнетната индукција е дадена со изразот:

$$B = \frac{1}{A} \int_0^t \varepsilon \cdot dt = \frac{1}{A} \int_0^t \phi_{\max} \cdot 2\pi f \sin \omega t \cdot dt = \frac{V \cdot 10^4}{N \cdot A} \int_0^t \sin \omega t \cdot dt \quad (1.2.11).$$

каде што ϕ_{\max} е максималната вредност на магнетниот флуks во вебери (W_b), A е површината на јадрото во метри квадратни (m^2) и B_{\max} е магнетната индукција во тесла (Т). Од магнетниот хистерезис на јадрото е познато дека за позитивни вредности на напонот, магнетната индукција достигнува максималната позитивна вредност B_{\max} , а за негативни вредности на напонот, магнетната индукција достигнува максималната негативна вредност $-B_{\max}$. Ако земеме полупериод за којшто се менува надворешното магнетно поле, тогаш промената на магнетната индукција B_{\max} , ќе биде $\frac{1}{2}$ од максималната вредност и е дадена во равенката 1.2.11:

$$B = \frac{V \cdot 10^4}{2K_f \cdot N \cdot A} \int_0^{t/2} \sin \omega t \cdot dt = \frac{V \cdot 10^4}{2K_f \cdot N \cdot A} \int_0^{\pi/\omega} \sin \omega t \cdot dt \quad (1.2.12),$$

т.е.

$$B = \frac{V \cdot 10^4}{2 \cdot N \cdot \omega \cdot A} (\cos \omega t)_{\pi/\omega}^0 = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{ef} \cdot 10^4}{2 \cdot N \cdot \omega \cdot A} 2 = \frac{V_{ef} \cdot 10^4}{N \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot A} \Rightarrow$$

$$B_{\max} = \frac{V_{ef} \cdot 10^4}{K_f \cdot N \cdot f \cdot A} = \frac{V_{ef} \cdot 10^4}{4,44 \cdot N \cdot f \cdot A} \quad (T) \quad (1.2.13).$$

каде што K_f е коефициент на бранување и за синусен напон има вредност 4,44. Максималната вредност на магнетната индукција B_{\max} се вика уште и работна густина на магнетниот флуks, а за трансформатор на моќност (мрежен трансформатор за електрични уреди) таа изнесува 1,1 Т (тесла). Исто така, ако ја знаеме површина на јадрото, може да се одреди јачината на магнетната индукција.

Исто така, магнетниот флуks ќе зависи од површината што ја понижува примарната или секундарната намотка, секоја со соодветен N број навивки и напречен пресек dA , следува дека:

$$d\phi = B \cdot NdA \quad (1.2.14).$$

Од равенката 1.2.5 следува дека индуцираната електромоторна сила е дадена со равенката:

$$\varepsilon = - \frac{B \cdot NdA}{dt} \quad (1.2.15).$$

Ако имаме солениод со феромагнетно јадро, при течење на струја низ навивките, магнетниот флуks се зголемува сè додека не се јави заситување. Покрај тоа, јачината на магнетниот флуks во индукторот

зависи и од индуктивитетот, тогаш индуцираната електромоторна сила е дадена со равенката:

$$\varepsilon = L \frac{dI}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} \cdot 10^{-4} \quad (1.2.16).$$

Од двете страни на равенката 1.2.12 може да се скрати dt , притоа се добива:

$$LI = NBA \cdot 10^{-4} \quad (1.2.17).$$

За магнетната индукција се добива:

$$B = \frac{LI}{NA} \cdot 10^{-4} \quad (1.2.18)$$

Индуктивноста L е функција од магнетната пермеабилност, поради тоа интервалот во којшто магнетната пермеабилност има константна вредност се зема за позната вредност на индуктивитетот. Во општ случај, магнетниот флукс зависи од вредноста на наизменичната струја и постојаната струја. Типичен пример на примена на индукторот како филтер е кај уредите на права струја, каде што наизменичната струја која се должи на недобро испегланиот напон, ќе биде драстично намалена.

Промената на струјата што тече низ индуктивитет со феромагнетно јадро доведува до акумулирање на енергијата која ќе зависи од јачината на магнетното поле, а тоа зависи од вредноста на индуктивноста на соленоидот и јачината на струјата што тече:

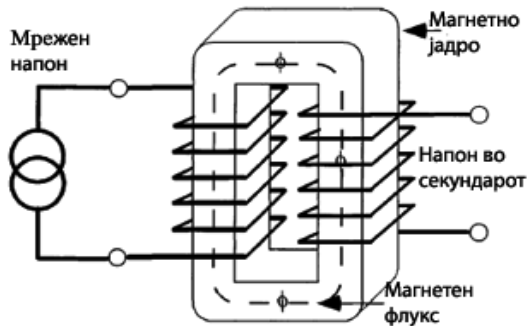
$$W = \frac{LI^2}{2} \quad (1.2.19)$$

Додека пак, енергијата што се акумулира во индуктор со воздушен процеп е дадена со равенката:

$$W = \frac{B^2}{2\mu_0} A l_g \quad (1.2.20).$$

1.3. Трансформатор

Трансформаторот е уред којшто го трансформира мрежниот напон од 220 V и фреквенција од 50 Hz на потребна вредност на уредот. Всушност, тој се состои од магнетен круг кој се состои од феромагнетно јадро, и две намотки, од кои едната е примарна намотка а другата е



Слика 1.6. Трансформатор.

секундарна намотка (слика 1.6). Трансформаторот е составен дел на многу уреди кои треба да обезбедат потребна моќност на излезот од секундарната намотка, за да тој работи беспрекорно. Исто така, уредот може да повлече голема моќност од трансформаторот што ќе доведе до прегревавање и прегорување на трансформаторот. Обично моќноста на уредот е пропишана од производителот. Понатаму, ќе се направи анализа колку моќност е потребна за функционирање на исправувач и обезбедување на моќност од 20 W за потрошувач.

Принципот на работа на трансформаторот е примена на Био-Саваровиот закон и Законот за електромагнетна индукција. При течење на променлива струја низ примарната намотка на трансформаторот и се менува по синусен закон:

$$I_p = I_{p\max} \sin \omega t = I_{p\max} \sin 2\pi f t \quad (1.3.1).$$

Оваа променлива струја создава променлив магнетен флуks:

$$\phi = \phi_{\max} \sin 2\pi f t \quad (1.3.2).$$

каде што ϕ_{\max} е максималната вредност на магнетниот флуks. Оттука, магнетниот флуks ќе се менува во склад со фреквенцијата на мрежниот напон.

Како резултат на променливиот магнетен флуks се индуцира електромоторна сила во секундарната намотка:

$$V_s = N_s \varepsilon_{\max} = N_s 2\pi f \phi_{\max} \quad (1.3.3).$$

Во случај, кога немаме сврзано потрошувач на секундарната намотка, низ неа не тече струја (слика 1.6), а ефективната вредност на напонот од секундарната намотка е дадена со равенката:

$$V_{s,ef} = \frac{V_s}{\sqrt{2}} = 4,44N_s f \phi_{\max} \quad (1.3.4).$$

Исто така, поради самоиндукцијата се индуцира напон и на примарната намотка, која е приклучена на мрежниот напон, даден со изразот:

$$V_{p,ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = 4,44N_p f \phi_{\max} \quad (1.3.5).$$

Кога немаме сврзано потрошувач, тогаш односот на индуцираните напони е даден со равенката:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} = n \quad (1.3.6).$$

каде што n е трансформациониот број. За мрежни трансформатори кои служат за напојување на електронските уреди, тој изнесува 0,05 – 0,25. Загубите на трансформаторот се должат на хистерезисот и вртложните струи во јадрото. Загубите што се должат на хистерезисот, се намалуваат со избор на материјал со потесна хистерезисна крива. За таа цел се користи феромагнетен материјал од легура на челик со 3 % силициум. Загубите што се должат на вртложните струи во јадрото се намалуваат со користење ламинатно јадро, составено од тенки лимови со дебелина 0,35 mm, притоа односот на површината на феромагнетниот материјал и вкупната површина на јадрото се вика фактор на полнење k и за мрежни трансформатори изнесува 0,85. Ламинатното јадро може да има различна форма и големина. Најчесто се користат ламинатно јадро EI, EE, FF, UI, LL, и DU. Кога на секундарот ќе сврзе потрошувач, тогаш тече струја I_s која е определена од напонот на секундарот V_s и отпорот на потрошувачот. При пренос на електричната енергија во дадено коло, од изворот кон потрошувачот, максимална моќност се пренесува кога импедансата на влезниот круг на колото е ист со импедансот на излезниот круг, т.е. импедансата на потрошувачот. За таа цел, трансформаторот може да се користи за усогласување на импедансите помеѓу изворот и потрошувачот. Обично, напонот на секундарот е помал од напонот на примарот, затоа отпорот на намотката во примарот е многу поголем од отпорот на секундарната намотка и потрошувачот (слика 1.7). Отпорот на намотката во примарот е R_p , отпорот на намотката во секундарот е R_s и R_e е еквивалентен отпор на примарната намотка. Струјата во секундарот ќе се спротивставува на промената на магнетниот флукс, којшто се должи на мрежниот напон. Така, струјата во примарната намотка се состои од струјата потребна за магнетизирање на јадрото I_p и струјата пресликана во примарната

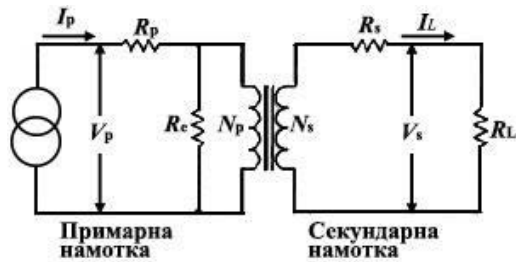
намотка I_p , при приклучување на потрошувач на секундарната намотка. Во услови на идеален трансформатор и рамнотежа, при што загубите се занемарени, моќноста на примарната намотка и секундарната намотка се еднакви:

$$I_p^2 R_p = I_s^2 R_s \quad (1.3.7),$$

Оттука, ако земеме дека отпорот во секундарот е занемарлив во однос на отпорот на потрошувачот, следува дека отпорот во секундарот се должи на отпорот на потрошувачот R_L . Оттука, отпорот во секундарната намотка е $R_s = R_{pr}$ кој се пресликува во примарната намотка и е даден со равенките:

$$I_p = n \cdot I_s \quad (1.3.8).$$

$$R_e = \frac{V_p}{I_p} = \frac{\frac{1}{n} V_s}{n \cdot I_s} = \frac{1}{n^2} \frac{V_s}{I_s} = \frac{1}{n^2} R_L \quad (1.3.9).$$



Слика 1.7. Шематски приказ на трансформатор.

Тоа ќе предизвика течење на струја во обратна насока, што ќе го намали коефициентот на ефикасност на трансформаторот. Бидејќи вредноста на овој пресликан отпор (реактивен отпор) е многу помал од отпорот на примарната намотка, ефикасноста на мрежниот трансформатор е од 80 % до 90 %.

Конструкцијата на трансформаторот зависи од моќноста на потрошувачот, во услови кога за ламинатно феромагнетно јадро со средна вредност на магнетната индукција од 1 Т (тесла), моќноста на потрошувачот, на исправувачот, филтерот и стабилизаторот. Вкупната моќност на трансформаторот се должи на моќноста на примарната намотка и секундарната намотка:

$$P_t = P_{pr} + P_s + P_z \quad (1.3.10),$$

каде што P_{pr} е моќноста на примарната намотка, P_s е моќноста на секундарната намотка и P_z е моќноста која се должи на загубите во јадрото на трансформаторот и загубите во вид на топлина на секундарната намотка. Моќноста на секундарната намотка P_s е дадена со равенката:

$$P_s = V_s \cdot I_{pot} \quad (1.3.11),$$

Од последната равенка се добива ефикасноста на трансформаторот:

$$\eta = \frac{P_s}{P_{pr} + P_z} \quad (1.3.12).$$

1.4. Параметри на мрежен трансформатор

Пресметката на параметрите на трансформаторот зависи од површината на прозорецот W_a во којшто треба да се сместат примарот и секундарот, површината на јадрото A_i , како и површината на трансформаторот A_p , се дадени со равенките:

$$W_a = F \cdot G \quad (1.4.1),$$

$$A_i = D \cdot E \quad (1.4.2), \text{ и}$$

$$A_p = W_a \cdot A \quad (1.4.3).$$

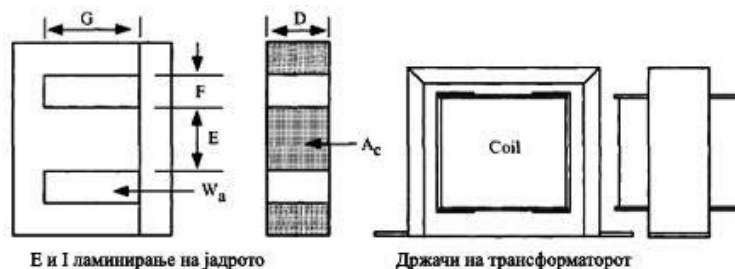
каде што F е ширина на прозорецот, G е должина на прозорецот, D е дебелина (висина) на јадрото и E е ширина на јадрото. Површината на прозорецот на трансформаторот (слика 1.8) е наполно исполнета со бакарна жица на примарот и секундарот, дадена со равенката:

$$K_u W_a = N_p A_{wp} + N_s A_{ws} \quad (1.4.4).$$

каде што A_{wp} е површината на жицата за мотање на примарната намотка, A_{ws} е површината на жицата за мотање на секундарната намотка и K_u е фактор на искористеност на прозорецот којшто ќе биде зафатен од намотките. Всушност, фактор на искористеност на прозорецот е однос на вкупната површина на W_c за сите проводници во сите намотки и вкупната површина за прозорецот е W_a на јадрото:

$$K_u = \frac{W_c}{W_a} \quad (1.4.5).$$

Ако ја дефинираме густината на струјата како струја што тече низ единица површина, тогаш површината на жицата е дадена со равенката:



Слика 1.8. EI ламинатно јадро.

$$A_w = \frac{I}{J} \quad (\text{cm}^2) \quad (1.4.6).$$

Последната равенка може да се напише како:

$$K_u W_a = N_p \left(\frac{I_p}{J} \right) + N_s \left(\frac{I_s}{J} \right) \quad (1.4.7).$$

Од равенките 1.2.13 следува дека:

$$N_p = \frac{V_p \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_{\max} \cdot f \cdot A} \quad (1.4.8) \quad \text{и}$$

$$N_s = \frac{V_s \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_{\max} \cdot f \cdot A} \quad (1.4.9).$$

Ако ги замениме овие изрази во равенката 1.4.7, следува дека:

$$K_u W_a = \frac{V_p \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_{\max} \cdot f \cdot A} \left(\frac{I_p}{J} \right) + \frac{V_s \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_{\max} \cdot f \cdot A} \left(\frac{I_s}{J} \right) \quad (1.4.10).$$

Од последната равенка се добива:

$$W_a A = \frac{[(V_p I_p) + (V_s I_s)] \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_{\max} \cdot J \cdot f \cdot K_u} \quad (1.4.11)$$

или

$$W_a A = \frac{[P_p + P_s] \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_{\max} \cdot J \cdot f \cdot K_u} = \frac{P_t \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_{\max} \cdot J \cdot f \cdot K_u} \quad (1.4.12).$$

Во услови кога се користи исправувач пред потрошувачот, тогаш се зема во обзир и моќноста на исправувачот P_{ispr} :

$$W_a A = \frac{P_t \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_{\max} \cdot J \cdot f \cdot K_u} \quad (1.4.13).$$

Оттука, за параметарот на трансформаторот A_b се добива:

$$A_b = \frac{P_t \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_{\max} \cdot J \cdot f \cdot K_u} \quad (1.4.14).$$

За да се определи колку навивки се потребни за индуцирање на напон од 1 V во секундарот, од равенка (1.3.4) следува дека:

$$\frac{N_s}{V_{s,ef}} = \frac{10^4}{4,44f \cdot \phi_{\max}} = \frac{10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_{\max} \cdot A} \quad (1.4.15).$$

каде што магнетниот флукс е $\phi_{\max} = B_{\max} \cdot A$, притоа за јачина на магнетната индукција се зема 1 T. Оттука за односот број на навивки и потребниот напон се добива:

$$\frac{N_s}{V_{s,ef}} = \frac{45}{A} \quad (1.4.16),$$

каде што A е во cm^2 .

1.5. Изработка на мрежен трансформатор со константен напон

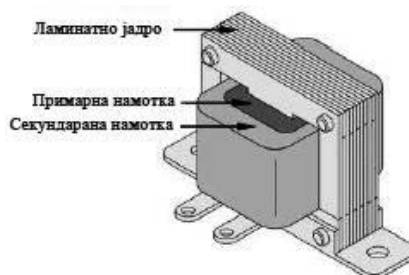
Трансформаторот се состои од две намотки, споени преку магнетски медиум. Двете намотки работат на различно ниво на напон, и намотките се поставени на заедничко јадро (слика 1.9). Едната намотка се напојува со наизменична струја од градската мрежа и се нарекува примарна, притоа напонот се трансформира во друг напон на втората намотка која се вика секундарна намотка. Прозорецот во еднофазен трансформатор содржи една примарна и една секундарна намотка.

Работата на дизајнерот лежи во соодветно определување на прозорецот на рамката, јадро, воздух јаз, намотки, изолација и ладење на трансформаторот. Покрај тоа, ограничувања во дизајнот на трансформаторот се наметнуваат поради:

- заситеност на магнетното поле при течење на големи струи,
- работната температура на трансформаторот,
- дефект на изолацијата при висок напон.

Трансформаторот мора да задоволи неколку услови што треба да бидат исполнети за негова успешна работа. Голем дел од дизајнот зависи од изборот на моќноста на трансформаторот, густината на флукс (B_m), густината на струја (δ) и фактор на искористеност на прозорецот (K_u).

Ако одбереме поголема вредност на густината на флуксот (B_m), површината на јадрото A_i се намалува. Ова ќе го намали дијаметарот на кругот при мотањето на намотките, со што се намалува должината на намотката, така што се заштедува во цената на железо и бакар. Но, многу висока густина на флукс не е можно, ограничувањето е поради загубите на железо-фуколовите струи, заситувањето на магнетната индукција и струјата на магнетизација. Затоа, трансформаторот треба да се дизајнира за пониски загуби во железното јадро, а со тоа се зголемува неговата ефикасност. Исто така, изборот на густина на струјата (J) влијае на загубите од типот I^2R и големината на оптоварувањето за да се добие максимална ефикасност. Дозволените вредности на густината на струјата за трансформатори со мала моќност се приближно $(1,5 - 2,6) \text{ A/mm}^2$.



Слика 1.9. Приказ на трансформатор со EI ламинатно јадро.

За изработка на трансформатор ќе се користи ЕІ ламинатно јадро, дадено на слика 1.8 и слика 1.9. Густината на флуksот одлучува за пресекот на јадрото и неговите загуби. Изборот на густината на флуks зависи од условите на работа на трансформаторот (т.е. дистрибуција или пренос на електрична енергија) и материјалот што се користи за ламинирање на јадрото. Моќните трансформатори се состојат од ламинатно јадро, кои се состои од ладно валани челични лимови легирани со силициум. За пренос на електричната енергија низ градската мрежа се користат енергетски трансформатори со максимална густина на флуks од $B = (1 - 1,4) W_b/m^2$. Електричната моќност на секундарната намотка треба да биде еднаква на моќноста што ја трошат исправувачот, стабилизаторот, филтерот и потрошувачот. Според тоа, моќноста што се добива од секундарната намотка е дадена со равенката:

$$P_s = P_{pot} + P_{isp} \quad (1.5.1).$$

Обично се користи двострано исправена струја, притоа односот од вредноста на правата компонента на струјата I_{pr} и ефективната вредност на струјата I_{ef} е 0,9 ($I_{pr}/I_{ef} = 0,9$), односно $I_{ef}/I_{pr} = 1,1$.

Покрај тоа, за двострано исправена струја моќноста што треба да се даде на исправувачот, е дадена со равенката:

$$P_{isp} = 2(1,1 \cdot I_{pot})^2 \cdot R_{isp} \quad (1.5.2).$$

Во пракса ќе треба да се конструира трансформатор кој ќе дава напон на потрошувачот од 20 V (U_{pot}) и струја од 1 A (I_p). Додека пак, отпорот на исправувачката диода е $R_{isp} = 10 \Omega$, а за филтрирање на напонот се користи капацитативен филтер со отпор $R_f = 0 \Omega$. Вкупната моќност што треба да ја испорачува секундарот на трансформаторот, е дадена со равенката:

$$P_s = 1 \cdot 20 + 2(1,1 \cdot 1)^2 \cdot 10 = 44,2 \text{ W} \quad (1.5.3).$$

Ако земеме дека коефициентот на полезно дејство на трансформаторот е 0,8, тогаш во примарот треба да влегува моќност:

$$P_p = \frac{P_s}{\eta} = \frac{44,2}{0,8} = 55,25 \text{ W} \quad (1.5.4).$$

Вкупната моќност на трансформаторот е дадена со равенката:

$$P_t = P_p + P_s = 55,25 + 44,2 = 99,45 \text{ W} \quad (1.5.5).$$

Оттука, за параметарот на трансформаторот A_p се добива:

$$\begin{aligned} A_p &= \frac{P_t \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_{max} \cdot J \cdot f \cdot K_u} \text{ (cm}^4\text{)} = \frac{99,45 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot 10^2 \cdot 50 \cdot 0,4} = \\ &= \frac{99,45 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot 10^2 \cdot 50 \cdot 0,4} = 74,66 \text{ cm}^4 \end{aligned} \quad (1.5.6),$$

каде што $K_u = 0,4$ е фактор на искористеност на прозорецот за ЕИ трансформатор, $J = 1,5 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$ е густина на струјата и јачината на магнетната индукција се зема 1 Т.

Во нашиот случај површината на прозорецот е дадена со равенката:

$$W_a = F \cdot G = 1,6 \cdot 4,8 = 7,68 \text{ cm}^2 \quad (1.5.7), \text{ и}$$

Од равенката (1.4.3) следува дека површината на јадрото на монофазен трансформатор е дадена со равенката:

$$A = \frac{A_p}{W_a} = \frac{74,66}{7,68} \text{ cm}^2 = 9,72 \text{ cm}^2 \approx 10 \text{ cm}^2 \quad (1.5.8).$$

Висината на пакетот на лимови е определена од следната равенка:

$$h = \frac{A}{E \cdot k} = \frac{10}{3,2 \cdot 0,85} \text{ cm} = 3,7 \text{ cm} \quad (1.5.9)$$

каде што $k = 0,85$ е фактор на полнење.

Покрај тоа, треба да се определи колку навивки треба да се намотаат на секундарот за да се добие напон од 20 волти, со примена на равенка (1.4.15) и (1.4.16) се добива:

$$N_s = V_{s,ef} \cdot \frac{45}{A_i} = 4,5 \text{ V}^{-1} \quad (1.5.10)$$

каде што $A = 10 \cdot \text{cm}^2$ оттука за бројот на навивките во секундарот се добива:

$$N_s = \frac{20}{\sqrt{2}} \cdot 4,5 = 65. \quad (1.5.11).$$

На сличен начин се добива колку навивки се потребни за индуцирање на напон од 1 V во примарот:

$$N_p = 220 \cdot 4,5 = 990. \quad (1.5.12).$$

За да ја пресметаме дебелината на жицата на примарната и секундарната намотка, се користи равенката (1.4.6). За таа цел, земаме дека струјата што тече низ секундарната намотка е 1 А и со примената на равенката (1.4.6) се добива:

$$A_{ws} = \frac{I_s}{J} = \frac{1}{1,5} \text{ mm}^2 = 0,67 \text{ mm}^2 \quad (1.5.13).$$

Бидејќи пречникот на жицата е кружен, тогаш следува дека:

$$A_{ws} = \frac{\pi d_s^2}{4} = 0,67 \text{ mm}^2 \quad (1.5.14).$$

$$d_s = \sqrt{\frac{4A_{ws}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,67}{\pi}} \text{ mm} = 0,92 \text{ mm} \approx 0,9 \text{ mm} \quad (1.5.15).$$

Бидејќи висината на прозорецот на ламинатното јадро е 4,8 см, следува дека во еден слој може да се сместат максимум 52 навивки на

секундарната намотка. Тоа значи дека секундарната намотка може да се смести во два слоја на навивки.

Од друга страна, струјата што тече низ примарната намотка се одредува од односот на моќност на примарната намотка на трансформаторот и напонот на примарот:

$$I_p = \frac{P_p}{U_p} = \frac{55,25}{220} \frac{W}{V} = 0,25 \text{ A} \quad (1.5.16).$$

Додека пак, површината на жицата во примарната намотка е дадена со равенката:

$$A_{wp} = \frac{I_p}{j} = \frac{0,25}{1,5} \text{ mm}^2 = 0,16 \text{ mm}^2 \quad (1.5.17).$$

Оттука, за дебелината на жицата на примарната намотка се добива:

$$d_p = \sqrt{\frac{4A_{wp}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,16}{\pi}} \text{ mm} = 0,46 \text{ mm} \approx 0,5 \text{ mm} \quad (1.5.18).$$

Во еден слој може да се сместат максимум 96 навивки на примарната намотка. Тоа значи дека примарната намотка може да се смести во 11 слоја на навивки, притоа секој слој е покриен со изолаторска хартија за трансформатори. Во пракса тоа не се прави, бидејќи се смета дека лакот со кој е покриена секоја од жиците на примарната и секундарната намотка е доволен за електрична изолација.

На крајот може да извршиме проверка или пресметка на фактор на искористеност на прозорецот (K_u). Имено ако земе дека имаме 11 слоја од примарните навивки, тогаш нивната дебелина е 5,5 mm, а дебелината на два слоја на секундарните навивки е 2 mm, или вкупно имаме 7,5 mm дебелина на жиците.

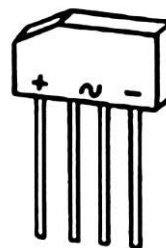
Оттука за фактор на искористеност на прозорецот (K_u) се добива како однос на вкупната површина на W_c за сите проводници во сите намотки и вкупната површина за прозорецот е W_a на јадрото:

$$K_u = \frac{W_c}{W_a} = \frac{(n \cdot d_p + m \cdot d_s) \cdot G}{F \cdot G} = \frac{(n \cdot d_p + m \cdot d_s)}{F} = \frac{7,5}{16} = 0,46 \quad (1.5.19)$$

каде што n е број на слоеви на примарната намотка и m е број на слоеви на секундарната намотка. Добиената вредност фактор на искористеност на прозорецот (K_u) е приближно исто со претходните пресметки.

1.6. Електронски регулатор на напон

За напојување и работа на уредите се користи регулатор на напонот. Во зависност од намената, напонските регулатори можат да бидат линеарни и прекинувачки регулатори. Линеарните регулатори можат да бидат направени во дискретна техника, а во поново време се прават во интегрирана техника. Линеарен регулатор на напон има повратна врска со излезниот напон на потрошувачот и го прилагодува излезниот напон кој е потребен на потрошувачот. Всушност, регулаторот на напон има отпор нула, така што дадениот потрошувач не го менува напонот на изворот. Оттука, струјата што тече низ потрошувачот ќе зависи од параметрите на потрошувачот, во определено подрачје на напон и струја. Покрај тоа, за уредот да биде извор на константен напон треба да поседува трансформатор, т.е. за претворба на напонот од мрежата на потребната вредност на напонот. Најпрво, наизменичниот напон од секундарната намотка на трансформаторот се претвара во прав напон, со помош на исправувачка диода или со уред – Грецов спој, којшто претставува спој на четири диоди во интегрирана техника. Нерегулиран напон се добива од Грецов спој, којшто се користи во изворите на прав (DC) напон, притоа на неговиот влез се донесува наизменичен (AC) напон (слика 1.10).



Слика 1.10. Грецов спој

Добиениот напон после Грецовиот спој е прав, со извесно бранувања на напонот. За да се намали тоа бранување на напонот, се користи капацитивен филтер, со паралелно поврзување на кондензатор со голем капацитет, помеѓу двата вода. Меѓутоа, со менување на оптоварувањето, т.е. со менување на моќноста на потрошувачот се менува струјата и напонот што тече низ него. Така, при зголемување на струјата низ потрошувачот се намалува напонот на краевите на потрошувачот и обратно. Меѓутоа, вредноста на напонот на краевите на потрошувачот може да се намали толку многу што ќе биде надвор од работното подрачје на потрошувачот. Затоа се користи линеарен регулатор на напон којшто ќе го одржува напонот на константна вредност, во одредени граници на струјата, што тече низ потрошувачот. Линеарниот регулатор на напон може да биде изведен со Зенер диода, транзистор, интегрално коло или комбинација од нив.

Обично, елементите за регулација на напонот како што се Зенер диода или транзистор може да се поврзани сериски или паралелно со потрошувачот. Затоа, линеарните регулатори на напон може да биде

сериски (слика 1.11 а), паралелен (шунтирачки – слика 1.11 б) и прекинувачки регулатор (слика 1.11 в).

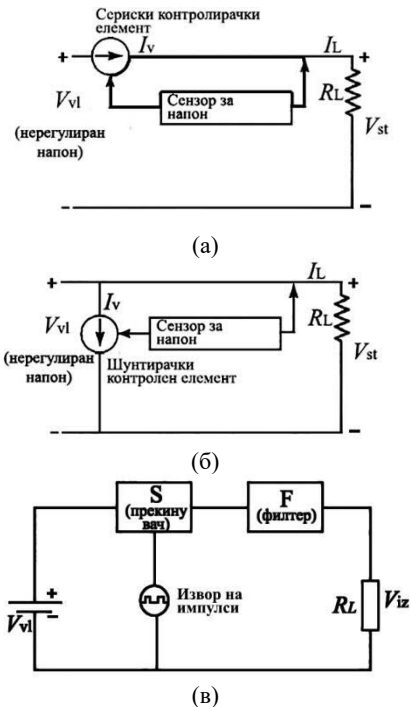
За серискиот регулатор на напонот обично се користи транзистор којшто е сериски поврзан во серија со нерегулиранит прав (DC) напон и потрошувачот. Излезниот напон зависи од падот на напонот на транзистор, и служи за напојување на потрошувачот. Линеарната регулација може да биде со фиксен или променлив излезен напон, притоа се остварува со позитивна или негативна повратна врска.

Додека пак, при примена на шунтирачкиот регулатор транзисторот за регулација на напонот е поврзан паралелно со потрошувачот. Исто така, за контрола на напонот се користи Зенер диода, како референтен извор на напон. Од друга страна, напонскиот прекинувачки регулатор дава напон кога транзисторот е спроводен, што зависи од изворот на импулси. Во случај, кога импулсот ја поларизира базата така што транзисторот да е во спроводна состојба, тогаш излезниот напон ќе биде даден со равенката:

$$V_{iz} = \frac{t_{ON}}{T} \cdot V_{vl} \quad (1.6.1)$$

каде што t_{ON} е времето за кое транзисторот е во спроводна состојба и T вкупното време на траење на еден импулс. Во серија со уредот за регулација на напонот е поврзан филтер. Во случај на поставување на кондензатор за филтрирање на напонот, тогаш правиот напон не може да помине низ кондензаторот и на излезот се добива наизменичен напон (AC). Затоа се прави филтер од комбинација на отпорник R , индуктивитет L или кондензатор C .

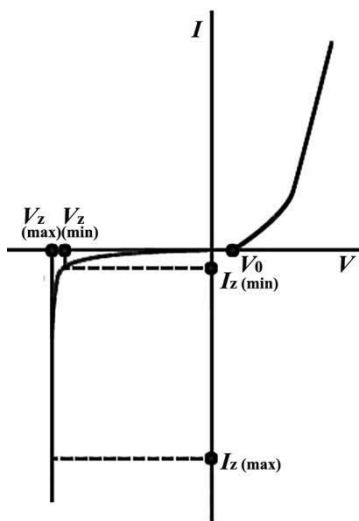
Бидејќи како референтен извор на напон се користи Зенер диодата, од интерес е да се знае нејзината волт-амперска карактеристика (слика 1.12). Во пропусна насока Зенер диодата пушта струја за напон поголем од V_0 . Во уредите за напонска регулација на напонот Зенер диодата се поларизира во непропусна насока. При одреден негативен напон $V_{z(min)}$ струјата што тече низ диодата е минимална $I_{z(min)}$, додека за $V_{z(max)}$ струјата што тече низ диодата е



Слика 1.11. Шематски приказ на напонски регулатор.

максимална $I_{z(\max)}$. Интервалот помеѓу напонот $V_{z(\min)}$ и $V_{z(\max)}$ е многу мал, притоа може да се земе дека е напонот е константен на Зенер диодата V_z , бидејќи разликата $\Delta V_z = (V_{z(\max)} - V_{z(\min)})$ може да се занемари. За работно подрачје на диодата се избира точката на средината, помеѓу минимална $I_{z(\min)}$ и максимална $I_{z(\max)}$ струја, дадено со равенката:

$$I_z = \frac{I_{z(\max)} - I_{z(\min)}}{2} \quad (1.6.2)$$

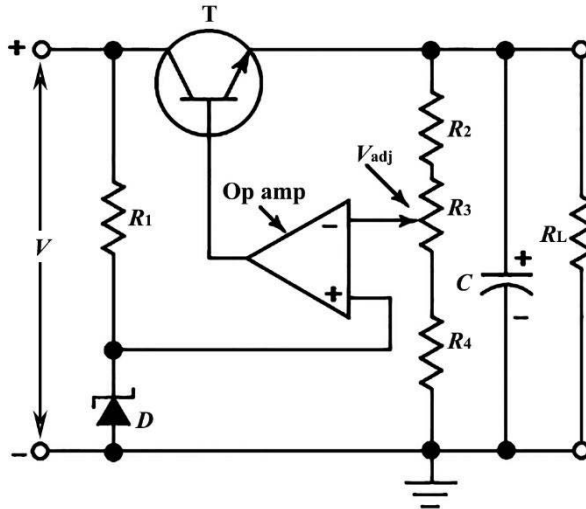


Слика 1.12. I - V карактеристика на Зенер диода.

1.7. Современи уреди за електронска регулација на напонот

Од друга страна, стабилизаторот на напон може да направи повратна врска помеѓу излезниот и нерегулираниот влезен напон. Имено, за контрола на стабилизираниот излезен напон се користи операциски засилувач како компаратор, за споредба на влезниот нерегулиран напон и излезниот напон. Регулаторите со отворено електрично коло, каде што регулацијата на напонот зависи од излезниот (стабилизирани) напон, притоа не може да се обезбеди стабилен излезен напон, при големи промени на струјата низ потрошувачот. За таа цел, се користи повратна врска за прецизна регулацијата на напонот. Сепак, се користи контролен уред којшто ќе ја вклучи повратната врска и ќе го прилагоди напонот на краевите на потрошувачот. Исто така, контролниот уред (зенер диода) се користи како референтен извор на напон и се донесува на еден од влезите на операцискиот засилувач на грешка (компаратор). На другиот влез на операцискиот засилувач е напонот којшто го дава повратна врска од потрошувачот. Операцискиот засилувач врши споредба на напонот од повратна врска од потрошувачот (R_L) со референтниот напон. При промена на моќноста на потрошувачот доведува до промена на напонот на неговите краеве, притоа ќе се создаде разлика помеѓу напонот на влезот на операцискиот засилувач, којшто претставува грешка. Затоа, засилувачот ја засилува оваа разлика и го прилагодува напонот според напонот кој го дава

контролниот уред, со цел да се намали ова разлика – грешка во излезниот напон. Ако излезниот напон опаѓа или расте поради промена на моќноста на потрошувачот, се регистрира разлика – грешка помеѓу контролниот уред и напонот од повратна врска со потрошувачот. За таа цел, се користи операциски засилувач со голем коефициент на засилување и повратната врска ќе овозможи стабилизација на излезниот



Слика 1.13. Примена на операциски засилувач со повратна врска за регулирање на напонот.

напон (слика 1.13). Регулација на излезниот напон ќе се обезбеди и при мали промени во напонот од повратната врска, поради големиот коефициент на засилување на операцискиот засилувач. Референтниот напон е поврзан за неинвертирачки влез на операцискиот засилувач, при што зависи од отпорникот R_1 и Зенер диодата. Додека пак, напонот којшто треба да се прилагодува, т.е. излезен напон, се контролира со повратната врска, преку делителот на напон составен од отпорниците R_2 , R_3 и R_4 . Ако излезниот напон се намали, тогаш ќе намали на напонот при инвертирачкиот влез на операцискиот засилувач, притоа излезниот напон на операцискиот засилувач ќе се зголеми, во позитивна насока. Овој напон се донесува на базата на емитерски засилувач (следач) којшто ќе придонесе за зголемување на напонот на емитерот, а со тоа и на краевите на потрошувачот. Ситуацијата е обратна, при зголемување на излезниот напон, преку повратната врска ќе се зголеми и напонот на инвертирачкиот влез на операцискиот засилувач. Оттука, операциониот засилувач со повратна врска може да ги регулира промените на излезниот напон во опсег од неколку милivolти, притоа вредноста на излезниот напон е одреден од референтниот извор на напон. Со промена на вредноста на потенциометарот R_3 може да се постави саканата вредност на излезниот напон. Во уредите коишто служат како извор на

напон, потенциометарот R_3 се поставува на предната страна или задната страна на уредот, за прилагодување на излезниот напон.

Од друга страна, во поново време се користи интегрирано коло како референтен извор на напон, наместо Зенер диодата. Овие интегрирани кола се нарекуваат прилагодливи регулатори на напон или програмабилни референтни напонски кола.

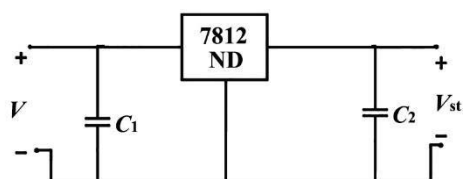
Меѓутоа, насока во електрониката е да се интегрираат повеќето уреди во едно интегрално коло за да се заштеди на простор и време на монтажа. За таа цел, се користи регулатор со константен (фиксен) напон со три електроди, каде што на влезот се донесува нерегулираниот напон, а на излезот е прав напон, притоа третата електрода е заземјена (слика 1.14). Овој регулатор на напон е направен во интегрирана техника, каде што сите елементи се сместени на

една плочка со три електроди. Ознака на овие регулатори на фиксен напон почнува со бројките 78, а последните бројки го покажуваат стабилизираниот напон, за кои е наменет и изнесува од 5 V до 24 V. Нерегулираниот напон V се филтрира со кондензаторот со

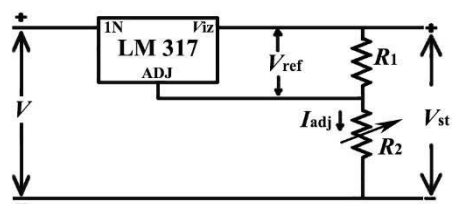
капацитет C_1 и се поврзува со интегралното коло (IC) на влезната електрода. Од друга страна, излезната електрода на интегралното коло (IC) обезбедува прав напон +12 V при струи на оптоварување до 1,5 A, а промените на излезниот напон се во опсег од 12 mV, и е филтриран со кондензаторот C_2 (слика 1.14).

Додека пак, третата електрода на интегралното коло е заземјена, притоа влезниот напон може да се менува во одредени граници на напонот. Исто така, моќноста на потрошувачот може да се менува во одредени граници за да остане излезниот напон константен, во граници на дозволените промени на напонот.

Друг вид регулатор на напон е регулатор на напон со прилагодување, којшто овозможува поставување на посакуваната вредност на регулираната вредност на излезниот напон (слика 1.15). За таа цел, прилагодувањето на регулираниот напон во опсегот на прилагодување (1,2 V – 37 V), а се прави со повратна врска на регулирниот излезен напон, со помош на отпорниците R_1 и R_2 , е дадено со равенката:



Слика 1.14. Регулатор со константен (фиксен) напон, изведен со интегрално коло.



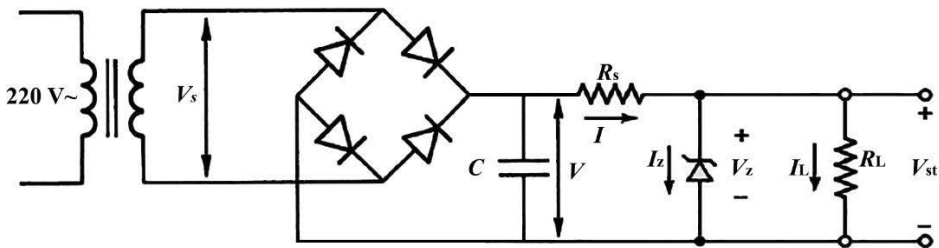
Слика 1.15. Регулатор со прилагодување на напонот, изведен со интегрално коло.

$$V_{st} = V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{adj} \cdot R_2 \quad (1.7.1)$$

1.8. Електрично коло за регулација на напонот

Во инверзна насока на поларизирање на Зенер диода напонот останува константен, а струјата се менува значително со мала промена на напонот. Затоа, Зенер диодата може да се користи како стабилизатор на напонот, за вредности на струите од ред на големина на милиампери. Од друга страна тоа овозможува Зенер диодата да се користи како референтен извор на напон за уреди кои ќе служат како стабилизатори на напонот, при течење на струи од ред на големина на ампери.

На слика 1.11 се гледа дека пробивниот напон на Зенер диодата е речиси константен во широк опсег на струи, при инверзна пола-



Слика 1.16. Електрично коло за регулација на напонот со Зенер диода.

ризација на диодата. Тоа овозможува Зенер диодата да се користи за регулатор на напон, во коло со константен напон. За таа цел, се користи електрично коло со сериски споени отпорник и Зенер диода (слика 1.16) која е поларизирана во инверзна насока. Излезниот напон се добива на краевите на Зенер диодата, којшто треба да биде стабилен во одредени граници на течење на струјата, затоа што течењето на голема струја доведува до голем пад на напонот на отпорникот R_s . Обично, стабилноста на напонот на краевите на зенер диодата зависи од течењето на струјата низ диодата, и изнесува од ред на големина милиампери (mA). Вредноста на отпорникот R_s се пресметува со равенката:

$$R_s = \frac{2(V - V_z)}{I_{z(max)} - I_{z(min)}} \quad (1.8.1),$$

каде што V е нерегулираниот напон и V_z е пробивниот напон на Зенер диодата. Последната равенка важи кога немаме споено потрошувач, но дозволува да се одреди вредноста на отпорникот R_s .

Во случај на приклучување на потрошувач ќе се зголеми струјата што тече низ отпорникот R_s , а со тоа се намалува стабилизацијата на напонот, поради течење на голема струја низ отпорникот R_s . Покрај тоа, треба нерегулираниот напон V да биде поголем од напонот на диодата V_z , така што диодата не спроведува струја кога влезниот напон е помал од Зенер пробивен напон на диодата. Вредноста на R_s се одредува од равенката 1.8.1 притоа Зенер додата треба да работи под вредноста на пробивниот напон, којшто е точно одреден за дадена Зенер диода и е во опсег од 1,2 V до 200 V. Регулаторот на напон треба да обезбеди постојан излезен напон, без разлика на промената на нерегулираниот напон V или промена на струјата I_L , која тече низ потрошувачот. Регулацијата на напонот се одвива при мали промени на напонот на Зенер диодата, притоа на струјата се случуваат големи промени, а со тоа се зголемува или се намалува падот на напонот на отпорникот R_s . Вкупната струја што тече низ колото е дадена со равенката:

$$I = I_z + I_L = \frac{I_{z(\max)} - I_{z(\min)}}{2} + \frac{V_z}{R_L} \quad (1.8.2).$$

Струите што течат низ потрошувачот и диодата се дадени со равенките:

$$I_L = \frac{V_z}{R_L} \quad (1.8.3).$$

$$I_z = \frac{V - V_z}{R_s} \quad (1.8.4).$$

Оттука, за струјата што тече низ колото е дадена со равенката:

$$I = \frac{V - V_z}{R_s} + \frac{V_z}{R_L} = \frac{V}{R_s} - V_z \left(\frac{1}{R_s} - \frac{1}{R_L} \right) = \frac{V}{R_s} - V_z \left(\frac{R_L - R_s}{R_s R_L} \right) \quad (1.8.5).$$

За да работи Зенер диодата како стабилизатор на напон, треба $R_L \gg R_s$, притоа се добива:

$$I = \frac{V - V_z}{R_s} \quad (1.8.6).$$

Во зависност од промената на нерегулираниот напон или отпорот на потрошувачот, постојат два вида регулација на напонот:

- линиска регулација, каде што се врши регулација на променливиот влезен напон, при константна моќност на потрошувачот, и
- регулација на напонот со промена на отпорот на потрошувачот.

Најпрво ќе го разгледаме случајот на константна моќност на потрошувачот, притоа стабилизаторот треба да врши линиска регулација на напонот (слика 1.16). Кога нерегулираниот напон V е поголем од пробивниот напон на Зенер диодата V_z , тогаш се зголемува струјата што тече низ диодата, притоа работното подрачје на Зенер диодата е во опсег од $I_{z(\min)}$ до $I_{z(\max)}$. Струјата што тече низ потрошувачот е

константна, бидејќи не го менува отпорот и напонот на неговите краеве е константен. При зголемување на нерегулираниот напон V се зголемува струјата што тече низ диодата, дадено со равенката:

$$I_{(\max)} = I_{z(\max)} + I_L \quad (1.8.7),$$

а тоа доведува до зголемување на струјата што тече низ отпорникот R_s притоа се зголемува падот на напонот на отпорникот R_s . Оттука, вредноста на максималниот нерегулиран напон $V_{(\max)}$ е дадена со равенката:

$$V_{(\max)} = I_{(\max)} \cdot R_s + V_z \quad (1.8.8),$$

Ако струјата $I_{(\max)}$ е многу голема, тоа ќе предзвика голем пад на напонот, така што напонот на краевите на Зенер диодата ќе биде под вредноста на нејзиниот пробивен напон и нема да може да врши регулација на напонот. Додека пак, со намалување на нерегулираниот напон V , притоа напонот секогаш е поголем од напонот на краевите на Зенер диодата V_z којшто може да се смета за константен, тогаш се намалува и падот на напонот на отпорникот R_s , поради намалување на струјата низ отпорникот R_s . Во случај, кога нерегулираниот напон $V_{(\min)}$ е ист со напонот на напонот на краевите на потрошувачот R_L и на краевите на Зенер додата, даден со равенката:

$$V_L = V_z = \frac{R_L V_{(\min)}}{R_s + R_L} \quad (1.8.9),$$

како делител на напон (слика 1.16). Оттука, вредноста на минималниот нерегулиран напон $V_{(\min)}$ што треба е на влезот на стабилизаторот е даден со равенката:

$$V_{(\min)} = \frac{(R_s + R_L) \cdot V_z}{R_L} = \left(1 + \frac{R_s}{R_L}\right) \cdot V_z \quad (1.8.10),$$

Од последната равенка се гледа дека минималната вредност на нерегулираниот напон $V_{(\min)}$ е иста со напонот на напонот на краевите на Зенер додата, доколку вредноста на отпорот на потрошувачот R_L е многу поголема од вредноста на отпорникот R_s .

Од друга страна, регулација на напонот може да се врши и со промена на отпорот на потрошувачот. Имено, поради различни причини може отпорот, т.е моќноста на потрошувачот да се менува при што се менува струјата што тече низ него. При зголемување на струјата од I_L што тече низ потрошувачот се зголемува струјата низ отпорникот R_s , а со наголемување на падот на напонот на отпорникот R_s и намалување на струјата од I_L што тече низ потрошувачот. На тој начин, напонот на краевите на потрошувачот останува константен и се вика регулација на напонот со промена на отпорот на потрошувачот. Минималниот отпор

на потрошувачот $R_{L(\min)}$ при што напонот на диодата е ист со напонот на потрошувачот, е даден со равенките:

$$V_L = V_z = \frac{R_{L(\min)} V}{R_s + R_{L(\min)}} \quad (1.8.11),$$

$$R_{L(\min)} = \frac{R_s \cdot V_z}{V - V_z} \quad (1.8.12),$$

$$I_{L(\max)} = \frac{V_z}{R_{L(\min)}} \quad (1.8.13),$$

Во случај, кога потрошувачот не е поврзан со диодата, тогаш целата струја ќе тече низ диодата, што ќе придонесе за загревање на диодата. Енергијата што се ослободува во единица време на диодата е дадена со равенката:

$$P_D = V_z \cdot I_{z(\max)} = 7 \cdot 0,1 \approx 1 \text{ W} \quad (1.8.14),$$

каде што е избрано да $V_z=7\text{V}$ и максимална струја од $I_{z(\max)}=100 \text{ mA}$, кои се одредени од волт-амперската карактеристика на Зенер диодата и отпорникот R_s .

Додека, максималната вредност на отпор на потрошувачот $R_{L(\max)}$ е даден со равенката:

$$R_{L(\max)} = \frac{V_z}{I_{L(\min)}} \quad (1.8.15).$$

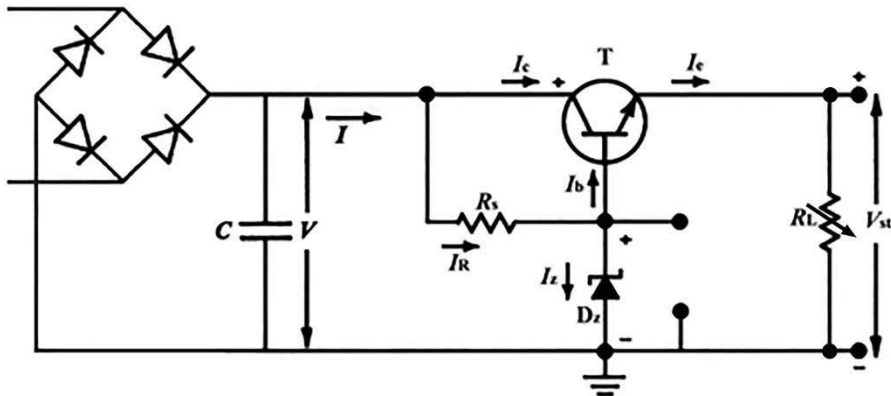
1.9. Изработка на електронски регулатор на напон

Треба да се направи стабилизатор на напон со Зенер диода и со транзистор, каде што Зенер додата ќе биде референтен извор на напон. За изработка на стабилизаторот со Зенер диода и транзистор се прави електрично коло како на слика 1.17. За напојување на уредот се користи напонот од трансформатор, којшто се носи на Гретцов спој и после тоа се филтрира со кондензатор, со капацитет од $1000 \mu\text{F}$. Напонот кој се добива после филтерот, треба да биде поголем од пробивниот напон на Зенер диодата и се означува со V . Со цел да се намалат загубите на енергијата што се ослободува во единица време на диодата, се прави електрично коло како на слика 1.17, кое се вика засилувач со Зенеров регулатор. За таа цел, се користи Зенер диодата за регулирање на напонот за напојување на транзистор со голема моќност, т.н. транзистор со сериско поврзување. Ако постои константен пад на напонот од $0,7 \text{ V}$ помеѓу базата и емитерот на транзисторот, тогаш напонот на емитерот и на краевите на потрошувачот ќе биде константен. Струјата што тече

низ базата на транзисторот, за спој со заземјен емитер е дадена со равенката:

$$I_b = \frac{I_e}{1 + \beta} = \frac{1 \cdot A}{20} = 0,05 \text{ A} \quad (1.9.1),$$

каде што β е коефициент на струјно засилување на транзистор 2N3055, а струјата што тече низ емитерот е $I_e = 1 \text{ A}$. Од друга страна, струјата што тече низ Зенеровата диода I_z треба да биде половина од вредноста на базната струја ($I_z = 25 \text{ mA}$). Ако земеме дека вредноста на



Слика 1.17. Електрично коло за регулација на напонот со транзистор.

нерегулираниот прав напон на краевите на Грецовиот спој (кондензатор) е 16 V , а пробивниот напон на диодата е 7 V , вредноста на отпорникот R_s се одредува со равенката 1.8.4 и е даден со равенката:

$$R_s = \frac{V - V_z}{I_b + I_z} = \frac{(16 - 7) \cdot V}{0,075 \cdot A} = 120 \ \Omega \quad (1.9.2),$$

притоа треба да биде во согласност со вредноста на отпорникот R_s одредена од волт-амперската карактеристика.

Всушност, транзисторот е емитерски засилувач, со негативна повратна врска. Ако се зголеми нерегулираниот напон V поради која било причина, тоа ќе доведе до зголемување на струјата I , а со тоа и до зголемување на струјата I_R и последователно зголемување на падот на напонот на отпорникот R_s . На тој начин, се одржува константен напон на базата. Бидејќи се работи за емитерски засилувач којшто го следи базниот напон, следува дека напонот на емитерот ќе биде константен во однос на негативниот пол. Ситуацијата е спротивна во случај кога имаме намалување на нерегулираниот напон V .

Најпрво се одредува волт-амперската карактеристика на Зенер диодата во непропусна насока која треба да биде слична како на слика 1.11. Се испитува волт-амперската карактеристика на диодата до вредности на струјата до 100 mA . Резултатите се претставуваат

табеларно и графички, при што на x -оската се нанесува напонот на инверзна поларизација на Зенер диодата, а на y -оската вредноста на струјата. Вредноста на отпорникот R_s се одредува со равенката 1.8.1, додека вредностите на струјата што тече низ диодата $I_{z(\min)}$ и $I_{z(\max)}$, како и пробивниот напон V_z се отчитуваат од волт-амперската карактеристика на Зенер диодата.

Потоа се прави шема на колото на лист хартија, според големината на плочката од каширан пертинакс. Исто така, водовите од колото може да се нацртаат на компјутер и да се печатат на обична хартија, притоа се проверува просторната распределба на елементите на колото. Треба да се води сметка за распоредот на ножињата на транзисторот и на Грецовиот спој, затоа што елементите ќе треба да се постават од спротивната страна на бакарната фолија, на кашираниот пертинакс. Може нацртаната слика на бел лист хартија да се фотографира со мобилен телефон и да се пренесе на компјутер. Исто така, може шемата за водовите на печатената плочка да се нацрта со програмот Adobe Photoshop или со софтвер за шеми на печатена плочка, на пример Eagle. Покрај тоа, сликата од мобилниот телефон може да се доработи со програмот Adobe Photoshop, да се зголеми или намали дебелината на водовите кои треба да бидат со црна боја. Големината на сликата се контролира со алатката *слика* (Image) и опцијата *големина на сликата* (Image size). Откако ќе се утврди правилниот распоред, потоа се печати електронската шема со ласерски принтер на термална хартија, на страната каде што хартијата е мазна, т.е. има слој со термално лепило. Термалната фолија се поставува на страната на бакарната фолија на каширан пертинакс и се врши ламинација со пегла или со ламинатор. Имено, ламинацијата е рамномерно загревање на термалната фолија врз бакарната фолија од каширан пертинакс, на температура од 160 °C и за време од 1 минута. Веднаш потоа се одлепува термалната фолија, притоа печатените водови остануваат на бакарната фолија од каширан пертинакс. За нагризување на бакарот може да се користи воден раствор на ферихлорид хексахидрат (40 % $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) или воден раствор од хлороводородна киселина и водороден пероксид (30 ml 9,5 M на HCl, 10 ml 34 M на H_2O_2 и 100 ml на H_2O). После нагризувањето плочката се става во развивач (ацетон), за да се отстрани преостанатиот тонер (црната боја на водовите). На крајот остануваат бакарните водови, според сликата на маската. За поставување на електронските уреди на печатената плочка се прават дупчиња каде што ќе се сместат нозете на електронските уреди. Откако ќе се постават електронските уреди во дупчињата, се пристапува кон залемување коешто се состои од топење на калај на местото каде што се поставени електронските уреди, со користење на калофониум, по потреба. Елементите се свртени со своите ножиња кон бакарните водови, притоа тие се поврзуваат со печатеното

коло, со залемување. Процесот на залемување се состои од топење на калај на местото каде што се поставени електронските уреди и поврзување со печатеното коло, со правење на легура на самата плоча при изладување на калајот. Всушност, зацрстувањето на елементите и електричниот контакт со печатената плоча се прави со залемување.

Потоа се испитува волт-амперската карактеристика стабилизатор изведен со Зенер диода, за различни вредности на потрошувач со отпор R_L (слика 1.16), без да се поврзува транзисторот или воопшто не се поставува. Резултатите се претставуваат табеларно и графички, притоа на x -оската се нанесува напонот на краевите на Зенер диодата, а на y -оската вредноста на струјата.

На крајот се испитува волт-амперската карактеристика на стабилизатор изведен со транзистор, каде што како референтен извор на напон се користи Зенер диода, а помеѓу емитерот на транзисторот и базата се поврзува потрошувач со отпор R_L (слика 1.17). Во овој случај, транзисторот се користи како емитерски засилувач, при што напонот на емитерот ќе зависи од базата. Напонот на краевите на Зенер диодата е во исто време и напон на базата, така што Зенер диодата има улога на референтен извор на напон. Кај емитерскиот засилувач напонот на емитерот го следи напонот на базата, но не може да биде поголем од напонот на базата. Меѓутоа, кога транзисторот е во спроводна состојба, струјата што тече ќе биде од ред на големина на ампери. За транзистор се користи 2N3055, којшто овозможува течење на голема струја помеѓу колекторот и емитерот, дадено со равенките:

$$V_{st} = V - V_{ce} \quad (1.9.3), \text{ и}$$

$$V_{st} = V_z - V_{be} \quad (1.9.4).$$

$$I_R = I_b + I_z \quad (1.9.5).$$

Од последната равенка следува дека струјата низ отпорникот R_s е сума на базната струја (I_b) и струја низ Зенеровата диода I_z . Во случај да се зголеми струјата низ диодата I_z , тогаш се намалува струјата низ базата I_b и обратно. Резултатите се претставуваат табеларно и графички, притоа на x -оската се нанесува напонот на краевите на потрошувачот, а на y -оската вредноста на струјата.

1.10. Претвораќ од прав напон/прав напон (DC/DC) со повратна врска

Претвораќи од прав напон со одредени карактеристики во прав (DC/DC) напон со други карактеристики се значаен предмет во истражување и индустриски примени. DC/DC претвораќите се користат во комуникациска опрема, паметните телефони, дигитални фотоапарати, компјутерски хардверски кола, стоматолошки апарати и други примени во индустриски уреди. Во случај кога немаме мрежен напон, кај некои уреди имам потреба од висок прав напон, како што е преносен Гајгер-Милеровиот бројач.

Класичните DC/DC претвораќи се состојат од трансформатор и кондензатори, така што нивните димензии се големи. Од инженерски дизајн, претвораќот кој е составен од само индуктор или кондензатор, треба да биде со мали димензии и способен да ја зголеми густината на моќноста.

Прва генерација DC/DC претвораќи се класични или традиционални претвораќи, бидејќи тие работат во режим каде струјата и напонот се менуваат во еден квадрант од координатниот систем и се со ниска моќност, до 100 W.

Додека пак, претвораќите од втората генерација извршуваат операции во два квадранта, во опсег на средна излезна моќност од стотици вати до киловати, како што се претвораќи за DC мотор. Сепак, и овие претвораќи се направени од кондензатори и трансформатор, така што се гломазни. Од друга страна, прекинувачи од третата генерација се кондензаторски DC/DC претвораќи или прекинувачки индукторски DC/DC претвораќи. Тие извршуваат операции во два квадранта или четири квадранта и се со голема излезна моќност, околу 1000 W.

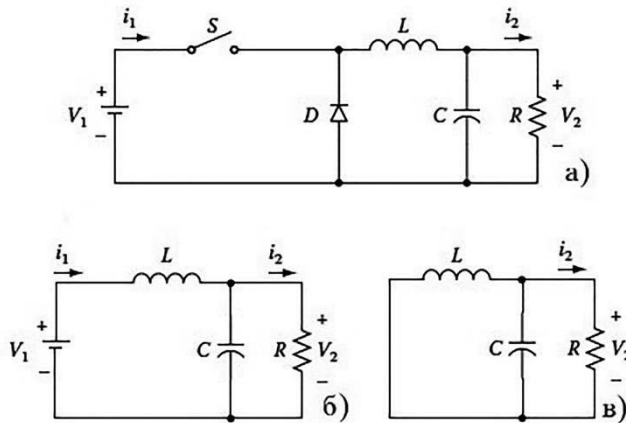
Во принцип, DC/DC претвораќи се состојат од два дела, основно коло и елемент за регулирање на уредот. Основното коло се состои од прекинувачи како што се транзистор, диода, трансформатор и кондензатор. Елементот за регулирање може да биде тајмер 555, осцилаторно коло, бистабилен мултивибратор и повратна врска која ќе обезбеди прекин на работата на основното коло. Со вклучување и исклучување на прекинувачите се контролира потребна количина енергија за пренесување и се користи филтер со ниска фреквенција, пред потрошувачот. На овој начин, излезниот напон е пропорционален на односот на времето кога е вклучен и исклучен прекинувачот. Всушност, излезниот напон е контролиран од основното коло и уредот за контрола, односно времето на прекин на напонот (CB).

Карактеристики на претвораќите се влезниот напон V_1 или V_I (V_n) и излезна напон V_2 или V_{II} (V_o), влезната струја I_1 или I_I (I_n), излезна струја I_2 или I_{II} (I_o), фреквенција на прекин f и период на прекин $T =$

1/f. Додека пак, работниот циклус на извршување/пауза е D , или $D = \frac{t_1}{t_1 + t_2}$ е односот од времето кога е вклучен уредот за испорака на

енергија во излезниот круг и времето на траење на импулсот за период T , притоа вредноста на D е во опсегот од $0 < D < 1$.

Техниката за промена на напонот се применува во периодично прекинувачко коло. Обично, кондензаторот се наполнува за време на негово вклучување во одредено коло со одреден напон, т.е. напонот на изворот. Овој напон на полнење на кондензаторот може да го достигне излезниот напон, при исклучување. Затоа, излезниот напон може да се зголеми за некоја вредност, поради присуство на кондензаторот во излезниот круг (слика 1.18 а). Меѓутоа, диодата овозможува течење на струјата во една насока.



Слика 1.18. Претворувач од прав напон/прав напон (DC/DC): а) еквивалентно круг на претворувачот, б) претворувач при вклучување и в) претворувач при исклучување.

Кога прекинувачот S е вклучен, струјата во индуктивната намотка се зголемува (слика 1.18 б и в), притоа диодата е поларизирана во инверзна насока и низ неа не тече струја. За лесна анализа ќе земеме прав напон кој го полни кондензаторот C до напон $V_C = V_2$. Од вториот Кирхов закон следува дека:

$$V_1 = V_L + V_C = L \frac{di_L}{dt} + V_C \quad (1.10.1)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_1 - V_C}{L} = \frac{V_1 - V_2}{L} \quad (1.10.2)$$

За време од DT , струјата во индуктивна намотка се зголемува при константен наклон $(V_1 - V_2)/L$, што е прикажано на слика 1.19. Струјата во индуктивна намотка започнува на почеток има вредност I_{\min} и се

променува до максимална вредност I_{\max} , на крајот од периодот на затворање на прекинувачот.

Бидејќи изводот е константа и има позитивна вредност, струјата расте линеарно со времето и прирастот има конечна вредност:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{V_1 - V_2}{L} \quad (1.10.3)$$

$$(\Delta i_L)_{cl} = \frac{V_1 - V_2}{L} DT \quad (1.10.4),$$

каде што $V_c = V_2$.

Кога прекинувачот е исклучен, се индуцира струја во обратна насока притоа тече низ диодата, а струјата во индуктивна намотка се намалува. Во тој случај имаме:

$$V_L = -V_2 = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.10.5)$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_2}{L} \quad (1.10.6)$$

Бидејќи изводот е константа и има негативна вредност, струјата опаѓа линеарно со времето и прирастот има конечна вредност. Промената на струјата е дадена со равенката:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = -\frac{V_2}{L} \quad (1.10.7)$$

$$(\Delta i_L)_{op} = -\frac{V_2}{L}(1-D)T \quad (1.10.8)$$

Претворабот за да работи во стабилна состојба, треба струјата низ намотката на крајот на прекинот да е еднаква на почетокот. Всушност, промената на струјата за еден циклус треба да биде нула.

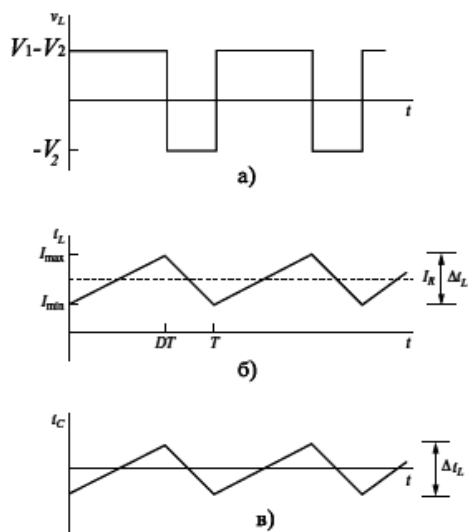
$$(\Delta i_L)_{cl} + (\Delta i_L)_{op} = 0 \quad (1.10.9)$$

$$\frac{V_1 - V_2}{L} DT - \frac{V_2}{L}(1-D)T = 0 \quad (1.10.10)$$

Од последната равенка се добива:

$$V_2 = V_1 D \quad (1.10.11),$$

што означува дека кај овој претворабот излезниот напон е помал од изворот на прав напон. Покрај тоа, излезниот напон зависи само од влезниот напон и работниот циклус D , којшто може да се менува со повратна врска на излезниот напон со влезниот напон. Просечната



Слика 1.19. Бранови форми на претворабот со повратна врска: (а) напон на индукторот, (б) струја низ индуктор и (в) струја низ кондензаторот.

(средната) струја низ намотката мора да биде иста со просечната струја на потрошувачот, бидејќи просечната струја низ кондензаторот е нула:

$$i_L = i_2 = \frac{V_2}{R} \quad (1.10.12).$$

Бидејќи промената на струјата е позната, максималната и минималната вредност на струјата низ намотката (индукторот) се дадени со равенките:

$$I_{\max} = i_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_2}{R} + \frac{V_2}{2L}(1-D)T = V_2 \left(\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2Lf} \right) \quad (1.10.13).$$

$$i_{\min} = i_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_2}{R} - \frac{V_2}{2L}(1-D)T = V_2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} \right) \quad (1.10.14)$$

Од слика 1.19, може да ја најдеме просечната вредност на струјата во индуктивната намотка:

$$i_L = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} \quad (1.10.15)$$

Применувајќи го Кирхофиот ваков закон имаме:

$$i_L = i_C + i_2 \quad (1.10.16)$$

Бидејќи просечната струја низ кондензаторот е нула за време од еден период, може да земеме дека:

$$i_L = i_2 \quad (1.10.17)$$

Од Омовиот закон следува:

$$i_2 = \frac{V_2}{R} \quad (1.10.18)$$

Од горните равенки се добива:

$$I_{\max} + I_{\min} = 2 \frac{V_2}{R} \quad (1.10.19)$$

Претворабот за да работи во режим на континуирана струја, треба $I_{\min} = 0$, притоа се добива:

$$(Lf)_{\min} = \frac{(1-D)R}{2} \quad (1.10.20)$$

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (1.10.21),$$

каде што L_{\min} е минималната вредност на индуктивноста, за претворабот да работи во режим на континуирана струја. Притоа, струјата што тече низ индукторот, е дадена со равенката:

$$\Delta i_L = \left(\frac{V_1 - V_2}{L} \right) DT = \left(\frac{V_1 - V_2}{Lf} \right) D = \left(\frac{V_1 - V_2}{Lf} \right) D = V_2 \frac{(1-D)}{Lf} \quad (1.10.22)$$

Од последната равенка се добива:

$$L_{\min} = \left(\frac{V_1 - V_2}{\Delta i_L f} \right) D = \frac{V_1(1-D)}{\Delta i_L f} \quad (1.10.23),$$

каде што $V_2 = V_1 \cdot D$.

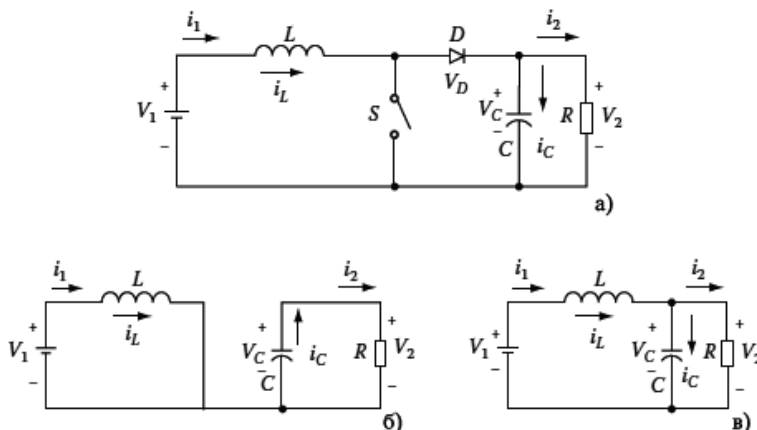
1.11. Енергетски претворач на прав напон

Со промена на положбата на елементите: на прекинувачот S , индуктивната намотка (индуктивите) L и диодата D , во претходниот претворач се добива претворач со засилување на моќноста, во континуиран режим на работа (слика 1.20).

Кога прекинувачот S е вклучен, струјата во индуктивната намотка се зголемува:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_1}{L} \quad (1.11.1).$$

Бидејќи диодата е инверзно поларизирана, кондензаторот ја обезбедува струјата на потрошувачот, притоа струјата што тече i_C е негативна. При отварање на прекинувачот, струјата во индуктивната намотка опаѓа, така што струјата на крајот на циклусот мора да биде еднаква на струјата на почетокот. За да опаѓа струјата во индуктивната намотка, треба вредноста на кондензаторот $V_C = V_2$ да биде поголема од вредноста на напонот на изворот на прав напон V_1 . За временскиот интервал додека прекинувачот е отворен, струјата низ индуктивната намотка (индукторот) е дадена со равенката:



Слика 1.20. Енергетски претворувач: а) еквивалентно круг на претворувачот, б) претворувач при вклучување и в) претворувач при исклучување.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_1 - V_c}{L} = \frac{V_1 - V_2}{L} \quad (1.11.2).$$

Графичката зависност на струјата што тече низ индукторот е дадена на слика 1.21.

Зголемувањето на i_L за време на вклучувањето мора да биде еднакво на неговото намалување во текот на исклучувањето на колото:

$$I_{\max} - I_{\min} = \frac{V_1}{L}DT \quad (1.11.3),$$

$$I_{\min} - I_{\max} = \frac{V_1 - V_c}{L}(1 - D)T \quad (1.11.4),$$

При отворен прекинувач, струјата низ индукторот опаѓа и на крајот на циклусот треба да биде еднаква со струјата на почетокот на циклусот, за да работи истиот во стабилна состојба:

$$(I_{\max} - I_{\min}) - (I_{\min} - I_{\max}) = 0 \quad (1.11.5),$$

$$\frac{V_1}{L}DT - \frac{V_1 - V_c}{L}(1 - D)T = 0 \quad (1.11.6),$$

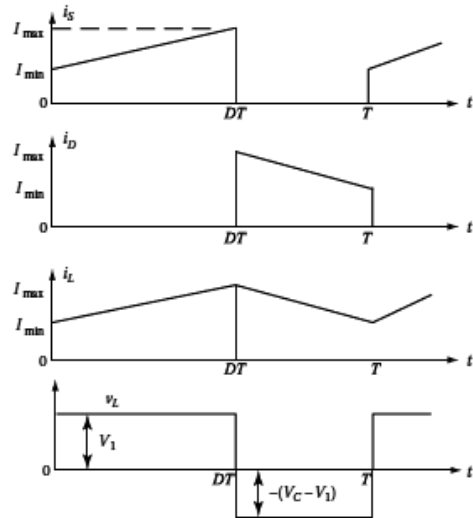
$$V_2 = V_c = \frac{V_1}{1 - D} \quad (1.11.7).$$

Од последната равенка се гледа дека излезниот напон V_2 ќе биде поголем доколку вредноста на D е поголема (слика 1.21). Меѓутоа, како параметарот D се приближува до единица, излезниот напон опаѓа, поради паразитните струи. Затоа, се ограничува вредноста на D да е помала од 0,9, за да се избегне овој проблем. Оваа ограничување на вредноста на параметарот D доведува до ограничување на засилувањето на влезниот напон, до вредност 10, бидејќи прекинувачот е отворен за многу кратко време (0,1 T бидејќи $D=0,9$).

Струите I_{\max} и I_{\min} можат да

се одредат од просечната моќност на влезот и просечната моќност на потрошувачот, при занемарување на загубите:

$$P_{in} = \frac{I_{\min} + I_{\max}}{2} V_1 \quad (1.11.8), \text{ и}$$



Слика 1.21. Промена на струјата и напонот при вклучување и исклучување на прекинувачот.

$$P_L = \frac{V_2^2}{R} \quad (1.11.9).$$

Од последните две равенки следува:

$$\frac{I_{\min} + I_{\max}}{2} V_1 = \frac{V_2^2}{R} \quad (1.11.10).$$

$$\frac{I_{\min} + I_{\max}}{2} V_1 = \frac{V_1^2}{(1-D)^2 R} \quad (1.11.11).$$

$$I_{\max} + I_{\min} = 2 \frac{V_1}{(1-D)^2 R} \quad (1.11.12).$$

Со собирање на равенките 1.11.3 и 1.11.12 се добива:

$$I_{\max} = \frac{V_1}{(1-D)^2 R} + \frac{V_1}{2L} DT \quad (1.11.13).$$

Исто така, минималната струја се добива со вадење на равенките 1.11.12 и 1.11.3:

$$I_{\min} = \frac{V_1}{(1-D)^2 R} - \frac{V_1}{2L} DT \quad (1.11.14).$$

Вредноста на струјата што тече низ потрошувачот i_2 е дадена со равенката $i_2 = \frac{V_2}{R}$, а просечната струја што тече низ кондензаторот е нула. Моменталната струја низ кондензаторот има триаголна форма, што е приближно $(i_1 - i_2)$ за време на кога прекинувачот е исклучен и $-i_2$ за време на вклучен прекинувач. Од слика 1.21 следува дека струјата од изворот на влезот $i_1 = i_5 = i_L$ е континуирана. Затоа, овој претворач работи во континуиран режим на работа. Неопходен услов за континуирана струја низ индукторот е определен од равенките:

$$I_{\min} = 0 = \frac{V_1}{(1-D)^2 R} - \frac{V_1}{2L} DT \quad (1.11.15).$$

$$\frac{V_1}{(1-D)^2 R} = \frac{V_1}{2L} DT = \frac{V_1}{2L \cdot f} D \quad (1.11.16).$$

$$\frac{V_1}{(1-D)^2 R} = \frac{V_1}{2L \cdot f} D \quad (1.11.17).$$

$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2 \cdot f} \quad (1.11.18).$$

Покрај тоа, од равенката 1.11.1 следува дека од вредноста на индуктивитетот L на индукторот може да се дизајнира струјата низ целото коло:

$$\Delta i_L = \frac{V_1 \cdot DT}{L} = \frac{V_1 \cdot D}{L \cdot f} \quad (1.11.19).$$

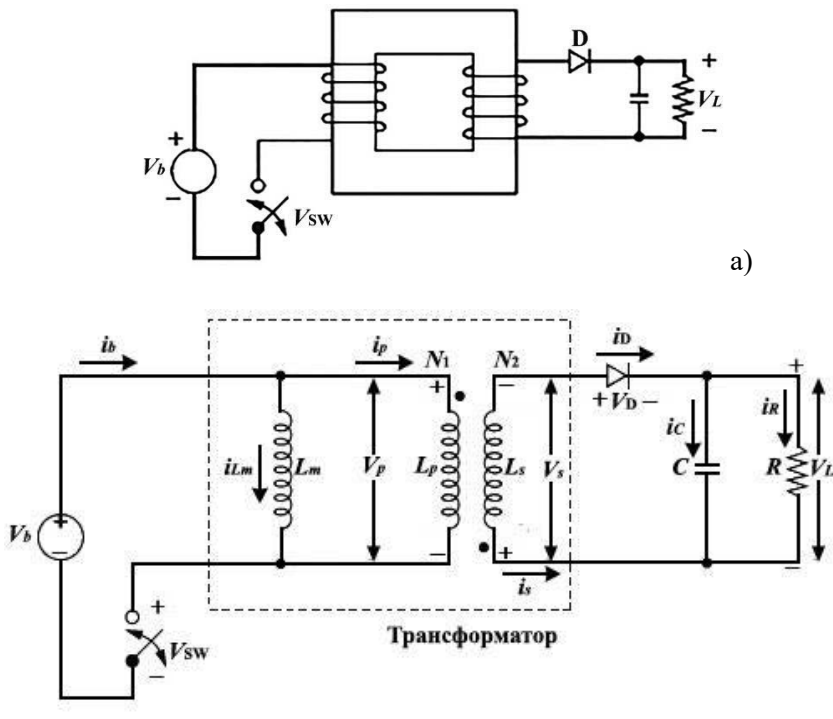
1.12. Претворац на прав напон со трансформаторска повратна врска

Изворите на напон, во режим на работа како прекинувачи имаат голема ефикасност и обезбедуваат голема струја при мал работен напон. Постојат пет конфигурации на извори на напон чиј режим на работа може да биде: како прекинувач: претворац со повратна врска, еднонасочен извор, пуш-пул, со половичен мост и комплетен мост. Претворацот работи на висока фреквенција, но на излезот се добива филтриран прав напон. Во основа овие конфигурации се користат во зависност од неговата примена во пракса.

Во современите извори на напон, дизајнот на електричното коло зависи од употребата на линеарни напојувања до попрактични моќни пулсирачки извори на напон (SMPS). Дијаграм на колото е прикажан на слика 1.22, којшто претставува претворац (конвертор) во една насока, каде што трансформаторот обезбедува електрична изолација и го прилагодува односот на влезниот напон/излезниот напон за одредена излезна моќност и за точно одредени прекини на струјата. Имено, од интерес е да се одредат параметрите на претворац со повратна врска, којшто работи во режим на претворба на прав напон во прав напон и за одредено време се случува прекин, така што процесот се повторува. Овој претворац е со повратна врска која се остварува со одредена големина на магнетизирачката индуктивност L_m , којшто претставува виртуелна индуктивност и се должи на индуктивитетот на примарната намотка. Меѓутоа, треба да се води сметка и за насоката на мотањето на навивките, притоа анализата е направена при следните услови:

- а) излезниот кондензатор е многу голем, што доведува до постојан излезен напон V_L ,
- б) колото работи во стабилна состојба, што значи дека сите напони и струи се периодични, почнуваат и завршуваат на истите точки на еден период на работа,
- в) работниот циклус на прекинувачот е D , притоа прекинувачот се затвора за време DT а е отворен за $(1-D)T$ и
- г) прекинувачот и диодата се идеални.

Овој режим на работа започнува кога прекинувачот v_{sw} е вклучен за време од $0 \leq t \leq DT$, каде што D е работниот циклус, T е времето за еден циклус, а напонот на примарната намотка на



Слика 1.22. Трансформаторски претворувач со повратна врска: а) изведба на претворувач со трансформатор и б) еквивалентно коло на трансформаторски претворувач.

трансформаторот е V_b . Тоа доведува до течење на струја i_p во примарната намотка, и до зголемување на магнетното поле во намотката и индукција на струја во секундарната намотка V_s . Меѓутоа, диодата D е поларизирана во инверзна насока и низ неа не може да тече струја, притоа не тече струја и низ потрошувачот. Всушност, енергија се складира во индуктивната намотка (индукторот) кога прекинувачот е затворен, и таа енергија се пренесува кога прекинувачот е отворен.

Од друга страна, кондензаторот C служи како филтер и го напојува потрошувачот со напон и тече струја i .

Кога прекинувачот е вклучен:

$$V_b = L_m \frac{di_{L_m}}{dt} \quad (1.12.1)$$

Од последната равенка следува дека:

$$\frac{di_{L_m}}{dt} = \frac{\Delta i_{L_m}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L_m}}{DT} = \frac{V_b}{L_m} \quad (1.12.2)$$

За струјата низ индуктивната намотка се добива:

$$(\Delta i_{L_m})_{cl} = \frac{V_b \cdot DT}{L_m} \quad (1.12.3)$$

Додека пак, напонот што се индуцира на страната на потрошувачот (слика 1.22):

$$V_s = V_p \frac{N_s}{N_p} \Rightarrow V_b \frac{N_s}{N_p} \quad (1.12.4).$$

Напонот на краевите на диодата е даден со равенката:

$$V_D = -(V_L + V_s) = -V_L - V_s = -V_L - V_b \frac{N_s}{N_p} < 0 \quad (1.12.5) \text{ и}$$

$$i_s = 0 \text{ и } i_p = 0 \quad (1.12.6).$$

Бидејќи диодата е поларизирана во инверзна насока, следува дека $i_s = 0$ и $i_p = 0$. При затворен прекинувач струјата расте линеарно во магнетизирачката намотка и примарната намотка, а струјата не тече низ секундарната намотка.

При отворање на прекинувачот, струјата не може да се промени моментално во индуктивитетот L_m , туку струјата тече низ примарната намотка. Струјата i_{Lm} тече низ примарната намотка во обратна насока од претходната и се индуцира струја во секундарната намотка на трансформаторот. Во овој случај насоката на струјата е таква што диодата е поларизирана во пропусна насока. Под претпоставка дека излезниот напон останува константен V_L , а напонот на секундарната намотка на трансформаторот V_s и изнесува $-V_L$. Бидејќи колото во секундарот е затворено, тоа ќе доведе до индукција на напон на краевите на индуктивитетот L_m . Оттука се добива:

$$V_s = -V_L \quad (1.12.7),$$

$$V_p = V_s \frac{N_p}{N_s} = -V_L \frac{N_p}{N_s} \quad (1.12.8),$$

$$V_p = L_m \frac{di_{Lm}}{dt} = -V_L \frac{N_p}{N_s} \quad (1.12.9),$$

Од последната равенка се добива:

$$\frac{di_{Lm}}{dt} = \frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{(1-D)T} = \frac{-V_L N_p}{L_m N_s} \quad (1.12.10),$$

$$(\Delta i_{Lm})_{op} = -\frac{V_L (1-D) \cdot T N_p}{L_m N_s} \quad (1.12.11).$$

За стабилна работа на прекинувачот треба струјата низ индукторот да биде нула:

$$(\Delta i_{Lm})_{cl} + (\Delta i_{Lm})_{op} = 0 \quad (1.12.12),$$

$$\frac{V_b \cdot DT}{L_m} - \frac{V_L (1-D) \cdot T N_p}{L_m N_s} = 0 \quad (1.12.13).$$

Оттука се добива:

$$V_L = V_b \left(\frac{D}{1-D} \right) \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (1.12.14),$$

Се забележува дека односот помеѓу излезниот и влезниот напон е сличен со добиениот излезен напон кај енергетскиот претвораќач, со додаток на еден член во којшто влегува односот на намотките во секундарот и намотките во примарот.

Струјата што тече низ диодата при отворен прекинувач и напонот на прекинувачот е дадена со равенките:

$$i_D = -i_p \left(\frac{N_p}{N_s} \right) = i_{Lm} \left(\frac{N_p}{N_s} \right) \quad (1.12.15).$$

Напонот на краевите на прекинувачот е даден со равенката:

$$V_{SW} = V_b - V_p = V_b + V_L \left(\frac{N_p}{N_s} \right) \quad (1.12.16),$$

$$i_R = \frac{V_L}{R} \quad (1.12.17),$$

$$i_C = i_D - i_R = i_{Lm} \left(\frac{N_p}{N_s} \right) - \frac{V_L}{R} \quad (1.12.18).$$

Од равенките се забележува дека напонот v_{SW} на отворен прекинувач, е поголем од напонот на изворот. Ако излезниот напон е ист како влезниот напон, тогаш трансформациониот број е 1, а напонот на краевите на прекинувачот ќе биде двапати поголем од напонот на изворот.

Моќноста на потрошувачот треба да биде еднаква со моќноста на изворот на прав напон, во идеален случај.

$$P_b = P_L \quad (1.12.19).$$

$$V_b i_b = \frac{V_L^2}{R} \quad (1.12.20).$$

Просечната (средната) струја при вклучување на прекинувачот, во однос на средната магнетизирачка индуктивна струја е дадена со равенката:

$$i_b = i_p = \frac{(i_{Lm})DT}{T} = i_{Lm}D \quad (1.12.21),$$

Оттука се добива:

$$V_b i_{Lm} D = \frac{V_L^2}{R} \quad (1.12.22),$$

$$i_{Lm} = \frac{V_L^2}{V_b \cdot DR} \quad (1.12.23).$$

Со замена на 1.12.14 во 1.12.23 се добива:

$$i_{Lm} = \frac{\left[V_b \left(\frac{D}{1-D} \right) \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \right]^2}{V_b \cdot D \cdot R} = \frac{V_b D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_s}{N_p} \right)^2 = \frac{V_L}{(1-D)R} \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (1.12.24).$$

Максималната и минималната струја низ индукторот се добива од равенките 1.12.24 и 1.12.3 и е дадена со равенките:

$$I_{Lmax} = i_{Lm} + \frac{\Delta i_{Lm}}{2} = \frac{V_b D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_s}{N_p} \right)^2 + \frac{V_b D T}{2L_m} \quad (1.12.25),$$

$$I_{Lmin} = i_{Lm} - \frac{\Delta i_{Lm}}{2} = \frac{V_b D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_s}{N_p} \right)^2 - \frac{V_b D T}{2L_m} \quad (1.12.26).$$

Претворабот за да работи стабилно и на граница помеѓу дисконтинуиран и континуиран струен режим на работа треба $i_{Lmin} = 0$, притоа следува:

$$\frac{V_b D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_s}{N_p} \right)^2 = \frac{V_b D T}{2L_m} \quad (1.12.27).$$

Оттука се добива:

$$(L_m)_{min} = \frac{(1-D)^2 R \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2}{2f} \quad (1.12.28),$$

каде што f е фреквенцијата на прекини. Индуктивитетот L_m се одредува и од струјата што тече низ него:

$$L_m = \frac{V_b \cdot D T}{\Delta i_{Lm}} = \frac{V_b \cdot D}{\Delta i_{Lm} \cdot f} \quad (1.12.29)$$

Бранувањата на излезниот напон се исти со напонот на кондензаторот, бидејќи е сврзан паралелно со потрошувачот, притоа промената на полнежот на кондензаторот е дадена со равенката:

$$\Delta Q = i_R \cdot \Delta t = \left(\frac{V_L}{R} \right) D T = C \cdot \Delta V_L \quad (1.12.30).$$

Оттука се добива:

$$\Delta V_L = \frac{V_L \cdot D \cdot T}{RC} = \frac{V_L \cdot D}{RCf} \quad (1.12.31) \text{ и}$$

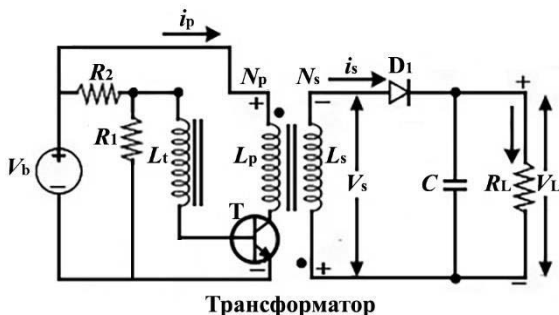
$$\frac{\Delta V_L}{V_L} = \frac{D}{RCf} \quad (1.12.32).$$

Од последната равенка следува дека со зголемување на работниот отпорник R , на капацитетот на кондензаторот C и на фреквенцијата се

подобрува филтрацијата на напонот, т.е. добиениот напон ќе биде приближно прав напон.

1.13. Изработка на претворац на прав напон со трансформаторска повратна врска

Во овој случај се работи за трансформаторски тип на DC/DC претворац, каде што примарот има N_p навивки, N_s навивки во секундарот и намотка со навивки M_t за остварување на повратна врска, кои се поврзани со транзисторот при претпоставка на континуирано течење на струја низ колото, дадено на слика 1.23. Овој претворац се состои од блокинг осцилатор, којшто во секундарната намотка има сериски врзано диода со потрошувач. Овој режим на работа започнува кога прекинувачот е вклучен, т.е. транзисторот Q е вклучен за време од $0 \leq t \leq DT$, каде што D е работниот циклус и T е времето на еден циклус.



Слика 1.23. Дијаграм на колото на претворац со трансформатор.

Транзистор е вклучен во моментот t е нула, кога напонот зависи од напонот на батеријата, притоа започнува течење на колекторска струја, иста струја тече и низ примарната намотка. Додека пак, напонот во помошната намотка на трансформаторот е позитивен, што доведува до спроводна состојба на транзистор. За период од $0 \leq t \leq DT$ транзисторот е во спроводна состојба, т.е. работи како вклучен прекинувач, затоа што струјата што тече низ базата е определена од отпорите R_1 и R_2 , а напонот на примарната намотка на трансформаторот е V_b . Напонот на базата на транзисторот ќе зависи од напонот на батеријата и отпорите R_1 и R_2 , а базната струја што тече низ транзисторот ќе зависи од нивниот отпор:

$$V_3 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_b \pm V_t \quad (1.13.1),$$

каде што V_3 е напон на базата на транзисторот. За $t = 0$ следува дека магнетниот флуks е 0, така што на крајот на периодот DT , кога транзисторот се исклучува од колото, тогаш магнетниот флуks е максимален (Φ_{\max}). На крајот на времето $t = DT$, струјата i_p ќе ја достигне максималната вредност низ транзисторот $I_{p(pD)}$, дадена со равенката:

$$i_{p(pD)} = i_{c(\max)} = i_p = \frac{V_b \cdot DT}{L_p} \quad (1.13.2),$$

при што максималната струја на примарната намотка е еднаква на максималната колекторска струја $I_{c(\max)}$. Додека пак, струјата низ секундарот е дадена со равенката:

$$i_{s(pD)} = -i_{p(pD)} \left(\frac{N_p}{N_s} \right) \quad (1.13.3).$$

Откако струјата низ примарот ќе ја достигне својата максимална вредност, тоа доведува до индукција на струја низ секундарната намотка и помошната намотка M_s . Бидејќи магнетната индукција во јадрото се заситува, индуцираниот напон во помошната намотка се намалува. Тоа придонесува за намалување на базната струја со што се намалува колекторската струја на транзисторот, така што тоа се случува акумулативно. Во одреден момент, во базата нема да имаме напон или ќе биде поларизирана со негативен напон притоа транзисторот ќе биде во неспроводна состојба.

Тоа доведува до индукција на струја низ секундарната намотка и помошната намотка M_s , во обратна насока, која придонесува базата на транзисторот да се поларизира во непропусна насока, и брзо намалување на струјата низ примарната намотка, т.е. транзисторот T да биде исклучен за период од $DT \leq t \leq T$.

Материјалите што се користат за изработка на јадра на трансформаторите со голема моќност зависат од работната фреквенција. На фреквенција од 50/60 Hz се применува јадро од железо, железо со допинг на силициум или челик со допинг на силициум на трансформаторите со голема моќност, притоа тие имаат висока густина на магнетниот флуks. Со зголемување на работната фреквенција на трансформаторите со голема моќност, се зголемуваат вртложните струи во магнетните јадра. Покрај тоа што јадрото е ламинирано, сепак вртложните струи се толку големи што може јадрото да го прегреат и да предизвикаат прегорување на трансформаторот.

Магнетната енергијата E што се акумулира во јадрото кога тече струја низ примарната намотка е дадена со равенката:

$$E = \frac{1}{2} L_p i_p^2 \quad (1.13.4),$$

каде што L_p е индуктивитетот на примарната намотка.

За конструкција ќе земеме дека напонот на батеријата е 12 V, излезниот напон е 350 V, транзистор 2N3055, излезната моќност е 40 W, ефикасноста на претвораот е 80 %, густина на струјата $J = 5 \text{ A/mm}^2$ и $D = 0,5$.

Од равенката за излезната моќност на претвораот се добива:

$$P_L = \frac{V_L^2}{R} \Rightarrow R = \frac{V_L^2}{P_L} = \frac{350^2}{40} = 3,1 \text{ k}\Omega \quad (1.13.5).$$

Со замена во равенката 1.12.14, се добива:

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{1-D}{D} \cdot \frac{V_L}{V_b} = \frac{350}{12} = 30 \quad (1.13.6).$$

Од друга страна, бидејќи напонот не е синусен, тогаш коефициент на бранување K_f зависи од работниот циклус, а за $D = 0,5$ е даден со равенката:

$$K_f = \frac{1}{\sqrt{D(1-D)}} = 2 \quad (1.13.7),$$

Од равенката 1.12.24 следува дека просечната струја во примарната намотка е:

$$i_{Lm} = \frac{V_L}{(1-D)R} \left(\frac{N_s}{N_p} \right) = \frac{350}{0,5 \cdot 3062} \cdot 30 \text{ A} = 6,85 \text{ A} \quad (1.13.8).$$

Од равенката 1.12.28 следи дека индуктивитетот L_m може да се одреди

$$\begin{aligned} \text{со равенката: } (L_m)_{\min} &= \frac{(1-D)^2 R \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2}{2f} = \frac{(1-D)^2 R \left(\frac{N_p}{N_s} \right)}{2f \cdot i_{Lm} \cdot (1-D)R} = \\ &= \frac{(1-D) \left(\frac{N_p}{N_s} \right) V_L}{2f \cdot i_{Lm}} = \frac{0,5}{2 \cdot 10000} \cdot \frac{1}{30} \cdot \frac{350}{6,85} \text{ H} = 42 \text{ }\mu\text{H} \end{aligned} \quad (1.13.9).$$

Од равенката 1.12.21 следува дека просечната (средната) струја при вклучување на прекинувачот, во однос на средната магнетизирачка индуктивна струја е дадена со равенката:

$$i_p = \frac{(i_{Lm}) \cdot DT}{T} = i_{Lm} D = 3,42 \text{ A} \quad (1.13.10),$$

За да се определи колку навивки се потребни за индуцирање на напон од 1 V во секундарот, од равенката (1.3.4) следува дека:

$$\frac{N_s}{V_L} = \frac{10^4}{K_u \cdot f \cdot \phi_{\max}} = \frac{10^4}{2 \cdot 10000 \cdot 0,3 \cdot 1,24} = 1,34 \text{ V}^{-1} \quad (1.13.11).$$

каде што $B_{\max} = 0,3 \text{ T}$, површина на јадрото од $A_i = 1,24 \text{ cm}^2$ за бомбина ETD39 и фреквенцијата ќе биде $f = 10 \text{ kHz}$. Пресметката може да се направи и за друга фреквенција и магнетната индукција во јадрото. Оттука за односот број на навивки и потребниот напон се добива:

$$N_s = V_L \frac{10^4}{2 \cdot f \cdot B_{\max} \cdot A} = 350 \cdot 1,34 \text{ V}^{-1} = 469 \text{ V}^{-1} \quad (1.13.12).$$

Додека пак, бројот на навивки во примарната намотка ќе биде:

$$N_p = \frac{N_s}{30} = \frac{469}{30} = 16 \quad (1.13.13).$$

Додека напонот на намотката V_t ќе зависи од односот на навивките даден со равенката:

$$\frac{V_t}{V_b} = \frac{N_t}{N_p} \Rightarrow V_t = V_b \cdot \frac{N_t}{N_p} \quad (1.13.14).$$

Со замена во равенката 1.13.1 се добива:

$$V_3 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_b \pm V_b \cdot \frac{N_t}{N_p} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \pm \frac{N_t}{N_p} \right) \cdot V_b \quad (1.13.15),$$

Напонот на базата на транзисторот ќе биде нула ако е исполнето:

$$\frac{N_t}{N_p} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow N_t = N_p \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (1.13.16),$$

Во случај да $R_1 = R_2$ се добива за $N_t = 8$.

За да ја пресметаме дебелината на жицата на примарната и секундарната намотка, со користење на равенката 1.5.17:

$$A_{wp} = \frac{i_p}{J} = \frac{3,42}{5} \text{ mm}^2 = 0,68 \text{ mm}^2 \quad (1.3.17).$$

Оттука, за дебелината на жицата на примарната намотка се добива:

$$d_p = \sqrt{\frac{4A_{wp}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,68}{\pi}} \text{ mm} = 0,46 \text{ mm} \approx 0,5 \text{ mm} \quad (1.3.18).$$

Од равенката 1.13.3 се добива дека струјата низ секундарната намотка

$$e: \quad i_{s(pD)} = -i_{p(pD)} \left(\frac{N_p}{N_s} \right) = \frac{3,42}{30} \text{ A} = 0,12 \text{ A} \quad (1.13.19).$$

Оттука се добива:

$$A_{ws} = \frac{i_s}{J} = \frac{0,12}{5} \text{ mm}^2 = 0,024 \text{ mm}^2 \quad (1.13.20).$$

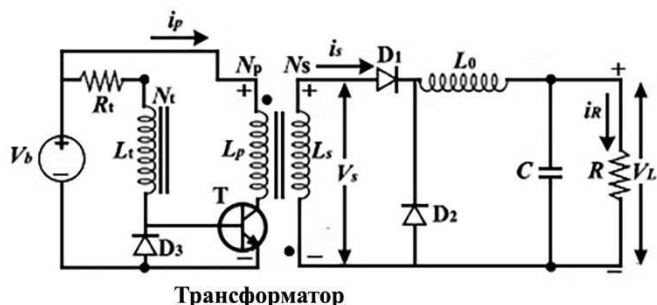
Бидејќи пречникот на жицата е кружен, тогаш следува дека:

$$d_s = \sqrt{\frac{4A_{ws}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,024}{\pi}} = 0,17 \text{ mm} \approx 0,2 \text{ mm} \quad (1.13.21).$$

Бобината ETD39 има должина од 30 mm на прозорецот што дозволува да се сместат 150 навивки на секундарната намотка, затоа се потребни три слоја за секундарната намотка.

1.14. Претвораач на прав напон со проследување и трансформаторска повратна врска

Друг вид претвораач од прав во прав напон (DC/DC) е претвораач со проследување и трансформаторска повратна врска, каде што излезниот напон се пренесува преку трансформатор (слика 1.24). Примарната намотка има N_p навивки, секундарната намотка има N_s навивки, а за остварување на повратна врска се користи помошна намотка со навивки N_t , кои се поврзани со транзисторот при претпоставка на континуирано течење на струја низ колото. Покрај тоа, претвораачот се состои од трансформатор којшто во примарната намотка содржи сериски поврзан транзистор како прекинувач. Состојбата на спроводен или неспроводен транзистор зависи од базната струја која е ограничена од отпорникот R_t , бројот на навивките N_t и диодата D_3 . Додека пак, во секундарната намотка се сериски врзани диода D_1 , индуктивитет L_0 и потрошувач R . За да се добие позитивен напон од страната на диодата D_1 , треба мотањето на навивките на секундарната намотка да биде обратно од мотањето на навивките во примарната намотка. Паралелно со потрошувач R е поврзан кондензатор C со цел да се намали бранувањето на излезниот напон. Електричната енергија се пренесува од изворот до потрошувачот кога прекинувачот е затворен, за индуктивитет L_m на примарната намотка и индуктивитетот L_0 треба да бидат колку што е можно поголеми. Диодата D_2 служи за течење на струја во секундарот, во случај кога транзисторот е во неспроводна состојба и диодата D_1 не спроведува струја, притоа акумулираната електрична енергија во индуктивитетот L_0 и кондензаторот се троши низ потрошувачот. Трансформаторскиот број може да биде поголем или помал од единица, но работниот циклус е помал од единица.



Слика 1.24. Дијаграм на колото на претвораач со трансформаторска повратна врска во една насока.

Овој режим на работа започнува кога прекинувачот е вклучен, т.е. транзисторот Q е вклучен за време од $0 \leq t \leq DT$, каде што D е работниот циклус и T е времето на еден циклус. За период од $0 \leq t \leq DT$ транзисторот е во спроводна состојба, т.е. работи како вклучен

прекинувач, затоа што базната струја зависи од отпорникот R_t , а отпорот на примарната намотка може да се занемари. Исто така, напонот на примарната намотка на трансформаторот е V_b . При течење на струја во примарната намотка се индуцира напон во секундарната намотка и во помошната намотка N_t , при растење на магнетната индукција во јадрото. Индуцираниот напон во помошната намотка е спротивен од напонот на батеријата, така што во даден момент напонот на базата на транзисторот ќе биде нула притоа транзисторот поминува во неспроводна состојба. Бидејќи диодата D_1 во секундарната намотка е поларизирана во пропусна насока ќе тече струја низ секундарната намотка. Напоните во секундарната намотка и помошната намотка се дадени со равенките:

$$V_p = V_b \quad (1.14.1),$$

$$V_s = V_p \frac{N_s}{N_p} \quad (1.14.2),$$

$$V_t = V_p \frac{N_t}{N_p} \quad (1.14.3),$$

Напонот на диодата D_3 ќе зависи од напонот на батеријата и индуцираниот напон во помошната намотка, дадено со равенката:

$$V_{D_3} = -V_b - V_t \quad (1.14.5),$$

што означува дека диодата е во непропусна насока и не тече струја низ неа.

Додека пак, напонот на краевите на индуктивитетот L_0 ќе зависи од напонот на потрошувачот и диодата D_1 , дадено со равенката:

$$V_{L_0} = V_s - V_L = V_b \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_L = L_0 \frac{di_{L_0}}{dt} \quad (1.14.6),$$

Оттука, се добива дека:

$$\frac{di_{L_0}}{dt} = \frac{V_b \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_L}{L_0} = \frac{di_{L_0}}{dt} = \frac{\Delta i_{L_0}}{DT} \quad (1.14.7),$$

$$(\Delta i_{L_0})_{cl} = \left[V_b \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_L \right] \frac{DT}{L_0} \quad (1.14.8),$$

Од друга страна, бидејќи струјата тече низ примарната намотка, тогаш низ магнетизирачкиот индуктивитет L_m струјата се менува според равенката:

$$\Delta i_{L_m} = \frac{V_b DT}{L_m} \quad (1.14.9),$$

Струјата се зголемува линеарно и во двата индуктивитета L_0 и L_m додека прекинувачот е затворен. Струјата низ транзисторот, помеѓу емитер и колектор е дадена со равенката:

$$i_c = i_p + i_{Lm} \quad (1.14.10),$$

Бидејќи магнетната индукција се заситува, тоа доведува до опаѓање на индуцираниот напон во секундарната намотка, што доведува до индуцирање на напон во помошната намотка со навивки M_t , дадено со равенката:

$$V_t = -V_s \frac{N_t}{N_s} \quad (1.14.11).$$

Во случај кога тој напон на крајот од диодата D_3 којшто е поврзан со базата на транзисторот има понегативна вредност од $0,7\text{ V}$, тогаш тоа ќе овозможи течење на струја низ диодата D_3 и ќе придонесе напонот на базата да биде на нула, што ќе предизвика транзисторот да биде во неспроводна состојба.

Меѓутоа, струјата во индуктивитетите L_0 и L_m не се менува моментално кога транзисторот е во неспроводна состојба, по пат на самоиндукција во примарната намотка е дадена со равенката:

$$i_p = -i_{Lm} \quad (1.14.12).$$

Исто така, во секундарната намотка се индуцира негативен напон, така што диодата D_1 е поларизирана во непропусна насока и не спроведува струја. Од друга страна, акумулираната енергија во индуктивитетот L_0 ќе придонесе за течење на струја низ колото, при што диодата D_2 ќе биде поларизирана во пропусна насока, а напонот на краевите на индуктивитетот L_0 ќе биде даден со равенката:

$$V_{L_0} = -V_L = L_0 \frac{di_{L_0}}{dt} \quad (1.14.13),$$

Оттука се добива:

$$\frac{di_{L_0}}{dt} = \frac{-V_L}{L_0} = \frac{di_{L_0}}{dt} = \frac{\Delta i_{L_0}}{(1-D)T} \quad (1.14.14),$$

$$(\Delta i_{L_0})_{op} = \frac{-V_L(1-D)T}{L_0} \quad (1.14.15),$$

од последната равенка се гледа дека струјата низ индуктивитетот опаѓа, кога транзисторот е во неспроводна состојба.

За стабилна работа на претвораот треба промената на струјата низ индукторот да биде нула:

$$(\Delta i_{Lm})_{cl} + (\Delta i_{Lm})_{op} = 0 \quad (1.14.16), \text{ и}$$

$$\left[V_b \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_L \right] \frac{DT}{L_0} - \frac{V_L(1-D) \cdot T}{L_0} = 0 \quad (1.14.17).$$

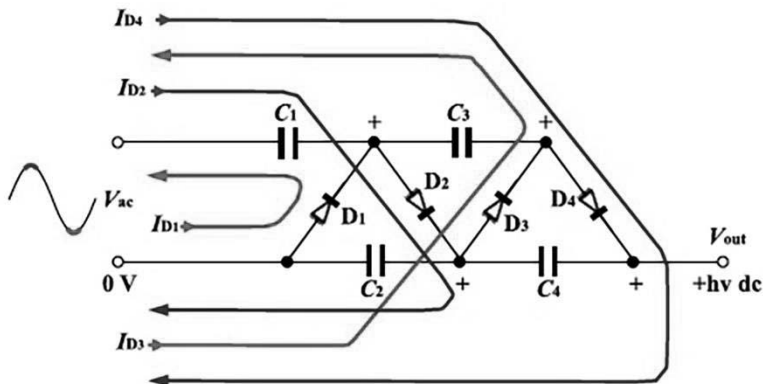
Оттука се добива:

$$V_L = V_b D \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (1.14.18).$$

Струјата во примарната намотка и во индуктивитетот L_m треба да се врати на нула пред почетокот на следниот циклус, за да магнетната индукција во јадрото на трансформаторот да биде еднаква на нула. Струјата во индуктивитетот i_{Lm} линеарно се намалува, бидејќи базната струја се намалува на нула поради поларизација на диодата D_3 во пропусна насока, што доведува до нетечење на струја низ транзисторот.

1.15. Мултипликатори на напон

Мултипликатори на напон се претвораи од наизменичен напон во извор на прав напон, составени од диоди и кондензатори кои меѓусебно се поврзани за да се добие висок прав (DC) напон, од помал наизменичен извор на напон. Всушност, мултипликаторите на напон се направени од каскади, при што секоја се состои од диода и кондензатор (сликата 1.25). Напонскиот мултипликатор е едноставен начин за генерирање на високи напони при релативно ниски струи. Со користење само на кондензатори и диоди, мултипликаторите на напон можат да засилат релативно низок напон до екстремно високи напони, а во исто време се доста едноставни и поевтини од трансформаторите. Предноста на колото е дека напонот во текот на секоја каскада е само еднаков на двојната вредност на влезниот напон, и лесно се прави изолација од уредите. Како влезен напон во првата каскада може да послужи излезниот напон од кој било трансформатор.



Слика 1.25. Последователно полнење со полубрановиден напон на мултипликатор.

Меѓутоа, мултипликаторот на напон има слаба регулација на напонот, бидејќи напонот брзо се намалува со зголемување на излезната струја. I - V карактеристика на излезот е приближно хиперболична, па затоа е погодна за полнење на супер кондензатор на високи напони, при постојана излезна моќност на полнење. Покрај тоа, бранувањето на излезниот напон, при големи потрошувачи е високо. Излезниот напон не е изолиран од изворот на влезен напон, иако употребата на трансформатор пред влезот на мултипликаторот обезбедува електрична изолација со излезот.

За да се опише работата на мултипликаторот, ќе земеме дека неговиот влез е поврзан со трансформатор T_s којшто дава наизменичен напон, а загубите може да ги занемариме и кондензаторите во исто време се елементи за филтрирање на напонот (слика 1.25). Додека пак, излезниот напон ќе го бараме на краевите на кондензаторите C_1 и C_2 или на C_3 и C_4 .

Возможни се следните состојби:

а) V_{ac} е наизменичниот напон од трансформаторот, за време на првата позитивната полупериода ја поларизира диодата D_1 во пропусна насока, притоа кондензаторот C_1 се наелектризира и напонот на неговите краеве е V_{pk} . Бидејќи овој напон ги поларизира и другите диоди во пропусна насока, тоа ќе има влијание понатаму.

б) V_{ac} е наизменичниот напон од трансформаторот, за време на првата негативна полупериода го наелектризира кондензаторот C_2 и напонот на неговите краеве е $2V_{pk}$. Напонот на едната електрода на кондензаторот C_2 е V_{pk} , а на другата електрода на кондензаторот C_2 е $-V_{pk}$, така што напонот на краевите на кондензаторот C_2 е $2V_{pk}$.

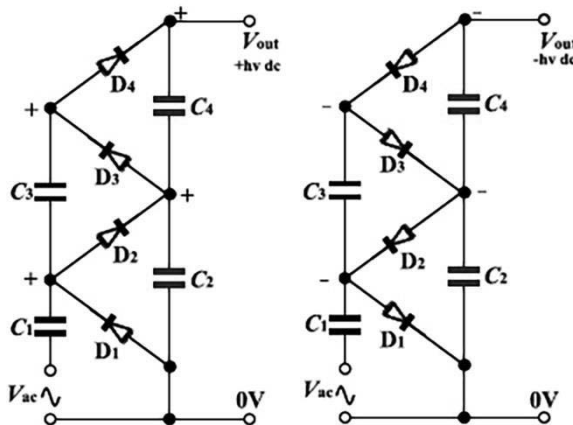
в) V_{ac} е наизменичниот напон од трансформаторот, за време на втората позитивната полупериода ја поларизира диодата D_3 во пропусна насока, притоа кондензаторот C_3 се наелектризира и напонот на неговите краеве е $2V_{pk}$. Всушност, напонот на едната електрода на кондензаторот C_3 е V_{pk} , а на другата електрода на кондензаторот C_3 е $-V_{pk}$, така што напонот на краевите на кондензаторот C_3 е $2V_{pk}$.

г) V_{ac} е наизменичниот напон од трансформаторот, за време на втората негативна полупериода го наелектризира кондензаторот C_4 и напонот на неговите краеве е $2V_{pk}$. Напонот на едната електрода на кондензаторот C_4 е V_{pk} , а на другата електрода на кондензаторот C_4 е $-V_{pk}$, така што напонот на краевите на кондензаторот C_4 е $2V_{pk}$.

Бидејќи кондензаторот C_2 е на напон од $2V_{pk}$ и кондензаторот C_4 е на напон од $2V_{pk}$ и се сервиски врзани, тогаш вкупниот напон помеѓу масата и електродата на кондензаторот C_4 ќе биде $4V_{pk}$. Исто така, за N каскади вкупниот напон ќе биде $N2V_{pk}$.

Полубрановите мултипликатори се направени од каскади во серија, односно кондензаторите се поврзани во серија, така што вкупниот

капацитет е ист како за сериски поврзани кондензатори C/N . Додека пак, напонот е збир на напоните на сериските поврзани кондензатори, кои се во серија со излезниот напон (слика 1.26). Овој мултипликатор е вообичаен и се користи во уреди кои користат висок напон, но ниски струи. Полубрановите мултипликатори вклучуваат широк опсег на каскади во серија, ниска цена и еднаков напон на диодите и кондензаторите од $2V_{pk}$ и V_{pk} .



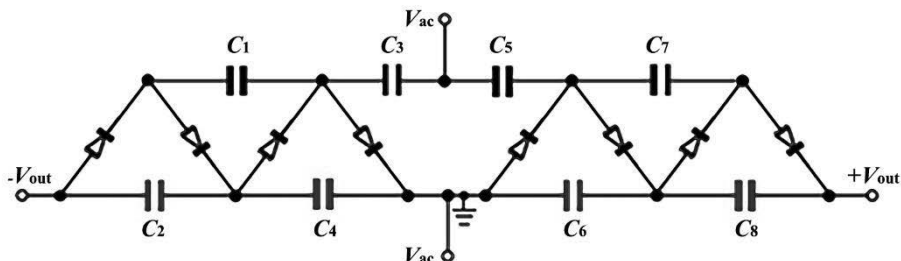
Слика 1.26. Последователно полнење со полубрановиден напон на мултипликатор.

Кој било кондензатор може да се отстрани од каскадата, ако потрошувачот е кондензаторот. Без разлика дали мултипликаторот е целобранов или полубранов, сериски поврзаните диоди спречуваат излезниот напон да биде негативен. При големи празнења, дел од излезната струја се намалува со течење низ диодата, а со тоа се спречува брзо празнење со висока струја.

Од друга страна, двоен напон се добива со поврзување на мултипликатор со позитивен напон и мултипликатор со негативен напон, како што е прикажано на четиристепено коло каде што бројот на каскадите може да биде неограничен (слика 1.27). Бидејќи регулацијата на напонот е пропорционална со N^3 , така што големиот број каскади може да биде неефикасно. Централната жица со која се поврзуваат кондензаторите го намалува максималниот напон, во однос на земјата. Исто така, може да се направат непарен број каскади, како и парен број каскади. Излезен напон може да бидат извлечен во која било точка на сериските поврзани кондензатори.

Штом ќе се приклучи потрошувачот на излезот, излезниот напон се намалува заради регулирање на напонот. Исто така, секоја мала флукуација на импеданса на потрошувачот предизвикува голема флукуација на излезен напон на мултипликаторот. Поради оваа причина, мултипликатор на напонот се користат само во специјални

уреди каде потрошувачот има голема импеданса и е константна, или каде стабилноста на напон не е важна.



Слика 1.27. Четиристепено коло на мултипликатор.

Излезниот напон $V_{o/c}$ на отворен круг кај мултипликаторите со полубранов напон на секоја каскада е двапати поголем од максималниот влезен напон V_{pk} . Под претпоставка дека наизменичниот влезен напон и фреквенцијата се константни за N каскади, тогаш излезен напон е даден:

$$V_{o/c} = 2N \times V_{pk} \quad (1.15.1).$$

Во пракса, потребни се неколку циклуси за да се постигне целосен излезен напон, бидејќи може да се смета дека потрошувачот со отпор R и кондензаторот C имаат некоја вредност RC константа, од што ќе зависи времето на постигнување на излезниот напон. Полнењето на кондензаторот се случува само со вклучување на напон на мултипликаторот и не се повторува освен ако излезот е кратко споен. Најчесто влезниот напон има синусна и квадратна бранова форма.

Излезниот напон ќе зависи од напонот што го дава мултипликаторот кога има сврзано потрошувач и напонот кој се должи на течењето на струјата низ диодите и кондензаторот е даден со равенката:

$$V_{out} = V_{o/c} - V_{reg} = 2N \cdot V_{pk} - I_0 \cdot \frac{4N^3 + 3N^2 - N}{6 \cdot fC} \quad (1.15.2).$$

каде што V_{reg} регулациониот напон, I_0 е правата струја што тече низ потрошувачот, C е капацитетот на каскадата, f е фреквенцијата на наизменичниот напон, N број на каскади и C/N ефективниот капацитет на излезот. Регулациониот напон (V_{reg}) е промена на напонот, т.е. разликата на напонот кога немаме потрошувач на излезот и напонот кога е приклучен потрошувач на излезот.

Бранувањата на излезниот напон (V_{rip}) се должат на флукуација на излезниот прав напон, при одредена излезна струја. Претпоставуваме дека наизменичниот напон и фреквенцијата се одржуваат константни. Напонот на бранување во случај кога сите каскади имаат ист капацитет, од C_1 преку C_{2N} :

$$V_{rip} = I_0 \cdot \frac{N+1}{2f \cdot \frac{C}{N}} \quad (1.15.3).$$

Бранувањето расте рапидно, како што се зголемува бројот на каскади, со N на квадрат. Обично се прави модификација притоа капацитетот на влезната каскада да биде голем, $C_1 = C_2 = N \times C$ и $C_3 = C_4 = (N-1) \times C$. Оттука, за бранувањето на напонот се добива:

$$V_{rip} = \frac{I_0}{f \cdot C} \quad (1.15.4).$$

За голем број каскади, изразот N^2 во равенката 1.15.2 ќе биде доминантен, така што со диференцирање на оваа равенка може да се одреди бројот на каскадите:

$$\frac{dV_{out}}{dN} = 2V_{pk} - I_0 \cdot \frac{2N^2}{f \cdot C} = 0 \quad (1.15.5).$$

Оттука, бројот на каскадите е даден со равенката:

$$N = \left(\frac{V_{pk} \cdot f \cdot C}{I_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.15.6).$$

Зголемувањето на фреквенцијата може драматично да го намали бранувањето на напонот и падот на напонот при оптоварување, што доведува до негова употреба во уредите со прекини на моќноста. Ако напонот на секоја од диодите е V_{pk} и потребниот излезен напон $V_{0/c}$ (напон на отворен круг) се познати, тогаш излезниот напон е даден со равенката:

$$\begin{aligned} V_{out} &= N \left(2V_{pk} - I_0 \cdot \frac{4N^2}{6 \cdot f \cdot C} \right) = N \left(2V_{pk} - I_0 \cdot \frac{2 \cdot V_{pk} \cdot f \cdot C}{3 \cdot I_0 \cdot f \cdot C} \right) = \\ &= N \left(2V_{pk} - \frac{2}{3} V_{pk} \right) \end{aligned} \quad (1.15.7).$$

Оттука, оптималниот број каскади е даден со равенката:

$$N_{opt} = \frac{3V_{out}}{4V_{pk}} \quad (1.15.8).$$

1.16. Изработка на мултипликатор на напон

Овој вид извор на висок напон се користи за напојување на Гајгер милеровата цевка, која служи за детекција на радиоактивно зрачење. Мултипликаторот се изработува од четири исти кондензатори и четири исти диоди, поврзани на пертинакс плочка, како на слика 1.26. За таа цел, се прави шема на колото на лист хартија, според големината на плочката од каширан пертинакс. Исто така, водовите од колото може да се нацртаат на компјутер и да се печатат на обична хартија, притоа се проверува просторната распределба на елементите на колото. Елементите ќе треба да се постават од спротивната страна на бакарната фолија, од каширан пертинакс. Може нацртаната слика на бел лист хартија да се фотографира со мобилен телефон и да се пренесе на компјутер. Исто така, може шемата за водовите на печатената плочка да се нацрта со програмот Adobe Photoshop или со софтвер за шеми на печатена плочка, на пример Eagle. Покрај тоа, сликата од мобилниот телефон може да се доработи со програмот Adobe Photoshop, да се зголеми или намали дебелината на водовите кои треба да бидат со црна боја. Големината на сликата се контролира со алатката *слика* (Image) и опцијата *големина на сликата* (Image size). Откако ќе се утврди правилниот распоред, потоа се печати електронската шема со ласерски принтер на термална хартија, на страната каде што хартијата е мазна, т.е. има слој со термално лепило. Термалната фолија се поставува на страната на бакарната фолија на каширан пертинакс и се врши ламинација со пегла или со ламинатор. Имено, ламинацијата е рамномерно загревање на термалната фолија врз бакарната фолија од каширан пертинакс, на температура од 160 °C и за време од 1 минута. Веднаш потоа се одлепува термалната фолија, притоа печатените водови остануваат на бакарната фолија, од каширан пертинакс. За нагрзување на бакарот може да се користи воден раствор на фери хлорид хексахидрат (40 % FeCl₃ 6H₂O) или воден раствор од хлороводородна киселина и водороден пероксид (30 ml 9,5 M на HCl, 10 ml 34 M на H₂O₂ и 100 ml на H₂O). После нагрзувањето плочката се става во развивач (ацетон) за да се отстрани преостанатиот тонер (црната боја на водовите). На крајот остануваат бакарните водови, според сликата на маската. За поставување на електронските уреди на печатената плочка се прават дупчиња каде што ќе се сместат нозете на електронските уреди. Откако ќе се постават електронските уреди во дупчињата, се пристапува кон залемување, коешто се состои од топење на калај на местото каде што се поставени електронските уреди, со користење на калофониум, по потреба. Елементите се свртени со своите ножиња кон бакарните водови, притоа тие се поврзуваат со печатеното коло, со залемување. Процесот на залемување се состои од топење на калај на

местото каде што се поставени електронските уреди и поврзување со печатеното коло, со правење на легура на самата плоча при изладување на калајот. Всушност, зацрстувањето на елементите и електричниот контакт со печатената плоча се прави со залемување.

Покрај тоа, диодите треба да издржат $2V_{pk}$, притоа треба да се води сметка за насоката на спроводливост на диодите. Кондензаторите треба да бидат пластични, така што не мора да се води сметка за начинот на спојување на неговите краеве. Додека пак, ако се користат електролитски кондензатори, треба да се води сметка. Влезот на мултипликаторот се приклучува на наизменичен напон од трансформатор, а на излезот се сврзува работен отпорник R_L . Во зависност од вредноста на отпорот се мерат напонот и струјата на излезот. Резултатите се прикажуваат графички, како зависност на $V = f(I)$ и $V = f(R)$.

1.17. Претворац на прав напон во наизменичен напон (инвертор)

Претвораците од прав напон (DC) во наизменичен напон (AC) се викаат инвертори. Функцијата на инверторот е да го променат постојаниот влезен прав напон (DC) во симетричен наизменичен напон (AC), со определена големина и фреквенција. Излезниот напон може да биде фиксен или променлив, но може да има фиксна или променлива фреквенција. Променлив излезен напон може да се добие со промена на влезниот прав (DC) напон и одржување приносот на инверторот да биде константен. Приносот на инверторот е однос од променливиот излезен напон и влезниот прав напон (DC). Од друга страна, ако напонот на влезниот DC е константен, може да се добие променлив излезен напон со различен принос (ефикасност) на инверторот.

Излезниот напон на идеален инвертор треба да има форма на синусоида. Меѓутоа, во пракса излезниот напон на инвертор не е синусен, бидејќи содржи одредени хармоници. Овој вид инвертор во режим на прекинување на струјата, може да се примени за уреди со мал и среден излезен квадратен напон или квази-квдратен напон. Додека пак, за уреди со голема моќност, потребен е делумно синусоиден напон, со примена на полупроводнички уреди со мало време на реакција, а хармониците во излезниот напон ќе бидат минимални или значително намалени, во режим на прекинувачи.

Инверторите се користат во индустриски уреди (електромотори со различна брзина, транспорт, индукционо греење итн.), како и за примена во индивидуални уреди како што се батерии, горивни ќелии,

соларни ќелии или други извори на прав напон (DC). Обично излезниот напон е монофазен наизменичен напон од 220 V и фреквенција од 50 Hz, наизменичен напон од 120 V и фреквенција од 60 Hz, и наизменичен напон од 115 V и фреквенција од 400 Hz. Исто така, излезниот напон може да биде трофазен наизменичен напон од 220 до 380 V и фреквенција од 50 Hz, наизменичен напон од 120 до 208 V и фреквенција од 60 Hz, и наизменичен напон од 115 до 200 V и фреквенција од 400 Hz.

Всушност, инверторите можат да се класифицираат како: монофазни инвертори и трифазни инвертори. Инверторите користат уреди за вклучување и исклучување, како што се биполарни транзистори (BJT), метал оксидни полупроводнички транзистори со ефект на поле (MOSFET), биполарни транзистори со изолирани порти (IGBT), метал оксидни полупроводнички контролирани тиристоры (MCT), статички индукциски транзистори (SIT) и тиристоры со исклучување на портите (GTO). Инверторот може да биде инвертор за напон (VFI) ако влезниот напон остане константен, струен инвертор (CFI) ако влезната струја се одржува константна, и инвертор со променлив прав напон (dc) ако влезниот напон е контролиран од друг уред.

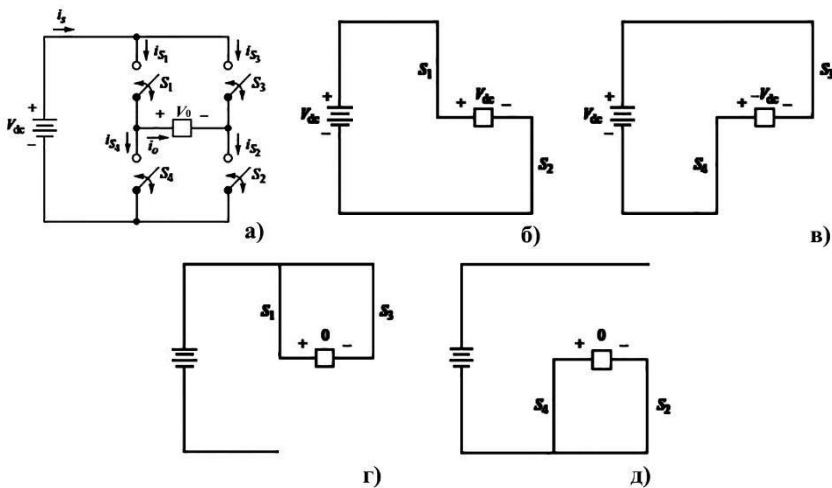
Ако излезниот напон или струја на инверторот се принудени да поминат низ вредност нула од некое LC резонантно коло, тогаш овој инвертор се нарекува резонантно пулсирачки инвертор, со голема примена во електроника за потрошувачи со голема моќност.

Од интерес е да се разгледа претворајач од прав напон (DC) во наизменичен напон (AC) со полубранов мост на претворба, т.е. инвертор кој дава наизменичен напон, за време на исклучување и вклучување на прекинувачите. Во овој случај, вредноста на правиот напон ќе биде минимална амплитуда во однос на наизменичниот напон (слика 1.28). Во овој уред, наизменичниот напон (AC) се добива од влезниот прав напон (DC), со затворање и отворање на прекинувачите, во соодветен период. Излезниот напон v_0 може да биде V_{dc} , $-V_{dc}$ или нула, во зависност од тоа кои прекинувачи се затворени. Возможни се следните ситуации (слика 1.28):

- а) прекинувачите S_1 и S_2 се затворени а излезниот напон е V_{dc}
- б) прекинувачите S_3 и S_4 се затворени а излезниот напон е $-V_{dc}$
- в) прекинувачите S_1 и S_3 се затворени а излезниот напон е 0 и
- г) прекинувачите S_2 и S_4 се затворени а излезниот напон е 0.

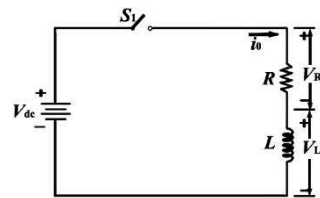
Од сликата се забележува дека прекинувачите S_1 и S_4 не треба да се затворени истовремено, бидејќи ќе настане краток спој на изворот на прав напон. Меѓутоа, прекинувачите не поминуваат од отворена во затворена состојба моментално. Затоа, времето за префрлување на прекинувачите од една состојба во друга состојба, треба да биде доволно големо за да не дојде до преклопување на овие состојби. За таа цел, ќе земеме дека претворајачот работи со режим на полубранов мост,

притоа се добива излезен квадратен напон. Прекинувачите го поврзуваат потрошувачот со $+V_{dc}$ кога S_1 и S_2 се затворени или со $-V_{dc}$ кога S_3 и S_4 се затворени. Периодично прекин на напонот на потрошувачот помеѓу $+V_{dc}$ и $-V_{dc}$ доведува излезниот напон да има квадратна форма, на краевите на потрошувачот. Иако добиениот излезен напон нема синусоидна форма, сепак може да служи како наизменичен напон (AC) во некои уреди.



Слика 1.28. а) Инвертор со комплетен мост, б) прекинувачите S_1 и S_2 се затворени, в) прекинувачите S_3 и S_4 се затворени, г) прекинувачите S_1 и S_3 се затворени и д) прекинувачите S_2 и S_4 се затворени.

Брановата форма на напонот во потрошувачот ќе зависи од компонентите на потрошувачот. За отпорен потрошувач моменталната бранова форма одговара на формата на излезниот напон. За индуктивен потрошувач струјата ќе има повеќе синусоиден карактер отколку напонот, поради својството на индуктивитетот за филтрирање на излезниот напон. При индуктивен потрошувач (електромотор, намотка итн.) овозможува дизајнирање на прекинувачи во колото на полубранов мост, затоа што струите низ прекинувачите мора да течат во двете насоки. Во случај на сериско поврзување на отпорник со индуктивитет (RL), излезниот напон треба да има квадратен облик. При претпоставка дека прекинувачите S_1 и S_2 се затворени, напонот на краевите на потрошувачот е $+V_{dc}$ и струјата се зголемува (слика 1.29), но не ја постигнува максималната вредност затоа што струјата се троши за зголемување на магнетното поле во индуктивитетот.



Слика 1.29. а) Течење на струјата при сериско врзување на отпорник со индуктивитет.

Со вклучување на прекинувачите S_1 и S_2 низ електричниот круг течењето на струјата е дадено со равенката:

$$L \frac{di_f}{dt} + i_f R = V_{dc} \quad (1.17.1),$$

$$\frac{L}{R} \frac{di_f}{dt} + i_f = \frac{V_{dc}}{R} \quad (1.17.2).$$

За таа цел, се бара решение на хомогената диференцијална равенка и на неа се додава делумното решение:

$$\frac{L}{R} \frac{di_f}{dt} + i_f = 0 \quad (1.17.3).$$

$$\frac{di_f}{dt} = -\frac{R}{L} i_f \quad (1.17.4),$$

$$\frac{di_f}{i_f} = -\frac{R}{L} dt \quad (1.17.5),$$

каде што решение на равенката е:

$$\ln i_f = -\frac{R}{L} t + \ln \text{const} \quad (1.17.6),$$

$$\ln \frac{i_f}{A} = -\frac{R}{L} t \quad (1.17.7),$$

$$i_f = A e^{-\frac{R}{L} t} = A e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.17.8),$$

каде што A е константа, $\tau = \frac{L}{R}$ е временска константа, при што струјата ќе се намали за e пати. Додека пак, делумното (партикуларно) решение е дадено со равенката:

$$i_n = \frac{V_{dc}}{R} \quad (1.17.9).$$

На општото решение се додава делумното (партикуларното) решение:

$$i_0 = i_f + i_n = \frac{V_{dc}}{R} + A e^{-\frac{R}{L} t}, \text{ за } 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (1.17.10),$$

каде што константата A е константа која може да се пресмета од почетните услови. За време $t = 0$ струјата низ индукторот е минимална (слика 1.30), а со текот на времето расте сè додека не достигне заситување. Со замена $t = 0$ во равенката 1.16.10 се добива:

$$i_0 = \frac{V_{dc}}{R} + A e^0 = I_{\min}, \text{ за } t = 0 \quad (1.17.11) \text{ и}$$

$$A = I_{\min} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (1.17.12).$$

За период од $\frac{T}{2} \leq t \leq T$ прекинувачите S_1 и S_2 се отворени, а прекинувачите S_3 и S_4 се затворени, тогаш напонот на потрошувачот (сериски поврзани отпорник R и индуктивитет L) е $-V_{dc}$. Додека пак, струјата е дадена со равенката:

$$i_0 = -\frac{V_{dc}}{R} + Be^{-\left(t-\frac{T}{2}\right)/\tau},$$

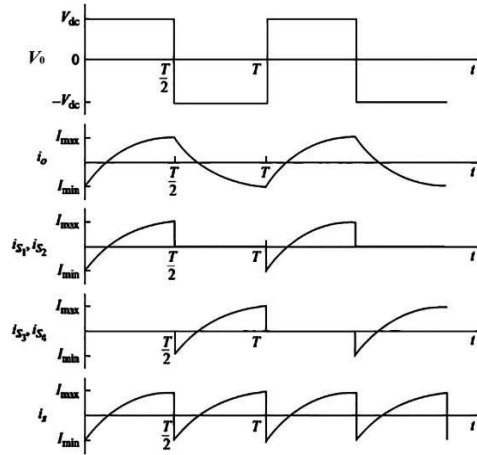
$$\text{за } \frac{T}{2} \leq t \leq T \quad (1.17.13),$$

каде што константата B е константа која може да се пресмета од почетните услови. Струјата што тече низ електричниот круг при $t = \frac{T}{2}$ е максимална

и се добива со равенката:

$$i_0 = -\frac{V_{dc}}{R} + Be^0 = I_{\max} \quad (1.17.14) \text{ и}$$

$$B = I_{\max} + \frac{V_{dc}}{R} \quad (1.17.15).$$



Слика 1.30. Излезен квадратен напон и струја на инвертор во стабилна состојба, при сериски поврзани отпорник R и индуктивитет L .

1.18. Полубранов и целобранов инвертор

Во воведот за инвертор се разгледува наједноставен полубранов инвертор, каде што два прекинувача ја дефинираат едната полупериода, а другите два прекинувача ја дефинираат другата полупериода на инверторот или уште се вика полубранов инвертор. Од претходните равенки 1.17.10, 1.17.12, 1.17.13 и 1.17.15 треба да се опише стабилната работа на инверторот, притоа струјата ги менува вредностите (слика 1.31):

$$i_0 = \frac{V_{dc}}{R} + Ae^{-\frac{Rt}{L}} = \frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{\min} - \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-\frac{Rt}{L}} \quad \text{за } 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (1.18.1) \text{ и}$$

$$i_0 = -\frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{\max} + \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-\left(\frac{T}{2}-t\right)\frac{R}{L}} \quad \text{за } \frac{T}{2} \leq t \leq T \quad (1.18.2).$$

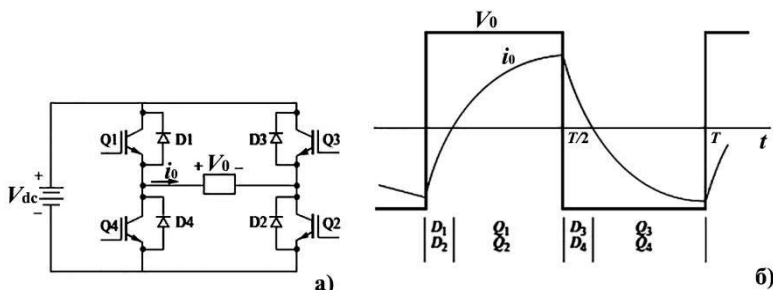
Покрај тоа, со замена на $t = \frac{T}{2}$ во равенката (1.18.1), струјата е максимална:

$$\begin{aligned} I_{\max} &= \frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{\min} - \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-\frac{RT}{2L}} = \\ &= \frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{\min} - \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-\left(\frac{T}{2\tau}\right)} \end{aligned} \quad (1.18.3),$$

$$I_{\max} = I_{\min} \cdot e^{-\left(\frac{T}{2\tau}\right)} + \frac{V_{dc}}{R} \left(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}} \right) \quad (1.18.4).$$

Од друга страна, со замена на $t = T$ во равенката (1.18.2) се добива:

$$I_{\min} = -\frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{\max} + \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-\left(T-\frac{T}{2}\right)\frac{R}{L}} = -\frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{\max} + \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-\frac{T}{2\tau}} =$$



Слика 1.31. а) Инвертор со целобранов мост, б) струја низ инверторот во стабилна состојба, при сериски поврзани отпорник R и индуктивитет L .

$$= -\frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{max} + \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-\frac{T}{2\tau}} = I_{max} e^{-\frac{T}{2\tau}} - \frac{V_{dc}}{R} \left(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}} \right) \quad (1.18.5),$$

Со помножување на последната равенка со -1, се добива:

$$-I_{min} = \frac{V_{dc}}{R} \left(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}} \right) - I_{max} e^{-\frac{T}{2\tau}} \quad (1.18.6).$$

Од равенките 1.18.4 и 1.18.6 се добива:

$$I_{max} = -I_{min} \quad (1.18.7), \quad \text{и}$$

ако се замени во равенка 1.18.4 се добива:

$$I_{max} = -I_{max} \cdot e^{-\frac{T}{2\tau}} + \frac{V_{dc}}{R} \left(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}} \right) \quad (1.18.8),$$

$$I_{max} \left(1 + e^{-\frac{T}{2\tau}} \right) = \frac{V_{dc}}{R} \left(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}} \right) \quad (1.18.9),$$

$$I_{max} = \frac{V_{dc}}{R} \frac{\left(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}} \right)}{\left(1 + e^{-\frac{T}{2\tau}} \right)} = \frac{V_{dc}}{R} \tanh\left(\frac{T}{2\tau}\right) \quad (1.18.10).$$

Моќноста што ја троши потрошувачот може да се одреди од $I_{rms}^2 R$ и со интеграција на струјата од времето, а поради симетријата на струјата доволно е да се интегрира за еден полупериод (равенка 1.18.3):

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left[\frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{min} - \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-\left(\frac{T}{2\tau}\right)} \right]^2 dt} \quad (1.18.11).$$

Во идеални услови, моќноста што ја троши потрошувачот треба да биде иста со моќноста на изворот на прав напон:

$$P_{dc} = V_{dc} \cdot I_s \quad (1.18.12).$$

Додека пак, целобрановите претвораачи поседуваат прекинувачи кои се способни да креираат позитивни и негативни струи на потрошувачот, кој претставува сериски поврзан отпорник R и индуктивитет L (слика 1.31). Од друга страна, намотката со индуктивитет L може да биде примарна намотка на еден трансформатор, а во секундарната намотка ќе биде сврзан потрошувачот. Обично, во електронски уреди струјата тече само во една насока. За да се промени насоката на струјата се користат диоди, а во исто време и како прекинувачи. Имено, за период кога струјата треба да се префрли да биде негативна со помош на прекинувачот, низ диодите за повратна врска ќе тече струја. Имено, при вклучени прекинувачи со помош на транзисторите Q_1 и Q_2 , струјата што тече низ индуктивитетот (индукторот) ќе придонесе за зголемување на магнет-

ното поле во јадрото. При исклучување на прекинувачите (транзисторите Q_1 и Q_2) индуцираната струја ќе има спротивна насока и ќе придонесе за течење на струјата низ диодите D_3 и D_4 . Всушност, кога транзисторите Q_1 и Q_2 се исклучени, струјата што тече низ потрошувачот мора да биде непрекината и ќе се пренесе во диоди D_3 и D_4 , со што излезниот напон $-V_{dc}$ поминува низ вклучените прекинувачи 3 и 4, пред транзисторите Q_3 и Q_4 да се во спроводна состојба. Додека пак, диодите ќе бидат инверзно поларизирани кога струјата е позитивна и тече преку прекинувачот. Инвертор со целобранов напон се конструира кога прекинувачите се биполарни транзистори (IGBT) со изолирани порти, а диодите се употребуваат за повратна врска. Струите низ транзисторот и диодите имаат квадратен облик, а струјата ќе биде синусодална откако ќе помине низ потрошувач од сериски поврзан отпорник R и индуктивитет L .

Моќноста на инверторот, т.е моќноста што се испорачува на отпорникот е дадена со равенката:

$$P_0 = V_{dc} \cdot I_s = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} V_{dc} \cdot i_0 \cdot dt = i_{0rms}^2 \cdot R \quad (1.18.13).$$

Оттука се одредува максималната струја што тече низ потрошувачот:

$$i_{rms} = \sqrt{\frac{P_0}{R}} = \sqrt{\frac{V_{dc} \cdot I_s}{R}} \quad (1.18.14).$$

Бидејќи се работи за периодични промени на напонот и струјата, нивната вредност може да се одреди со разложување во ред на Фурије. За да се одреди излезниот напон, треба интеграцијата да се поедностави со искористување на симетријата на брановата форма. Бидејќи овие две полупериоди се идентични, треба само за првиот полупериод да се одреди напонот, а за еден период ќе биде двапати поголем. Оттука, излезниот напон на краевите на потрошувачот се изразува со равенката:

$$V_0 = \frac{4}{\pi} V_{dc} \sum_{n \text{ (непар)}}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \cdot n\omega_0 t \quad (1.18.15),$$

каде што $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi/t_2$, $T/2 \leq t_2 \leq T$ и за $n = 1$ фундаменталната фреквенција е $f_0 = \frac{4}{\pi} V_{dc}$. Во тој случај, излезниот напон на потрошувачот ќе биде:

$$V_{01} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{dc} = 0.90 \cdot V_{dc} \quad (1.18.16).$$

Додека пак, струјата низ потрошувачот е дадена со равенката:

$$i_0 = \frac{4}{\pi} V_{dc} \sum_{n \text{ (непар)}}^{\infty} \frac{1}{nZ_n} \sin(n\omega_0 t - \varphi_0) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} I_n \sin(n\omega_0 t - \varphi_0) \quad (1.87.17),$$

каде што $Z = \sqrt{R^2 + (n\omega_0 L)^2}$ е импеданс на потрошувачот, $I_{rms} = \frac{I_n}{\sqrt{2}}$,

$$\varphi_0 = \tan^{-1}\left(\frac{n\omega_0 L}{R}\right) \text{ и } \cos\varphi_1 = R/Z_1.$$

2. ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИ УРЕДИ

Електроакустичните уреди се уреди за трансформација на електрична енергија во енергија на акустични (звучни) бранови и обратно. Во зависност од насоката на претворба се разликуваат електроакустичните емитери, и приемници на звук (сензори). Во ова група спаѓат: микрофони, слушалки, звучници и други уреди на вибрации. Од друга страна, овие претворачи се користат за зрачење и прием на еластични деформации на некоја средина во ултразвучната техника (недеструктивна контрола), во хидроакустика (хидролокација, подводна комуникација, сонари), во акустоелектроника (претворачи на физички величини, електрични филтри, дефекти на материјали и друго), во медицина (ултразвучна дијагноза и набљудување), во системи за безбедност.

2.1. Електроакустични претворачи

Предмет на електроакустиката е примена на електрични кругови и еквивалентни електромеханички кругови во објаснување на принципот на работа на акустичномеханичките уреди. Во класичната механика, посебна глава е посветена на механичките осцилации и бранови. Развојот на оваа област почна со појавата на телефоните, радиото и уредите за репродукција на аудиосигнали. Во електроакустичните претворачи обично се случува двонасочна претворба на електричната енергија во механичка и обратно, т.е. работат како емитер и приемник на зрачење. Наједноставен пример е појава на електрична искра помеѓу облак и земјата, и поради нагло загревање на воздухот и негово ширење се јавува звук, во форма на грмотевица. Од друга страна, звучни приемници се уреди каде што промената на притисокот на воздухот, предизвикан од звук доведува до промена на електричните својства на приемникот (јагленов микрофон или полупроводнички приемници). Микрофонот служи за претворање на звучните осцилации во електрични импулси. Акцелореметарот е уред за претворање на механичкото забрзување во електрични импулси. Хидрофонот е уред за претворање во електрични импулси на звучните осцилации кои се појавуваат во

водата. Додека пак, геофонот е уред за претворање во електрични импулси на звучните осцилации кои се појавуваат во земјината кора. Исто така, еден од најсовремените уреди е сонарот, кој дава можност за визуализација на движења на предмети и животни во водата.

За опишување на работата на овие уреди се прават шематски дијаграми за да се добие визуелна слика за системот. Потоа се поставуваат диференцијални равенки кои верно ќе го одразат системот. Покрај тоа, во шематските дијаграми како единствената независна променлива е времето. Во овие системи кои се вообичаени во акустиката, може да има три просторно променливи и една временска променлива. За добивање на точни сознанија на системот треба да бидат исполнети четири главни барања:

- методите треба обезбедат шематски дијаграм на уредите;
- електричните, механичките и акустичните елементи треба се сместат во еден шематски дијаграм;
- во секој елемент во комбинирани кола треба да се препознаат физичките величини сила, напон, маса, индуктивност, капацитет и така натаму;
- за елементите треба да ги користат познатите симболи и правилата за електрични кола.

Обично еден елемент може да задоволува две барања, но не може сите четири.

Видот на електромеханички претвораач зависи од неговите електрични и механички својства, импеданса, трајност и цена. Во зависност од видот на претворбата тие можат да бидат електромагнетни и електростатски уреди. Меѓутоа, звучниците и микрофоните можат да се сметат како електромагнетни и електростатски претвораачи, каде што механичките и електричните својства можат да бидат изразени со еден шематски дијаграм.

Во зависност од физичките ефекти кои се користат за нивна работа, која може да биде повратна (реверзибилна) и неповратна (иреверзибилна), тие се делат на:

- електродинамички претвораачи, движење на спроводник под дејство на електрична струја (емитери на зрачење);
- електромагнетни индукциони приемници, движење на спроводник во магнетно поле, на пример, звучници, микрофони;
- електростатски претвораачи, чија работа се заснова на промена на силата на привлекување на електроди при промена на притисок и наелектризирање, или промена на напон при релативно движење на електродите на кондензаторот (звучници, микрофони);
- пиезоелектрични претвораачи, чија работа се заснова на промена на електрична поларизација при нивна механичка деформација во воздух или вода;

- електростриктивни претворачи, уреди кои се деформираат во променливи електрична полиња;
- магнетостриктивни претворачи, уреди кои се деформираат во променливи магнетни полиња;
- електрети, уреди со трајна електрична поларизација при нивно поставување во електрично поле;
- хидроакустични претворачи, чија работа се заснова на промена на електрична поларизација, при нивна механичка деформација во вода.

Електроакустичните претворачи (емитери) можат да работат и како приемници на акустичен сигнал (сензори), со што нивната функција ќе биде комплетна, а во пракса најчесто се користат пиезоелектрични претворачи. Пиезокерамички и магнетостриктивни претворачи работат врз база на лонгитудинални механички бранови, чија амплитуда се зголемува со вметнување на течност, помеѓу површината на претвораот и дадено тело (средина). Овој дополнителен слој е со мала дебелина, го раздвојува претвораот од работното тело, така што речиси воопшто не се апсорбира во него звучниот бран, а се остварува контакт со него. Меѓутоа, коефициентот на трансмисија на претвораот се зголемува до 9 пати. Исто така, зголемување на амплитудата може да се постигне и со користење на ултразвучни концентратори.



а)



б)

Слика 2.1. а) Уред за зурење и б) уреди за своњење.

Од друга страна, промената на формата на електроакустичните претворачи е со голем коефициент на ефикасност, притоа нивната акустична импеданса е значително помала. За таа цел, се користат асиметрични пиезокерамички претворачи. Електроакустичните претворачи се користат како интерфони, уреди за зурење, сирени и друго (слика 2.1). Недостатоци на електроакустичните претворачи се релативно ниското ниво на звук и тесниот појас на фреквенциите на емитирање.

Покрај тоа, важна карактеристика на електроакустичните претворачи е нивната просторната ефикасност, т.е. распределбата на

емитираната енергија во дадена насока (слика 2.2). Од сликата се гледа дека емитувањето на звук има насока со одреден пик, апертурен агол на емисија и износ на енергија, како и два дополнителни пикови со помал интензитет од втор ред.

Квалитетот на електро-акустичните емитери (радијатори) се одредува според следните својства:

а) акустичната моќност P_A , која претставува емитирана звучна енергија поделена со времето на емитување,

б) коефициент на електроакустична ефикасност η_{EA} , која е однос на емитираната акустична енергија и потрошената електрична енергија P_E ,

в) влезен електричен отпор Z , кој е однос на напон за напојување U и на струја I во претвораот,

г) насока на зрачење, која ја дава дистрибуцијата на енергијата на зрачење во зависност од аголот простирање на тоа зрачење, и

д) фактор на насока на зрачење, кој е однос од интензитетот на звукот во којшто зрачењето е максимално и интензитетот на звукот во друг правец, но на исто растојание од изворот.

Додека пак, електроакустичните приемници се карактеризираат со следните својства:

а) осетливост M , која се одредува од односот на напон на отворен круг (без отпор) на претвораот и акустичен притисок,

б) електричен отпор Z , кој е односот на излезниот напон и струја, на приемникот,

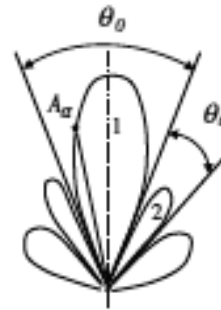
в) карактеристика на насоката на приемникот, која е нормализирана аголна распределба на осетливоста на приемникот во однос на максималната енергија, и

г) коефициент на концентрација K_a , кој е однос на максималната осетливост на квадрат и средната осетливост на квадрат за сите други насоки. За повратни (реверзибилни) претвораи коефициент на концентрација е ист за емитери и приемници.

Ефикасноста на приемникот зависи од осетливоста на елонгацијата (која било промена на осцилирање – треперење на приемникот), која се одредува од равенката:

$$M_{sp} = M / \sqrt{|Z_i|} \quad (2.1.1),$$

каде што M е осетливост на претвораот и $|Z_i|$ е модул на внатрешен отпор на приемникот, која ја карактеризира неговата стабилност на

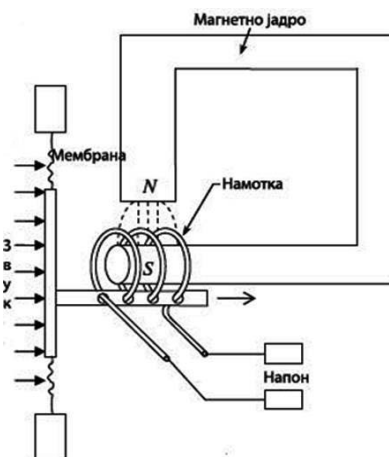


Слика 2.2. Просторна распределба на зрачењето кај електро-акустичните претвораи: основен пик-1 и два споредни пикови-2.

шумовите од електричните уреди. Сите карактеристики на претворачите зависат и од нивната фреквенција.

2.2. Електродинамични претворачи

Покрај различните форми на претворачи, сепак електродинамичките претворачи главно се основа за дизајн на звучници. Имено, тие се пронајдени од страна на Ц. В. Рајс и Е. В. Келог во 1925 година, притоа биле приклучени на засилувач, изведен со вакуум-цевката со цел за нивна употреба на аудиотехнологија. Принципот на работа е даден на слика 2.3 и се заснова на движење на спроводник во магнетно поле, каде што имаме постојан магнет и во процепот помеѓу магнетните полови е сместена намотка. Магнетното поле е хомогено, а намотката е прицврстена на мембрана и осцилира во насока нормално на правецот на магнетното поле. Ако претворачот е електродинамички микрофон, тогаш намотката ќе се движи напред – назад под дејство на променливиот интензитет на звукот, а со тоа се индуцира напон на нејзините краеве. Додека пак, ако претворачот е електродинамички звучник, тогаш намотката ќе се движи напред – назад под дејство на променливата струја, а заедно со неа ќе се движи и мембраната, што ќе доведе до простирање на звучни бранови (звук).



Слика 2.3. Електродинамички претворувач.

Во овој случај ќе земеме дека под дејство на електричната струја, намотката се движи напред – назад, во согласност со Флеминговото правило. Силата што придонесува за придвижување на намотката, а со тоа и на мембраната е дадена со равенката:

$$F_d = BIl \quad (2.2.1),$$

каде што F_d е силата на придвижување на намотката, во њутни (N), B е магнетната индукција во W_b/m^2 , l е вкупната должина на намотката и I е струјата што тече низ намотката. При движење на намотката со брзина која е одредена од силата на придвижување F_d , се индуцира електромоторна сила E_{ind} , чија насока е спротивна од насоката на надворешното електрично поле. Индуцираната електромоторна сила E_{ind} е дадена со равенката:

$$E_{\text{ind}} = -Blv \quad (2.2.2),$$

каде што l е вкупната должина на намотката во метри, v е брзина на движење на намотката во m/s. Изразот Bl во равенката 2.2.1 се нарекува коефициент на моќност A , и ја одредува ефикасноста на динамичкиот претворач. Ако земеме дека механичкиот импеданс на системот што осцилира е Z_m од страната на намотката, а во исто време на системот намотка – мембрана дејствува надворешната сила F (звукот), а F_d силата на придвижување на намотката е во рамнотежа со механичката инертност на системот, дадено со равенката:

$$F + F_d = Z_m \cdot v \quad (2.2.3),$$

$$F = Z_m \cdot v - A \cdot I \quad (2.2.4),$$

$$F = Z_m \cdot v - B \cdot l \cdot I = Z_m \cdot v - M \cdot I \quad (2.2.5),$$

каде што $M = B \cdot l$ е електромеханичка врска.

Мехничкиот импеданс е однос од приложената сила на дадено тело и брзината што ја има тоа тело. Мехничкиот импеданс е реципрочна вредност од подвижноста на системот и во него се вклучени еластичноста на мембраната, отпорот на воздухот и инерцијата на системот намотка – мембрана.

Ако земеме дека надворешната сила е нула, тогаш се добива:

$$0 = Z_m \cdot v - M \cdot I \quad (2.2.6),$$

$$Z_m \cdot v = M \cdot I \quad (2.2.7),$$

$$v = \frac{M}{Z_m} \cdot I \quad (2.2.8),$$

Од друга страна, системот може да го разгледуваме како електричен систем, притоа напонот на краевите на намотката U и индуцираниот напон E_{ind} зависат од падот на напонот на краевите на намотката:

$$U + E_{\text{ind}} = Z_e \cdot I \quad (2.2.9),$$

$$U = B \cdot l \cdot v + Z_e \cdot I \quad (2.2.10),$$

$$U = M \cdot v + Z_e \cdot I \quad (2.2.11).$$

каде што Z_e е електричниот импеданс на намотката во Ω . Со замена на равенката 2.2.8 во равенката 2.2.11 се добива:

$$U = \frac{M^2}{Z_m} \cdot I + Z_e \cdot I \quad (2.2.12).$$

Оттука се добива дека вкупниот импеданс се јавува заради вибрации на системот намотка – мембрана во магнетно поле и течење на струја низ неа, даден со равенката:

$$Z_{\text{tot}} = \frac{M^2}{Z_m} + Z_e \quad (2.2.13).$$

каде што Z_e е електричниот импеданс и M^2/Z_m е кинетичкиот отпор.

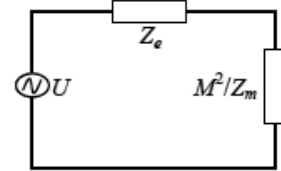
Еквивалентната шема на ваквиот круг е дадена на слика 2.4.

Кинетичкиот отпор се јавува заради осцилирање на системот намотка – мембрана во магнетното поле и тој се состои од:

а) активен отпор, заради кочење на мембраната (дијафрагмата) од воздушниот столб, т.е. отпорот на воздухот на движењето на мембраната,

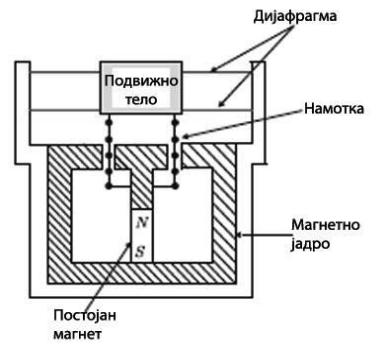
б) капацитативен отпор, заради инерција на системот намотка-мембрана и

в) индуктивен отпор, еластичноста на мембраната.



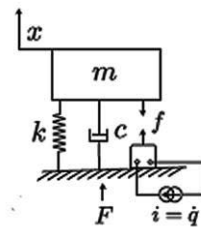
Слика 2.4. Еквивалентна шема на електродинамички претворувач.

Ако мембраната на некој начин се закочи, тогаш кинетичкиот отпор е нула, така што вкупниот отпор е еднаков на електричниот отпор. Покрај тоа, индуцираната струја во намотката е со обратна насока од струјата што се должи на приложеното електрично поле. Затоа, кај звучниците индуцираната струја е занемарлива во однос на струјата што ја придвижува мембраната. Тоа се прави со течење на голема струја низ намотката, кое придонесува за намалување на изобличувањето на звучниот сигнал. Би-дејќи се работи за осцилаторен систем, треба резонантната фреквенција да биде надвор од фреквенцијата на аудиозвукот.



Слика 2.5. Електромагнетен претворувач.

Пример за електродинамичен претворач е електромагнетски претворач, каде што дијафрагма е прицврстена на спроводник во форма на пружина и е поставена во постојано магнетно поле. Низ пружината тече наизменична струја притоа истата се привлекува или одбива во постојаното хомогено поле, кое е нормално на насоката на движење на струјата. На слика 2.5 е даден пресек на електродинамични претворач, за аудиосигнали. Еквивалентна шема за електромагнетен претворач на тело со маса m е дадена на слика 2.6, каде што тоа е поврзано со пружина со коефициент на еластичност k , амортизер со коефициент на пригушување c , на кое дејствува сила f . Всушност, електромагнетниот претворач е претворач со намотка со константна електро-



Слика 2.6. Еквивалентна шема на електромагнетен претворувач со маса m .

механичка врска, придвижена од струен генератор i , а пружината претставува мембрана, која се движи линеарно со подвижната маса. Дијафрагмата е под дејство на силата на привлекување F_m од страна на статичко магнетно поле и надворешна сила F . Осцилациите на дијафрагмата се збир од статичко поместување ξ_s кое се должи на привлечната сила на статичкото магнетно поле и динамичко поместување ξ_d кое се должи на променливото магнетно поле и надворешна сила F (слика 2.6). Вкупното поместување ξ што го прави дијафрагмата е дадено со равенката:

$$\xi = \xi_s + \xi_d \quad (2.2.14).$$

Ако земеме дека степенот на слободи на дијафрагмата е 1, тоа значи дека системот може да се движи по една оска, напред – назад. Системот може да се претстави со еквивалентна маса m , со одреден механички отпор r и жилавост на намотката s . Жилавоста на едно тело е мерка на неговата отпорност на деформација, при дејство на надворешна сила ($s = F/\xi_s$). Оттука, во услови на рамнотежа силите кои дејствуваат на електромагнетниот претвораќ се дадени со равенката:

$$F + F_m = m \frac{d^2 \xi}{dt^2} + r \frac{d\xi}{dt} + s\xi \quad (2.2.15).$$

Првиот член од десната страна на равенката е Вториот Њутнов закон, вториот член го дава кинетичкиот отпор и третиот член е силата според Хуковиот закон.

2.3 Електромагнетен микрофон и звучник

Електромагнетниот микрофон изведен со подвижна намотка е уред за регистрација на аудиосигналите со голема осетливост. Главно се користи во радиодифузијата на одредени канали и во уредите кои користат долги кабли, со цел пренос на аудиосигналот. Мембраната на микрофонот е поврзана со подвижната намотка, којашто е во неговиот центар и се наоѓа во магнетно поле. Движења на мембраната се резултат на звучните бранови, кои придонесуваат за појава на напон на краевите на намотката. Динамичниот микрофон е механички цврст уред, но неговата мала фреквентна осетливост ја ограничува неговата употреба во областа на акустиката.

Микрофони со подвижна намотка се дизајнирани да имаат најголема осетливост на 1000 Hz. Механичката резонанца на подвижната намотка и дијафрагмата е околу 800 Hz. Ако резонантната фреквенција не биде пригушена со амортизер, тогаш брзината на подвижната намотка ќе достигне максимална вредност на 800 Hz. Исто така, при

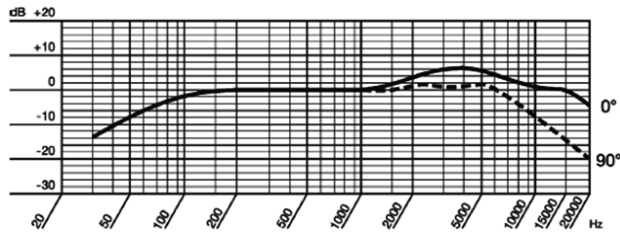
резонанција движењето на намотката е силно пригушено од акустичниот отпор, притоа осетливоста на микрофонот е речиси иста, во фреквентен опсег 40 Hz до 20.000 Hz.

Осетливоста зависи од интензитетот на звукот и фреквенцијата. Меѓутоа, во опсег на фреквенции од 40 Hz и 16,000 Hz може да детектира промена на интензитетот на звукот од 5 dB. Исто така, може да биде измерен звучен притисок во опсег од 16 dB (*SPL* – ниво на интензитет на звук) до 140 dB *SPL*, со точност од 20 μ Pa. Додека пак, осетливоста на микрофонот е 3 dB до 5 dB при фреквенција 1000 Hz, при промена на температурата од -12.2 °C до 37.8 °C, притисок во опсег од 86660 Pa до 103991 Pa, и опсег на релативна влажност од 0 % до 90 %. Од друга страна, неговата електрична импеданса зависи од намотката (калемот од жица). За микрофони со подвижна намотка електричната импеданса изнесува околу 300 Ω . При максималната осетливост која е на 1000 Hz доминира отпорната компонента над реактивната компонента. Механичката импеданса е занемарлива и се смета дека не влијае на регистрираниот звучен притисок. Електромагнетниот микрофон се поврзува со засилувач, преку трансформатор за прилагодување на неговиот излезен отпор со отпорот на засилувачот.

Електромагнетниот микрофон со подвижна намотка (калем) се состои од дијафрагма која е прицврстена за намотката, а калемот од жица е сместен во магнетно поле (слика 2.5). Покрај тоа, зад и пред дијафрагмата има акустични кругови за да ја зголеми осетливоста на микрофонот во голем фреквентен опсег (слика 2.7). Звукот поминува низ решетката на микрофонот и поминува низ отворите и стасува до дијафрагмата, која формира мала акустична маса и мала акустична отпорност. Отворите се толку мали, но во голем број, што овозможува поголема фреквентна осетливост. Меѓутоа, шуплината помеѓу дупките и дијафрагмата е таква што постои мала акустична усогласеност. Всушност, звучниот притисок p_b е оној што го дава звучниот бран од предната страна на мрежата (решетката). Иако звукот се простира кон дијафрагмата од различни точки на решетката, така што влијанието помеѓу тие два звука е минимално, а со тоа и капацитативниот или кинетичкиот отпор ќе биде минимален. Оттука, може да се земе дека изобличувањето ќе биде занемарливо при користење на заштитна решетка (во форма на капа), за сите фреквенции на звукот освен за високите фреквенции. Звук кој доаѓа под агол нула, во насока на оската на микрофонот има поголема осетливост, отколку звук којшто се шири под агол од 90° (слика 2.8).



Слика 2.7. Пресек на електромагнетен микрофон.

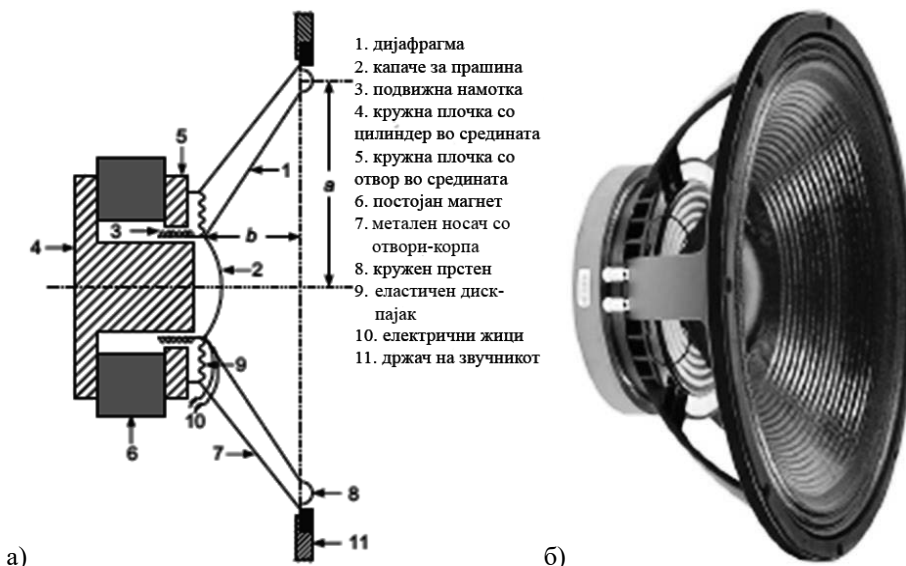


Слика 2.8. Фреквентна осетливост на електромагнетен микрофон.

Електродинамичен звучник или звучник со подвижна намотка (калем) е електромагнетски претвораќач, за претворање на електрични сигнали во аудиосигнали. Звучникот се состои од извор на звук и кутија за звучникот. Обично звучникот е излезен уред на некој апарат, притоа неговата ефикасност е од особена важност. За напојување на звучникот се користи засилувач со моќност соодветна на звучникот и мал излезен отпор, усогласен со отпорот на звучникот. За вибрација на звучната мембрана потребни се големи струи, затоа електричниот отпор на звучникот е доста мал. Во последно време се тежнее кон засилувач со голема ефикасност и моќност, а звучникот треба да биде со мала мембрана. Така, на пример, кај мобилните телефони кои зависат од моќноста на батеријата, еден од проблемите е ефикасноста на звучникот. За таа цел, неговите димензии се мали и регистрацијата на звукот обично се прави во непосредна близина на увото.

Звучникот може да биде направен од површина во форма на инка (дијафрагма), притоа се емитира звук директно во воздухот (слика 2.9). Исто така, звучникот може да има форма на труба, која е поставена помеѓу дијафрагмата и воздухот. Зрачењето од задната страна на звучниците со директно зрачење е обично спречено со кутија, или да биде намалено до извесен степен. Формата и дизајнот на кутијата на звучникот придонесуваат за начинот на ширење на звукот од звучникот. Во исто време се појавуваат и вибрации на сидовите на кутијата, што може негативно да влијае на квалитетот на звукот.

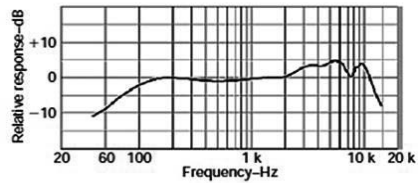
Звучникот во форма на инка може да биде направен од дијафрагмата во форма на конус, која е направена од соодветно лесен и тврд материјал, а цврстината на дијафрагмата се должи и на нејзината закривеност. Во центарот на дијафрагмата има капаче коешто го штити звучникот од метална прашина за да не навлезе во просторот каде е подвижната рамка. Тоа може да доведе до намалување на интензитетот на звукот и изобличување. Исто така, слично, метален капак постои и на задната страна на звучникот, за да не се нафаќа прашина и за да го држи еластичниот носач-пајак, којшто е направен од импрегниран текстил, кој се добива со негово натопување во фенолна смола. Всушност, на задната страна во металниот капак има кружна плочка од



Слика 2.9. Електродинамичен звучник: а) шематски дијаграм и б) комерцијален звучник.

феромагнетна легура, при што во средината се издигнува цилиндар. На плочката се поставува прстенест постојан магнет, а врз него се става железна плочка во форма на прстен. Во просторот помеѓу железната плочка во форма на прстен и на цилиндарот се создава силно хомогено магнетно поле, а во тој простор се поставува подвижната намотка. Магнетното поле B се создава од перманентен (постојан) феритен магнет со јачина на магнетното поле од 1 Т (тесла), во воздушниот процеп (зјај) од 1 mm до 2 mm, во којшто магнетното поле е хомогено. Намотката при вибрации останува во хомогеното магнетно поле и се состои од неколку навивки и дебелината на жицата е 0,1 mm, а електричниот отпор на жицата е 4 Ω . Предниот дел од дијафрагмата се прицврстува на металниот носач, во форма на кружен прстен. Во средината на дијафрагмата е прицврстена подвижната намотка (калем), а еластичниот диск-пајак ги поврзува спојот помеѓу подвижната намотка и дијафрагмата, со железна плочка во форма на прстен. Краевите на електричните жици од намотката се поврзани со електричниот извор кој дава променлив напон, преку еластични жици кои се поставени на средината на дијафрагмата. На металниот носач постојат отвори – корпа, кои овозможуваат простирање на звук кон назад, а во исто време и напред, т.е. слободен простор за осцилирање на дијафрагмата, со ист воздушен притисок како и од предната страна, така и од задната страна на дијафрагмата. Дијафрагмата со подвижната намотка слободно се движи само во аксијална насока.

Фреквентната осетливост на звучник во форма на инка, со дијаметар на дијафрагмата од 100 mm и без кутија е дадена на слика 2.10. Од сликата се гледа дека осетливоста на ниски и високи фреквенции се намалува. Всушност, масата на подвижната намотка со дијафрагмата е доста мала, за да се намали нејзината инертност на високи фреквенции. Меѓутоа, сепак осетливоста е мала на високи фреквенции поради инерцијата на системот. Затоа, дијафрагмата на звучниците за висока фреквенција се поместува помалку отколку оние со низок и среден фреквентен опсег, а нејзината маса изнесува од 10 g до 100 g.



Слика 2.10. Фреквентна осетливост на електродинамичен звучник.

Друг вид звучници се слушалките кои се мали звучници, поставени врз ушната школка и зрачат звук блиску до отворот на ушниот канал. Растојанието помеѓу отворот на ушниот канал и слушалката е околу 5 cm или помалку, додека, ушните слушалки се уреди дизајнирани за да бидат вметнати во ушниот канал.

При ниски фреквенции, дијафрагмата и системот за поддршка (подвижната намотка и рамка) треба да осцилираат со една фреквенција, односно да бидат еден систем, кој е во резонанција. Дијафрагмата со системот за поддршка се карактеризира со: брзината, амплитудата и звучен притисок. Во услови на резонанција, звучниот притисок Q_0 , се одредува при претходно одредени константи. За таа цел, се одредува импедансата на подвижниот калем, во близина на резонантната фреквенција, а се изразува како збир од електрична импеданса и механичката импеданса:

$$Z = Z_e + \frac{A^2}{Z_M} \quad (2.3.1).$$

Кога $R_e \gg \omega L$ следува:

$$Z = Z_e + \frac{A^2}{Z_M} = R_e + A^2 \frac{1}{\frac{1}{r_m} + \frac{1}{i\omega m} + \frac{1}{i\omega C_m}} \quad (2.3.2).$$

каде што r_m е механички отпор на системот што осцилира во единици N/m, C_m е капацитет на системот што осцилира во единици m/N, m е маса на системот што осцилира во единици kg и $M = B \cdot l$ е електромеханичка врска единици T m.

Испитувањата покажале дека дијафрагмата во форма на инка ја губи цврстината, т.е еластичноста со тек на времето на фреквенција од 1000 Hz, што доведува разлика во фреквенцијата на осцилации на дијафрагмата и подвижниот систем. Затоа, се менува формата на дијафрагмата од инка во форма на падобран со одредена брановидност.

Имено, кога фреквенцијата се зголемува, тогаш еластичната деформација е изразена на преминот помеѓу подвижниот систем и дијафрагмата. Тоа придонесува за опаѓање на звучниот притисок, на резонантната фреквенција, а со тоа се намалува силата за придвижување на дијафрагмата.

Друга важна карактеристика е ефикасноста на звучникот, која се изразува како однос на емитираната акустична енергија и потрошената електрична струја. Меѓутоа, поради осцилациите потрошената електрична енергија може да има реален и имагинарен дел. Од интерес е да се определи ефикасноста во однос на реален дел на потрошената енергија, изразена во W (вати):

$$W_e = R_e I^2 \quad (2.3.3),$$

каде што R_e е електричниот отпор на подвижната рамка во Ω (оми) и I е струјата што тече намотката во А (ампери). Додека пак, емитираната акустична енергија W_a е дадена со равенката:

$$W_a = r_R \left| \frac{F}{Z_m} \right| \quad (2.3.4),$$

каде што r_R е акустичен отпор во единици N/m , F е силата потребна за придвижување на дијафрагмата и Z_m е механичкиот импеданс во единици $N \frac{S}{m}$.

Оттука, за ефикасноста на звучникот се добива:

$$\eta = \frac{W_a}{W_e + W_a} = \frac{1}{1 + \frac{W_e}{W_a}} \quad (2.3.5).$$

При претпоставка дека дијафрагмата се смета за тврд диск и непостоење на кутија на звучникот и константна емитирана акустична енергија се добива за ефикасноста:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{2g \cdot m^2 R_e}{\pi \rho \cdot a^4 B^2 l^2}} \cdot 100 \quad (2.3.6).$$

каде што η е ефикасноста на звучникот во проценти, ρ е густина на воздухот во единици kg/m^3 , g е брзината на звукот во m/s , m е масата на подвижниот систем и дијафрагмата во единици kg , a е радиусот на дијафрагмата во единици m , B магнетната индукција во единици Т (тесла), l е должина на намотката во единици m и R_e е електричниот отпор на подвижната рамка во Ω (оми). Со замена на овие вредности, за ефикасноста на звучникот се добиваат неколку проценти, што е доста мала вредност.

2.4.1. Проточен магнетометар

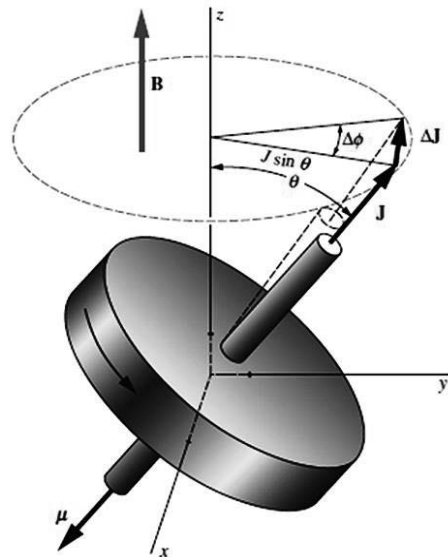
Магнетометар е уред кој ја мери насоката, јачината или релативната промена на магнетно поле на одредено место на земјата. Всушност, тој ја мери магнетизацијата на феромагнетен материјал. Сличен на него е компасот кој ја покажува насоката на хоризонталната компонента на магнетното поле. Основата на мерење на магнетното поле е дека при движење на полнежи се индуцира електромоторна сила во дадена намотка.

Ако земеме дека електронот ротира околу јадрото на атомот, така што неговиот спински аголен момент J , чија големина е секогаш $h/4\pi$ или $5.273 \cdot 10^{-35} \text{ kgm}^2/\text{s}$. Покрај тоа, електронот поседува и магнетски диполен момент μ со големина $0,9285 \cdot 10^{-23} \text{ J/T}$, поради неговата ротација околу оската на вртење (слика 2.11). Електрон во магнетно поле се стреми да го постави неговиот магнетен дипол во правец на полето, слично како секој жироскоп што се врти и ротира околу полето или ова појава е уште позната како спинска прецесија, наместо да се постави во насока на полето. На слика 2.11 магнетниот момент μ е прикажан спротивно на спинскиот аголен момент J , што важи за негативно наелектризирана честица – електрон. Магнетното поле B (од електромагнет или перманентен магнет) предизвикува вртежен момент (момент на сила или спрег на сили) еднаков на $\mu \times B$. Насоката на вртежниот момент е во насока кон негативните вредности на x -оската и е еднаков на $\mu \cdot B \cdot \sin\theta$.

За време Δt аголниот момент се променува за $\Delta J = \mu \cdot B \cdot \sin\theta \cdot \Delta t$, притоа хоризонталната компонента на спинскиот аголен момент J е $J \cdot \sin\theta$. Бидејќи спинскиот аголен момент J процесира при што се менува вредноста на ΔJ , така аголот меѓу прирастот и хоризонталната компонента е даден со равенката:

$$\Delta\phi = \frac{\Delta J}{J \cdot \sin\theta} = \frac{\mu \cdot B \cdot \Delta t}{J} \quad (2.4.1.1).$$

Меѓутоа, аголот $\Delta\phi$ помеѓу векторот ΔJ и векторот J се менува со тек на времето, така што аголата фреквенција ω_p е дадена на равенката:

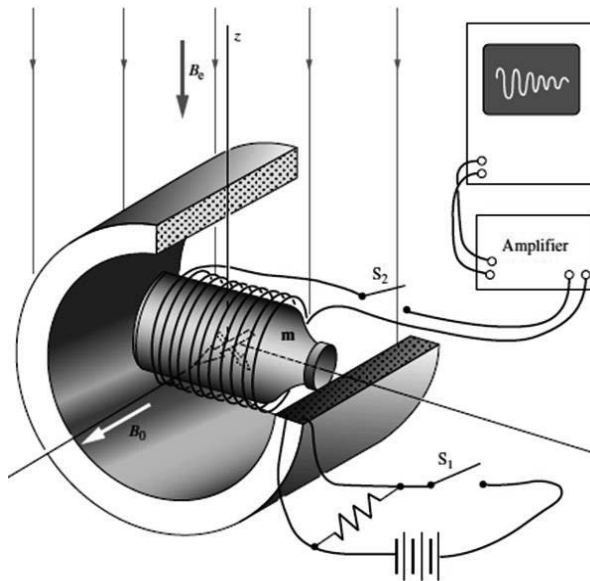


Слика 2.11. Прецесија на магнетниот момент на електрон во надворешно магнетно поле.

$$\omega_p = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{\mu \cdot B}{J} \quad (2.4.1.2).$$

Бидејќи, оската околу која се врти електронот постојано ја менува насоката, тогаш може да се занемари $\sin\theta$. Од равенката се гледа стапката на прецесија на оската на вртење за електронот изнесува $\mu/J = 1,761 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}\text{T}^{-1}$. При јачина на магнетното поле од 1 гаус прецесијата на спинскиот вектор е на $1,761 \times 10^7$ радијани/s, или $2,80 \times 10^6$ вртежи во секунда. Протонот има внатрешен спински аголен момент како електронот $\hbar/4\pi$, но магнетниот момент е помал. Бидејќи масата на протонот е 1836 пати поголема од масата на електронот, магнетниот момент на протонот е обратнопропорционален на нејзината маса, другите работи се еднакви. Магнетниот момент на протонот е $1,411 \times 10^{-26} \text{ J/T}$, или 660 пати помал од електронот. При јачина на магнетното поле од 1 гаус прецесијата на спинскиот вектор на протонот се врти со 4258 вртежи во секунда. Околу 40 % од стабилните атомски јадра имаат сопствен аголен момент и придружни магнетни моменти.

Прецесијата на магнетни диполни моменти зависи од електричната струја, која се должи на движењето на полнежот, притоа магнетната индукција B е нормална на електричното поле (слика 2.11). Всушност, прецесијата на протонот предизвикува наизменичен флукс низ калем, слично како при ротација на мал постојан магнет. Како резултат на фреквенцијата на прецесијата се индуцира напон во намотка (калем). Бидејќи се користи средина во којашто имаме доста протони, како што е водата, во која имаме околу 7×10^{22} атоми на водород (протони) во 1 cm^3 . Меѓутоа, може да се користи како средина и керозин. Овие водородни атом прецесираат во магнетното поле на земјата, што овозможува појава на напон во намотката која е поставена околу водата. Всушност, оските на ротација и магнетните моменти ќе бидат дистрибуирани толку униформно во преферентна насока. Додека ако немаме надворешно магнетно поле, насоката на ротација ќе биде хаотична и напонот во калемот ќе биде минимален. Во случај на силно магнетно поле B на вода, тогаш ќе имаме моменти на протоните ориентирани во насока на векторот на магнетната индукција B . Големина на магнетниот момент на протонот ќе биде $\mu B/kT$, што ќе доведе до индукција на напон во намотката (калемот) околу дадена средина. Шемата за мерење на магнетното поле на земјата е дадена на слика 2.12. Имено, шише со вода е поставено во два взаемно нормални калемии. Со помош на прекинувачот S_2 е отворен, а прекинувачот S_1 е затворен. Електромагнетот создава силно магнетно поле B_0 , што доведува до ориентација на магнетните диполни моменти. Во овој случај, диполи се протоните (водородни јадра) во молекулите на вода. Во услови на термичка рамнотежа, што во овој случај трае неколку секунди, магнетизацијата ќе направи магнетниот момент на протонот да биде



Слика 2.12. Мерење на спинската прецесија на протон во магнетно поле на земјата.

$\mu B_0/k$. Потоа, со исклучување на магнетното поле B_0 и затворање на прекинувачот S_2 , се поврзува калемот околу шишето со засилувачот. Магнетниот момент m на протонот сега процесира во ху-рамнината со фреквенција дадена со равенката 2.4.2, во услови на магнетното поле на земјата B_e . Наизменичната компонента на векторот на магнетниот диполен момент m во насока y оската, доведува до индукција на наизменичен напон во калемот, којшто се зголемува со засилувач. Од фреквенцијата на наизменичен напон во калемот, може точно да се одреди на магнетното поле на земјата B_e . Магнетниот резонантен магнетометар од овој тип се користи во геофизиката, за проучување на магнетното поле на земјата и во археологијата за лоцирање на артефакти. Резонантниот магнетометар има точност од 0,2 nT, во опсег 20.000 – 120.000 nT.

2.4.2. Индукциски магнетометар

Друг вид магнетометар се индукционите магнетометри кои се едни од најстарите, како магнетни сензори. Овој магнетометар се заснова на Законот за индукција на Фарадеј, калем со магнетно (феритно) јадро и голем број навивки како еден милион или два милиони. Така, на пример, мерења на сигналите во магнетокардиографија (MCG) и магнетоенцефалографија (MEG) се прават со

индукциски магнетометри чијшто принцип на работа е во режим на детекција на напон. Треба да се земе во обзир дека намотките за детекција на магнетното поле се поврзани со засилувач и се испитува засилувањето за различни вредности на фреквенцијата на струјата, со која се напојува намотката.

Во услови на слабо нискофреквентно магнетно поле треба да се намалат паразитските (еколошки) магнетни полиња. Исто така, потребно е дизајнот и конструкцијата на просторијата да биде со магнетна заштита и тоа е важно за точност на првите магнетоенцефалографски мерења. За да се намалат влијанијата на електричните сигнали, треба да се користи заземјување и Фарадеј кафез како едноставна електрична заштита. Во споредба со геомагнетното поле (dc поле), големината на магнетните полиња на 50/60 Hz во нашата животна средина се мали. Магнетниот штит треба да се постави на доволно растојание од електрични уреди или далноводи, големината на магнетното поле на уреди кои работат на 50/60 Hz е помалку од $0,1 \mu\text{T}$.

Индукциониот магнетометар се базира на два модела за детекција, детекција на магнетно поле со регистрација на напонот и регистрација на струја. Имено, врз база на Фарадеевиот закон за индукција, индуктивноста на намотката (калем) може да се објасни со двата модела. Во случај кога хомогено магнетно поле $\mu_0 H$ [T] и фреквенција f [Hz], поминува низ намотка со просечен радиус a [m], тогаш за индуцираниот напон V [V] се добива:

$$V = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = -i\omega nS\mu_0 H = -i2\pi^2 fna^2\mu_0 H \quad (2.4.2.1).$$

каде што i е имагинарен број и n е бројот на намотки на калемот. Знакот минус означува дека магнетното поле и индуцираниот напон имаат фазна разлика од 90° . Меѓутоа, ако користиме интегратор при што за влезен напон ќе биде индуцираниот напон, тогаш излезниот напон од интеграторот ќе одговара на јачината на магнетно поле, кое треба да го измериме. Додека пак, ако го земеме во обзир струјниот модел на индукциониот магнетометар, тогаш врската помеѓу струјата I [A] и магнетниот флуks Φ [Wb] што ја пронижува индукционата намотка се дадени со следните равенки:

$$\Phi = LI \quad (2.4.2.2).$$

$$I = \frac{nS\mu_0 H}{L} = \frac{\pi na^2\mu_0 H}{L} \quad (2.4.2.3).$$

каде што L [H] е индуктивитет на намотката. Главно, треба да се знае отпорот на намотката и влезниот отпор на инструментот R_n .

За ниска фреквенција, во согласност со законот за индукција на Фарадеј, индуктивниот отпорот треба да биде поголем од отпорот на жицата ($R_n > R$), притоа излезниот напон е пропорционален на

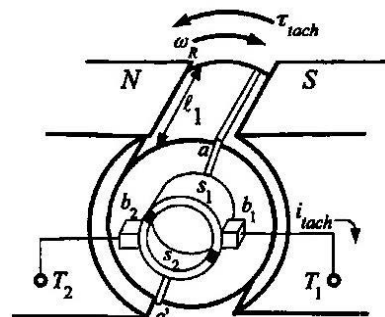
фреквенцијата. Додека за високи фреквенции, тогаш излезниот напон е пропорционален на магнетното поле и не зависи од фреквенцијата.

2.5. Тахометар

Една од примените на електродинамичките уреди е претворац за мерење на брзината на ротација, во системите каде контролата на аголната брзина е од особено значење. Покрај тоа, овие инструменти обезбедуваат мерење на брзината на транслација, ако се знае која е врската помеѓу аголната брзина и линиската брзина на движење на некое тело. Класификацијата на тахометрите врз основа на физиката е:

- електродинамички тахометри, како што се тахогенератори, индукција низ метален прстен според Ленцовото правило и индукција на електричен импулс,
- механички тахометри со подвижни топчиња, кои ја менуваат положбата како резултат на центрифугалната сила,
- магнетни тахометри, каде што како физичка основа е Холовиот ефект и
- оптички тахометри, кои работат на детекција на оптичкиот импулс и стробоскоп.

Од друга страна, ротацијата на некое тело може да биде прикажано аналогно или дигитално, па според тоа тахометрите можат да бидат аналогни или дигитални. Аналогните тахометри се помалку точни од дигиталните, но сè уште се употребуваат. Така на пример, кај тахометрите на прав напон излезниот напон е пропорционален на брзината на ротација на телото. Всушност, тахометарот на прав напон (d.c. тахометар) претставува генератор на прав напон, каде што измерената вредност се отчитува од положбата на стрелката во однос на скалата (слика 2.13). Имено, се применува постојан магнет, ротор кој ротира со иста аглова брзина на некое тело и која треба да се измери. Бидејќи, роторот ротира во постојано магнетно поле, на колекторот којшто е во сегменти, се добива прав напон. Добиениот напон се носи на аналоген инструмент за мерење на напон, каде што скалата е калибрирана во вртења во минута (min^{-1}). Сепак, за оптимизација на мерење на точноста на ротација, којашто треба да се измери со тахометарот



Слика 2.13. Тахометарот на прав напон.

на прав напон е да се намали тежината на роторот, со употреба на шуплив цилиндар за ротор. Напонот што се добива од овој инструмент е доста голем, околу 5 волти на 1000 ротации во минута, со што се добива инструмент со голема осетливост.

Индуцираната електромоторна сила E (напон) во генераторот на тахометар dc е дадена со равенката:

$$E = \frac{\varphi \cdot P \cdot N}{60} \cdot \frac{z}{a} \quad (2.5.1).$$

каде што φ јачина на магнетниот флуks во Wb (вебер), P е број на магнетни полови, N е број на вртежи во минута, z е број на навивки во дадена намотка и a е број на навивки кои се паралелни со четкичките на роторот.

Вообичаено, агловата брзина која се мери е во опсегот од 0 до 6000 обрти во минута. Максималната грешка на мерењето на агловата брзина е 1 %, во целото подрачје на мерливост за кое е предвиден инструментот. Друг проблем е присуство на наизменичен напон на излезот од инструментот, којшто може да биде до 2 % во однос на правиот напон.

Сличен тахометар е вртежниот тахометар со секции, којшто претставува струен тахометар со постојан магнет кој ротира во цилиндрична обвивка од дијамагнетен материјал. Вртежите на тркалото во присуство на постојаниот магнет, доведуваат на индукција на напон што предизвикува вртложни струи во обвивката на тркалото. Овие струи заемнодејствуваат со магнетното поле од постојаниот магнет и доведуваат до појава на момент на сила. Како резултат на тоа, тркалото се врти сè додека индуцираниот вртежен момент не се балансира со моментот на сила на пружини кои се поврзани со тркалото. Во услови на рамнотежа, аголното поместување на тркалото е пропорционално на ротациона брзина на осовината. Овој инструмент има точност на мерењето од 0,5 % и се користи најчесто во мерење на аголната брзина на моторните возила и на авионските мотори. Овој тип тахометар служи за мерење на аголни брзини до 15.000 вртежи во минута.

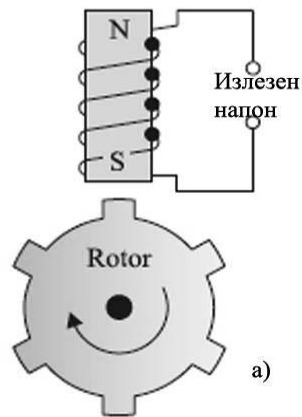
Друг тип тахометар е тахометарот со забест ротор, којшто е феромагнетен материјал, а во негова близина се наоѓа намотка (калем), слика 2.14. Роторот е поврзан со коленистото вратило на моторот, притоа со негово вртење, забите на роторот поминуваат покрај магнетот. Во случај кога забот е во близина на магнетот, тоа доведува до зголемување на јачината на магнетното поле и индуцирање на електричен напон во намотката (слика 2.14 а). Додека пак, во просторот помеѓу два таба се намалува магнетното поле и не се индуцира напон во намотката. Затоа, кога забот е во близина на магнетот, се јавува електричен импулс, така што земаме шест импулси. Бројот на вртежи во минута (RPM) може да се одреди со множење на вртежите во секунда со

60 и потоа делење со 6 (слика 2.14 б). Негативна страна на забестиот тахометар е што тие треба да се спрегнати со систем за процесирање на електричните импулси, за да се претворат во аналогни сигнали. Така, на пример, во случај кога системот за процесирање на импулсите е конвертор од фреквенција во напон, точноста се зголемува, но сепак е помала од точноста на дигиталните тахометри.

Од друга страна, А.С. тахометарот има излезен напон пропорционален на брзината на вртење кој се состои од монофазен индуциски мотор, со две намотки на статорот и ротор на кој има поставено постојан магнет. Една од намотките на статорот се напојуваат со а.с. (наизменичен) напон, а измерениот сигнал се зема од излезен напон индуциран во втора намотка. Излезниот напон е нула кога роторот е неподвижен, а во спротивно е пропорционален на аголната брзина на роторот. Насоката на вртење се одредува според фазата на излезниот напон, во однос на намотката на која се донесува а.с. (наизменичен) напон и се вклучува при фазна разлика од 180° . Тахометарот служи за мерење на ротации, т.е. 0 – 4000 вртежи во минута, со точноста од 0,05 % до 0,25 %.

Друг вид се дигитални тахометри кои обично се неконтактни инструменти, осетливи на ротацијата на диск или некоја оиска. Мерењето на ротацијата зависи од бројот на сензорите кои се поставени на ротирачкото тркало. Сензорите можат да бидат оптички, индуктивни и магнетни, притоа секој сензор дава соодветен електричен импулс, којшто понатаму оди во електронски бројач на сигнали. Брзината на ротација се одредува од бројот на сигналите во единица време, но дава и информации за средната брзина на ротација. Од друга страна, аголната брзина е поврзана со брзината со линеарна функција, така што лесно се одредува и брзината на телото.

Тахометрите најчесто се користат за регулација на брзината за серво системите за да се обезбеди стабилност на брзината. Имено, тахометарот обезбедува повратен сигнал за даден уред. Разликата помеѓу напонскиот сигнал и сигналот од повратна врска обезбедува податоци за фазна или напонска грешка на сигналот за грешка којшто се засилува пред да се приклучи на мотор со еднонасочна струја. Ако се



Слика 2.14. Тахометарот со забест ротор.

јави зголемено оптоварување поради различни причини, моторот ја намалува агловата брзина, а со тоа се намалува излезниот напон од тахометарот. Тоа доведува до создавање поголема разлика помеѓу главниот сигнал и сигналот од повратната врска, а со тоа и поголем сигнал на грешка. Тоа предизвикува зголемување на струјата што тече во моторот, така што се враќа во првобитната брзина на моторот пред да се случи промена на оптоварувањето, во смисла на отпор или друга физичка смисла.

2.6. Кондензаторски микрофон

Електростатските претвораи се засновани на примена на промената на капацитетот на некој уред. Исто така, според нивната примена можат да бидат основа за конструкција на микрофони и емитери на звук или звучници.

Микрофоните се уреди кои го менуваат капацитетот врз основа на променлив звук и обично се нарекуваат кондензаторски микрофони. Всушност, промената на капацитетот се должи на промената на растојанието помеѓу две наелектризирани подвижни електроди. Кондензаторските микрофони се речиси идеални уреди, поради големата осетливост на механички вибрации, голема акустична осетливост, линеарност на капацитетот со интензитетот и фреквенцијата на звукот, како и релативно малиот шум.

Од друга страна, електростатските звучници работат врз основа на промена на капацитетот. Имено, промената на полнежот на една од електродите придонесува за промена на привлечната сила помеѓу две наелектризирани подвижни електроди, при промена на напонот помеѓу електродите.

Додека пак, кондензаторскиот микрофон користи подвижна електрода во форма на мембрана, во близина на статичка електрода.

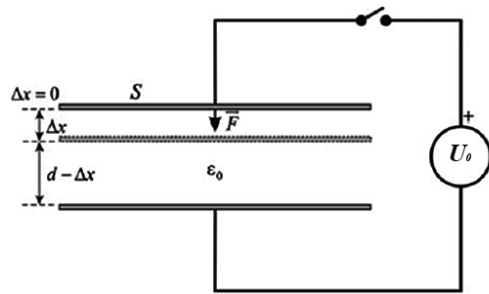
Бидејќи електродите се наелектризирани (слика 2.15) со извор на постојан напон U_0 , статичкиот полнеж Q_0 на електродите на кондензаторот од микрофонот, помеѓу двете електроди е даден со равенката:

$$Q_0 = C_0 \cdot U_0 \quad (2.6.1).$$

каде што C_0 е капацитет на кондензаторот при постојан напон U_0

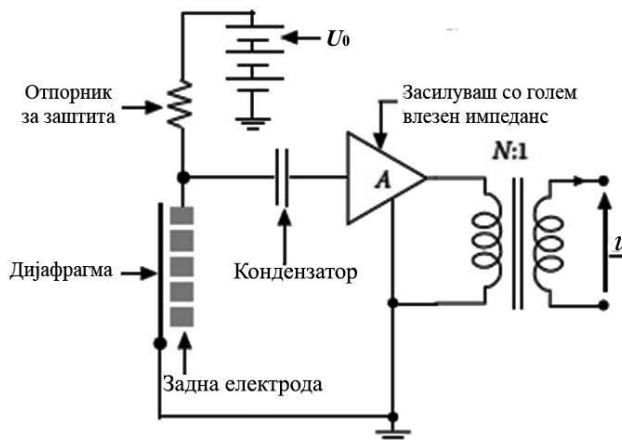
Статичкиот полнеж на електродите на кондензаторот на микрофонот дејствува со привлечна сила на самите електроди. Затоа, потребно е оваа привлечна сила да биде во рамнотежа со постојана механичка сила на дадена пружина (мембрана). При дејствување на звук

со променлив интензитет, пружината дејствува во спротивна насока и се урамнотежува со надворешната сила. Всушност, друг вид на взаемнодејство помеѓу механичка и електростатска сила кај кондензаторски микрофон е режим во динамички услови. За таа цел ќе земеме дека постои линеарност на поместувањето на дијафрагмата на микрофонот за вредност за Δx при дејство на надворешна сила, при што се намалува растојанието помеѓу електродите за вредност Δx , при што $\Delta x \ll d$. Растојанието на кое двете сили се урамнотежуваат се вика критично растојание Δx .



Слика 2.15. Кондензатор со подвижна горна плоча.

Електростатската сила кај микрофонот е занемарливо мала во споредба со механичката сила на дијафрагмата, бидејќи таа треба да биде силно затегната, за да биде нејзината резонантна фреквенција над фреквенцијата на аудиолошкиот звук, која зависи и од дијаметарот на дијафрагмата (слика 2.16). На тој начин, кондензаторскиот микрофон ќе има осетливост во широк опсег на фреквенции и линеарност на излезниот напон со интензитетот на звукот. Статичкиот полнеж Q_0 помеѓу дијафрагмата и задната електрода на кондензаторскиот микрофон треба да биде константен при променлив звук, во опсег на временската константа. За таа цел, во серија со изворот на напон се поврзува отпорник, за заштита од течење на голема струја (слика 2.16). На тој начин, електричниот полнеж на задната електрода на микрофонот



Слика 2.16. Основни елементи на кондензаторски микрофон при напојување со висок напон.

се јавува поради напојување со напон, преку отпорник за заштита од течење на голема струја. Од друга страна, вредноста на отпорникот треба да биде голема, за да биде временска константа на микрофонот голема, бидејќи таа е определена од производ на отпорот и капацитетот на микрофонот. За кондензаторските микрофони со опсег на аудиофреквенции, временската константа обично се избира да биде поголема од 1 секунда.

Во статичен режим на работа на кондензаторот, електродите на микрофонот се поларизирани, при што привлечната сила со којашто тие си взаемнодејствуваат, е дадена со равенката:

$$F_u = \frac{Q_0^2}{2C_0 \cdot d} \quad (2.6.2),$$

т.е. силата е дадена со равенката:

$$F_u = \frac{C_0 \cdot U_0^2}{2d} \quad (2.6.3),$$

Додека пак, енергијата на кондензаторот е дадена со равенката:

$$W_0 = \frac{Q_0^2}{2C_0} \quad (2.6.4),$$

а врската помеѓу енергијата на кондензаторот и силата со која се привлекуваат електродите е дадена со равенката:

$$W_0 = F_u \cdot d \quad (2.6.5).$$

Ако се земе дека мембраната се поместува на растојание Δx кон задната (неподвижна) електрода, тогаш одбивната сила која дејствува на мембраната е дадена со равенката:

$$F_c = -\frac{\Delta x}{C_{MD}} \quad (2.6.6).$$

каде што C_{MD} е константа која е реципрочна вредност од константата на еластичност.

Поради нелинеарна сила на привлекување и присуството на линеарната механичка сила на одбивање, максималното растојание помеѓу електродите не треба да ја надмине вредноста за Δx . Затоа, треба еластичната сила на пружината да биде поголема од привлечната сила на електродите или $F_c > F_u$.

Во услови на рамнотежа, одбивната сила на мембраната и задната електрода е еднаква со силата на привлекување $F_c = F_u$, дадено со равенката:

$$-\frac{\Delta x}{C_{MD}} = \frac{U_0^2}{2d} \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{(d - \Delta x)} = U_0^2 \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{2d^2 \left(1 - \frac{\Delta x}{d}\right)} =$$

$$= U_0^2 \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{2d^2} \left(1 + \frac{\Delta x}{d}\right)^{-2} \quad (2.6.7).$$

Од равенка 2.6.7. се гледа дека за вредност на $-\frac{\Delta x}{d} = 1$ силата $F_c = \infty$.

За стабилност на системот мембрана – задна електрода, кои се под дејство на одбивната сила и силата на привлекување на мембраната и задната електрода треба $F_c > F_u$, бидејќи мембраната не треба да ја допира задната електрода за да не се јави изобличување на регистрираниот звук и е дадено со равенката:

$$-\frac{\Delta x}{d} \leq \frac{1}{3} \quad (2.6.8).$$

кое што е нумеричко решение на равенката 2.6.7. Покрај тоа, од последната равенка се добива дека силата на растојанието до кое максимално ќе се помести мембраната треба да биде $\frac{d}{3}$.

2.7. Механички и електрични својства на кондензаторски микрофон

Микрофоните се уреди каде што механичката енергија на звучните бранови се претвора во електрични импулси. Кондензаторскиот микрофон се користи за конструкција на детектор на интензитет на звукот, таканаречен сонометар. Всушност, механичките и електростатските сили се меѓусебно поврзани, каде што промената на капацитетот помеѓу мембраната и задната електрода на микрофонот се должи на звучните бранови и приклучениот постојан напон. Ако земеме дека поместувањето на мембраната е Δx , при растојание помеѓу мембраната и задната електрода d (слика 2.15 и слика 216).

Кондензаторскиот микрофон се карактеризира со промена на напонот помеѓу мембраната и задната електрода (електродите), кој се должи на изворот на постојан напон и променлив напон поради геометријата, т.е. движење на мембраната на микрофонот. Друга карактеристика на кондензаторскиот микрофон е движењето на мембраната кое се должи на механичка сила (звучен притисок) и промените на електричниот полнеж, а со тоа и појава на електрична струја. Брзината на мембраната е дадена со равенката:

$$i = i\omega \cdot \Delta x \quad (2.7.1),$$

каде што ω агловата фреквенција со која осцилира мембраната, односно фреквенцијата на мембраната $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$.

Електростатската сила се јавува помеѓу мембраната (дијафрагмата) и задната електрода при полеж Q_0 , а капацитетот кој се должи на статичкиот полнеж е C_0 и останува константен. Меѓутоа, под дејство на звук мембраната осцилира со брзина g , а на електродите ќе се јави променлив капацитет и променлив напон u_1 . Промената на капацитетот ќе се должи на промената на растојанието (геометријата) помеѓу мембраната и задната електрода, дадено со равенките:

$$\begin{aligned} C_1 &= C_0 - \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d - \Delta x} = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d} \left(1 - \frac{1}{1 - \frac{\Delta x}{d}} \right) = \\ &= -C_0 \cdot \frac{\Delta x}{d - \Delta x} = -C_0 \cdot \frac{\Delta x}{d} \end{aligned} \quad (2.7.2),$$

каде што знакот минус означува намалување на растојанието (во насока на негативните вредности на оската) помеѓу електродите, C_0 капацитет на кондензаторот при $\Delta x = 0$, C_1 е променлив капацитет, S е површина на една од плочите на кондензаторот, d е постојано растојание помеѓу плочите, ε_0 е диелектрична константа на вакуумот и Δx е променливо растојание помеѓу плочите, притоа $\Delta x < d$.

Променливиот напон u_1 ќе се должи на промената на растојанието (геометријата) помеѓу мембраната и задната електрода, а вкупниот напон на електродите на кондензаторскиот микрофон е даден со равенката:

$$U_0 + u_1 = \frac{Q_0}{C_t} = \frac{Q_0}{C_0 + C_1} = \frac{Q_0}{C_0 \left(1 - \frac{\Delta x}{d} \right)} \approx \frac{Q_0}{C_0} \cdot \left(1 + \frac{\Delta x}{d} \right) \quad (2.7.3),$$

каде што знакот C_t вкупниот капацитет на кондензаторот кој се должи на C_0 капацитет на кондензаторот при $\Delta x = 0$ и променливиот капацитет C_1 .

Од равенката 2.7.3. следува дека напонот кој се должи на движењето на мембраната под дејство на звук е даден со равенката:

$$u_1 = \frac{Q_0}{C_0} \cdot \frac{\Delta x}{d} = U_0 \cdot \frac{g}{i \omega d} \quad (2.7.4),$$

Оттука, променливиот напон u_1 ќе предизвика течење на струја I низ кондензаторот на микрофонот којшто е сервиски поврзан со мембраната, даден со равенката:

$$u_2 = I \cdot X_c = \frac{I}{i\omega C_0} \quad (2.7.5),$$

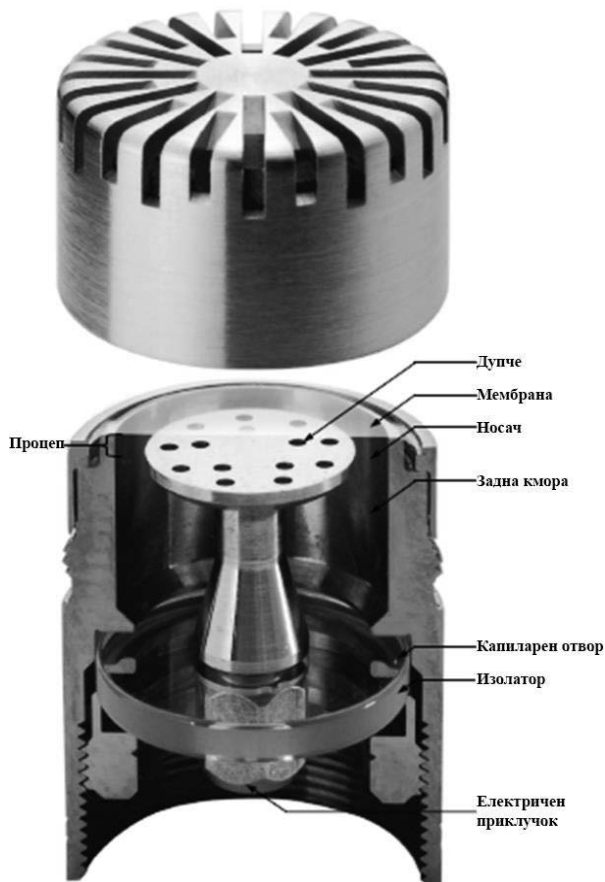
Вкупниот напон на аудиосигналот е збир од двата напона, дадено со равенката:

$$u = u_1 + u_2 = U_0 \cdot \frac{\vartheta}{i\omega d} + \frac{I}{i\omega C_0} \quad (2.7.6),$$

Брзината на мембраната се должи на дејството на механичката сила, поради разликата на притисокот на звукот што дејствува на мембраната и привлечната сила на електричните полнежи (слика 2.17). Механичката импеданса ја одредува брзината ϑ , како резултат на дејството на двете сили. Механичката сила F со која дејствува звукот на мембраната е дадена со равенката:

$$F = p \cdot S_D \quad (2.7.7),$$

Во динамички услови, вкупната електрична сила што дејствува на мембраната е збир од привлекувањето на електродите при напојување



Слика 2.17. Реален изглед на кондензаторски микрофон.

со постојан напон и силата која се должи на променливиот полнеж q на електродите, поради осцилирање (движење) на мембраната:

$$F_0 + F_1 = \frac{(Q_0 + q)^2}{2C_0 \cdot d} \approx \frac{Q_0^2}{2C_0 \cdot d} + \frac{Q_0 \cdot q}{C_0 \cdot d} \quad (2.7.8),$$

при што може да земеме дека $q^2 = 0$.

Во услови на променлив полнеж, тоа ќе доведе течење на струја, дадено со равенката:

$$I = i\omega q \quad (2.7.9).$$

Променливата сила која се јавува поради привлекување на електродите, кои се наелектризирани со променлив полнеж q :

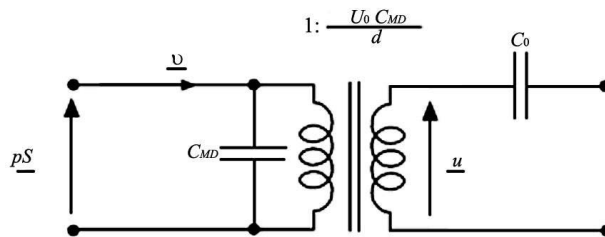
$$F_1 = \frac{Qq}{C_0 \cdot d} = \frac{U_0 q}{d} = \frac{U_0}{i\omega d} \cdot I \quad (2.7.10).$$

Силата со која дејствува звукот на мембраната е еднаква, но спротивна по насока на силата на еластичност на мембраната и силата со која се привлекуваат електродите, дадено е со равенките:

$$p \cdot S_D = -F_1 - F_C \quad (2.7.11),$$

$$p \cdot S_D = -\frac{U_0}{i\omega d} \cdot I + \frac{\Delta X}{C_{MD}} \quad (2.7.12),$$

$$p \cdot S_D = -\frac{U_0}{i\omega d} \cdot I + \frac{g}{i\omega \cdot C_{MD}} \quad (2.7.13).$$



Слика 2.18. Електроакустична аналогија на кондензаторски микрофон.

Последната равенка ги поврзува механичките со електричните својства на кондензаторскиот микрофон (слика 2.18). Покрај тоа, равенката 2.7.13. може да се упрости со користење на изразот на фактор на електростатска трансформација:

$$M = \frac{U_0}{i\omega d} \cdot \quad (2.7.14).$$

Додека пак, коефициентот на електричен реактанс е даден со равенката:

$$Z = \frac{1}{i\omega \cdot C_{MD}} \cdot \quad (2.7.15).$$

каде што C_{MD} е константа која е реципрочна вредност од константата на еластичност на мембраната. Со замена на овие изрази во равенката (2.7.13) се добива:

$$p \cdot S_D = Z \cdot g - M \cdot I \quad (2.7.16).$$

Во случај да немаме звук кој ќе дејствува на мембраната на микрофонот, тогаш напонот на излезот од микрофонот е нула и се добива:

$$0 = Z \cdot g - M \cdot I \quad (2.7.17),$$

$$g = \frac{M}{Z} \cdot I \quad (2.7.18),$$

Излезниот отпор, т.е. вкупниот отпор на микрофонот се добива од равенката:

$$R_{tot} = \frac{U}{I} = \frac{1}{i\omega C_0} + \frac{U_0}{i\omega d} \cdot \frac{g}{I} = \frac{1}{i\omega C_0} + \frac{M^2}{Z} \quad (2.7.19).$$

Електричниот импеданс на кондензаторскиот микрофон е екстремно висок, така што струјата што тече низ микрофонот е сосема мала. Со замена во претходната равенка се добива:

$$p \cdot S_D = Z \cdot g \quad (2.7.20).$$

2.8. Мерење на ниво на звук

Звук е механички логитудинален бран кој се должи на промени во атмосферскиот притисок. Овие промени на притисокот се викаат фреквенција на звукот и треба да бидат минимум 20 во секунда, за да го слушнеме звукот. Човечкото уво ги слуша звуците, во опсег од 20 Hz до 20 kHz, а брзината на звукот на собна температура е 344m / s.

Интензитет (јачина) I на звучните бранови е енергија што ја има бранот на единица површина во единица време, дадено со равенката:

$$I = \frac{E}{St} = \frac{P}{4\pi R^2} \quad (2.8.1), \text{ или}$$

$$I = \frac{P_0^2}{2R_a} = \frac{P_0^2}{2\rho v} = \frac{1}{2} A^2 \omega^2 v \quad (2.8.2),$$

каде што A е амплитуда на акустичниот бран, ρ е густина на воздухот, v е брзина на звукот и R_a е акустичен отпор на средината. Интензитетот на звукот се менува во големи размери. Најмалиот звук што може да се слушне со човечкото уво, се вика праг на чујност и изнесува $I_{min} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Прагот на чујноста се разликува кај луѓето, во зависност од годините и личноста. Максималниот интензитет на звук што човечкото уво може да го регистрира без да се повреди, се вика праг на

болка и изнесува $I_{\max} = 1 \text{ W/m}^2$. Прагот на чујноста и прагот на болка на увото се однесуваат за звук со фреквенција од 1000 Hz. Опсегот помеѓу интензитетите на звук, што одговараат на прагот на болка и прагот на чујноста е ред на големина 10^{12} . Мерењето на интензитетот на звук во вакви размери е непрактично. Затоа, нивото на јачина на звук се изразува во логаритамска скала, како однос на интензитетот на звук што го слушаме и минималниот интензитет на звук. Нивото на јачината на звук L е дадено со равенката:

$$L = \log \frac{I}{I_{\min}} \text{ (B)} \quad (2.8.3),$$

каде што I е интензитет на звукот, I_{\min} е интензитет на минималниот звук, при што нивото на јачина на звукот се изразува во единица бел (B). При јачина на звук $I = I_{\min}$ следува дека нивото на јачината на звук е 0 B, а за јачина на звук е $I = I_{\max}$ следува дека нивото на интензитет (јачина) на звук е 12 B. Меѓутоа, денеска сè повеќе нивото на јачина на звук се изразува во децибели:

$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{\min}} \text{ (dB)} \quad (2.8.4),$$

Нивото на интензитетот на звук е $L = 120 \text{ dB}$, за интензитет на звукот од $I = I_{\max} = 1 \text{ W/m}^2$, а $L = 0 \text{ dB}$ за интензитет на звукот од $I = I_{\min} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Ако интензитетот на звук се зголеми за 20 dB, тоа значи дека интензитетот на звук се зголемува за фактор $10^2 = 100$. Најдоброто уво може да разликува промена на нивото на звук, за околу 1 dB. Интензитет на звук над прагот на болка може да го оштети ушното тапанче. Осетливоста на увото, делумно е резултат на неговата механичка конструкција којашто ги засилува промените на притисокот.

Звук со една фреквенција е чист тон. Обично нема чисти тонови, туку звуците се составени од различни фреквенции. Звуците можат да бидат непријатни и да нервираат, притоа таквите звуци се викаат бучава. Во индустријата се јавуваат звуци се состојат од мешавина на фреквенции и амплитуди, што претставува бучава со широк опсег.

Покрај мерењата на фреквентниот опсег на звукот, треба да се одреди и нивото на звукот што може да предизвика оштетување на увото, посебно ако тоа ниво на звукот се должи на бучавата. Друг вид звук е шумот, каде што звучните бранови ги имаат сите можни фреквенции и се со приближно ист интензитет.

Покрај тоа, звукот може да се карактеризира и преку амплитудата на промените на притисокот. Човечкото уво може да регистрира промена на амплитудата на притисокот, 20 милионити дел од Паскал, и

претставува праг на чујност. Оттука, дефиницијата за нивото на звучен притисок p во децибели е дадена со равенката:

$$SPL = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_{ref}^2} \right) \text{ dB} \quad (2.8.5),$$

Така, според оваа скала, нормалниот разговор има 60 – 70 dB, бучавата предизвикана од сообраќај има 85 – 90 dB, машината за трева 90 – 100 dB итн. Осетливоста на човечки слух варира со фреквенцијата; најчувствителен е на средните фреквенции и помалку чувствителен на пониски и повисоки фреквенции. Бучавата се анализира, според фреквенцијата и амплитудата на звукот.

Мерењата на нивото на звучниот притисок се прават со инструментот сонометар и се изразуваат во единици dB. Блок шема на сонометарот е дадена на слика 2.19. Обично за микрофон во мерачот на нивото на звукот (сонометар) се користи кондензаторски микрофон. Кондензаторскиот микрофон по конструкција е сличен на кондензаторот. Имено, тенка мембрана или тенка метална фолија е цврста мембрана или дијафрагма, која се движи напред и назад во однос на цврстата метална плоча, кога микрофонот е под дејство на звучни бранови. Тоа придонесува за менување на капацитетот на кондензаторот во зависност од фреквенцијата и интензитетот на звукот, кој се претвора во електричен сигнал. Бидејќи микрофонот има мала моќност, сигналот треба да се засили преку засилувач. Овие кондензаторски микрофони се користат за прецизни мерења на интензитетот и фреквенцијата на звукот. Системот за обработка на звучниот сигнал започнува со кругот за определба на степенот на ниво на звук. Всушност, тоа е едноставно електронско коло чија осетливост варира со фреквенцијата. За таа цел, се одредува дистрибуцијата на нивото на звук (бучава) во зависност од фреквенцијата. За фреквенција од 20 Hz до 20 kHz појасот е поделен на



Слика 2.19. Блок шема на сонометар.

појаси, притоа звуците кои се надвор од фреквентниот појас не се пропуштаат со помош на филтер на звуци. Филтерот за одреден звучен појас се едноставни пасивни електронски филтри, со цел анализираниот шум да остане со константна амплитуда и фреквенцијата, за време од 5 до 10 минути. Од друга страна, другите мерачи на нивото на звукот

имаат паралелни филтри и користат Фурие трансформација на сигналите. Резултатите од фреквентната анализа се претставени во вид на спектар на нивото на звукот, за секој појас. Промената на притисокот со времето се претвора во промена на нивото (dB) на звукот од фреквенцијата (Hz). Карактеристики на сонометарот се: одредување на ниво на звук во одредена насока, степен на ниво на звук за одреден појас на фреквенцијата, степен на ниво на звук за одреден појас на времето, карактеристики на детекторот и неговата осетливост во различни средини.

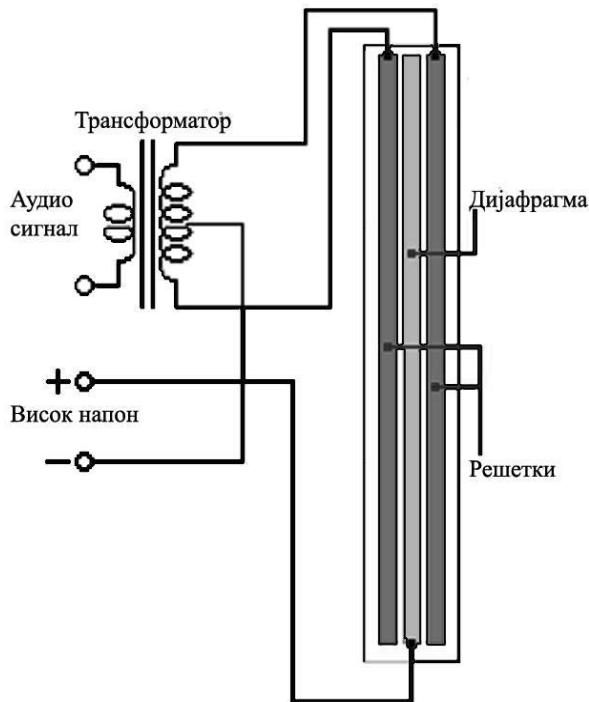
Покрај тоа, мерењата на звукот се прават и со цел да се измери бучавата. За таа цел се користат различни претвораачи на звучни бранови и се собираат податоци за различни видови бучава. Со мерење на бучава од околината, и со соодветна анализа се добиваат информации за бучавата. Така, на пример, при работата на опремата или моторите со внатрешно согорување се добива звук, во форма на вибрации, кои се над прагот на чујност. Со анализа може да се одреди на што се должи бучавата. Од друга страна, звук којшто има тесен појас на фреквенции и има големи амплитуди, се вика тресок. Исто така, за бучава може да се сметат сите звучните бранови опфатени од шумовите и тресоците.

2.9. Електростатски звучник

Друг вид уреди кои се базираат на капацитетот, се електростатските звучници. Всушност, привлечната сила помеѓу две наелектризирани електроди се менува со напонот помеѓу електродите. Електростатските звучници работат во широк опсег на аудиофреквенции, се рамни, тенки, а придвижувањето на дијафрагмата (мембраната) е подеднакво распределено на нејзината површина. Всушност, електростатските звучници се уреди за претворање на наизменичен напон во звучни бранови. Принципот на работа кај електростатските звучници е сличен на обратниот процес на кондензаторскиот микрофон.

Електростатските звучници можат да бидат или „еднострани“ или „двострани“, во зависност од тоа дали електростатските сили дејствуваат само на едната страна од дијафрагма што осцилира, или електростатските сили дејствуваат од двете страни на дијафрагмата. Проблемите на дизајн на уредот се поедноставни за дијафрагма што осцилира под дејство на електростатските сили кои дејствуваат само на едната страна, притоа кондензаторскиот микрофон е сличен на електростатскиот звучник.

Принципот на работа на електростатскиот звучник ќе го опишеме за двострано дејство на електростатските сили на дијафрагмата. Имено, статичен постојан полнеж се донесува на тенка флексибилна мембрана, која електрично е изолирана и се сместува помеѓу две спроводливи плочи, во форма на решетка. Аудиосигналот се засилува и се донесува на краевите на двете спроводни плочи. Спротивниот поларитет на спроводните плочи создава променливо електрично поле во просторот помеѓу двете плочи. При дадена поларизација на електродите, мембраната електростатски се привлекува кон едната плоча, а при друга поларизација на електродите мембраната се привлекува кон другата плоча. Наелектризираната флексибилна мембрана осцилира во присуство на променливото електрично поле, што доведува до создавање на звучни бранови. Дијафрагмата на звучникот е направена од полиестерски тенка фолија со дебелина од ред на големина од микрометри, на која е нанесен електричен спроводен тенок слој, со соодветни механички својства за таа да биде еластична, а во исто време цврста. Напонот помеѓу дијафрагмата и решетките е неколку киловолти во однос на решетките (слика 2.20). Аудиосигналот се донесува на решетката од предната и задната страна, кои се во спротивна фаза. Како резултат, се произведува еднообразно електростатско поле пропорционално на аудиосигналот помеѓу двете решетки (мрежи).



Слика 2.20. Електростатски звучник.

Во случај кога нема сигнал, електростатската сила кои дејствува на мембраната доведува мембраната да е на средината помеѓу двете електроди.

Додека пак, со приклучување на аудиосигнал со променлив напон V_{in} , тогаш електростатската сила која дејствува на дијафрагата, е променлива. Бидејќи плочите се одделени од изворот на аудиосигналот, механичката работа што се извршува $\Delta W_{mech} = F\Delta x$ од страна на дијафрагмата, и е еднаква на потрошената електростатска енергија $\Delta W_{mech} = -\Delta W_e$. Од друга страна, електростатската енергија на наелектризиран кондензатор е $\Delta W_e = \frac{1}{2} C \cdot V^2$. Оттука, се добива:

$$2F = -\frac{dW_e}{dx} = -\frac{V^2}{2} \frac{d}{dx}(C) = -\frac{V^2}{2} \frac{d}{dx} \left(\varepsilon \frac{A}{d} \right) \quad (2.9.1),$$

каде што бројот 2 се става бидејќи се работи за дијафрагма поставена во средината помеѓу двете плочи, т.е двапати поголем капацитет. Со замена се добива:

$$2F \cdot d \cdot dx = -dW_e = -\frac{V^2}{2} d(\varepsilon \cdot A) \Rightarrow \int \quad (2.9.2).$$

$$F = -\frac{V^2}{2d^2} \cdot \varepsilon \cdot A \quad (2.9.3).$$

Меѓутоа, од едната страна дијафрагмата се привлекува од плочата, додека од другата страна се одбива, така што вкупната сила која дејствува на мембраната, е дадена со равенката:

$$F = F_1 - F_2 = \frac{\varepsilon}{2d^2} (V_{DC} + V_{in})^2 - \frac{\varepsilon}{2d^2} (V_{DC} - V_{in})^2 = \frac{2\varepsilon V_{DC}}{d^2} V_{in} \quad (2.9.4).$$

каде што F_1 и F_2 се електростатските сили кои дејствуваат на дијафрагмата, ε е диелектрична константа на воздухот и d е растојанието помеѓу дијафрагмата и електродите. Оттука, следува дека привлечната сила на дијафрагмата и една од електродите е пропорционална со влезниот сигнал, со минимално изобличување на звукот. Придвижувањето на мембраната во случај на кружна форма е дадено со равенката:

$$z(r) = z_0 J_0 \left(\frac{\alpha_0}{r_0} r \right) \quad (2.9.5).$$

каде што z_0 е максималното поместување на дијафрагмата во нејзиниот центар, J_0 е Беселова функција од прв вид, α_0 е првиот позитивен корен на J_0 , r_0 е радиус на мембраната и r е радиус на целиот звучник.

Додека пак, за еднострано привлекување и одбивање на дијафрагмата треба посебен електронски круг, но взаемнодејството ќе биде слично како претходно.

Перформансите на електростатскиот звучник е што нема нагли промени на фреквенцијата на притисокот на мембраната и соодветна промена на фазата, со минимални изобличување на звукот. Втора карактеристика на перформансите на електростатскиот звучник е нивната висока ефикасност на конверзија на електричните сигнали во аудио звук. Покрај тоа, интензитетот на звукот е голем поради тоа што нема загуби на електричната енергија во форма на магнетен хистерезис на материјалот кој се наоѓа во тоа поле, загуби на вртложните струи и загуби со емисија на топлина во спроводникот на звучникот. Загубите на електричната енергија во диелектриците се незначителни.

3. ЕЛЕКТРОСТАТСКО-МЕХАНИЧКИ ПРЕТВОРАЧИ

Овие претворачи се карактеризираат со четири физички величини, две се измерениот напон и струја, а другите две се силата што дејствува на елементот и измерената брзина. Постојат претворачи кај кои излезниот напон зависи линеарно од силата, но кај некои таа зависност е квадратна.

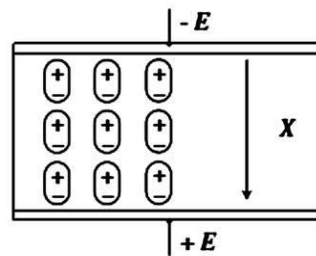
3.1. Пиезоелектричен претворач

Пиезоелектричниот ефект е откриен од страна на браќата Пјер и Жак Кири во 1880 година. Тие откриле дека на материјали како турмалин, кварц, топаз и Рошелова сол ќе се појават електрични полнежи при примена на механички сили, притоа овој ефект се вика директен пиезоелектричен ефект. Од друга страна, постои и обратен пиезоелектричен ефект, каде што електричниот напон ќе придонесе за деформација на материјалот. Во текот на Првата светска војна првата практична примена на пиезоелектричниот ефект бил сонарот, кој се состоел од тенок кварцен кристал кој бил залепен помеѓу две челични плочи. Друга примена била во електричен осцилатор од страна на Кејди, во 1921 година. Главна компонента во овие осцилатори била кварцен кристал, којшто бил користен во сите високофреквентни радио-предаватели. До денешно време се користат кварцните осцилатори, поради прецизна контрола на времето и фреквенцијата на електричните сигнали. Потоа, пиезоелектрицитетот придонесе за развој на пиезоелектрични ултразвучни претворачи, кои овозможиле мерење на вискозноста на течности и дефекти во внатрешноста на цврсти материји. По Втората светска војна, откриени се нови синтетички материјали, кои имаат пиезоелектрични константи многу пати повисоки од кварцот. Така, на пример, бариум титанат и оловен цирконат титанат (PZT) претставуваат два цврсти материјала, добиени по вештачки пат. Најпрво, бариум титанат се употребувал во главите на грамофонот. Подоцна, со примена на допингување на оловен цирконат титанат (PZT) се добиени фероелектрични меки и фероелектрични тврди материјали. Фероелектричните меки материјали се користат за пиезоелектрични и

ултразвучни претворачи, а фeroелектричните тврди материјали се користат во уредите за стабилизација и филтрирање на напони.

Кварцните кристали се многу важни за изработка на пиезоелектрични сензори за сила. Имено, сечењето на кварцните кристали по одредена насока доведува до тоа нивните својства да им се стабилни во широк температурен опсег, без постоење на хистерезис. Исто така, кварцните кристали можат да бидат и синтетички произведени со таканаречен хидротермален метод, којшто се применувал за растење на кристали во 40-тите години на дваесеттиот век. Пиезоелектричниот

ефект е анизотропен и се појавува кај материјали чија кристална структура нема центар на симетрија. Покрај тоа, кај одредени керамички материјали под Кириевата температура електричните диполи се хаотично ориентирани. Ако материјалот се лади во присуство на силно електрично поле, диполите се ориентираат (слика 3. 1). Откако материјалот ќе се олади и ќе се исклучи надворешното електрично поле, материјалот станува пиезоелектричен, при што механичката енергија се претвора во електрична енергија. Оваа карактеристика на пиезоелектрицитетот ќе се изгуби на температура, т.н. Кириевата температура, карактеристично за даден материјал. Исто така, пиезоелектрицитетот ќе се изгуби ако материјалот е под дејство на силно електрично поле, со правец спротивен од правецот кога материјалот станал пиезоелектричен.

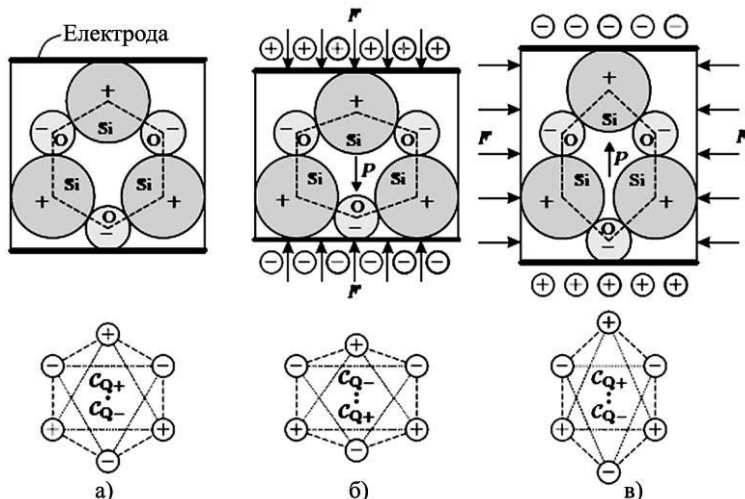


Слика 3.1. Електричните диполи во пиезоелектрични материјали.

Материјали кои се пиезоелектрици, се природните кристали на кварц и турмалин и кристали добиени по вештачки пат, како што се: калиум натриум тартрат (Рошелова сол или Сегнетова сол). Покрај тоа, направени се монокристални пиезоелектрични кристали од литиум ниобат, литиум сулфат хидрат, кадмиум сулфид и литиум танталат, кои се применуваат во современите телекомуникациски системи, како пиезоелектричен материјал во уредите за површински акустичен бран (SAW). Во последно време се направени пиезоелектрични материјали од полимери, како што се поливинилиден флуорид (PVDF) и полипропилен. Тие се во форма на тенки филмови и се користат како механички флексибилни сензори и побудувачи.

Всушност, пиезоелектричниот ефект е взаемнодејство на механичка сила со материјали со кристална структура, при што се јавува електричен напон. Под дејство на механичката сила кристалот се деформира и се јавува електрична поларизација. Со поставување на соодветни електроди на материјалот, може да се измери електричниот

напон, којшто зависи од механичката деформација (слика 3.2). Правецот во однос на кој се јавува најголема поларизација на кристалот се вика електрична оска, а за кварцен кристал и Сегнетова сол таа е x-оската. Додека пак, y-оската се вика механичка оска за кварцен кристал, а за Сегнетова сол механичката оска е 45° во однос на x-оската. За кварцен кристал z-оската е оптичка оска, и ако на кристалот не дејствува сила,

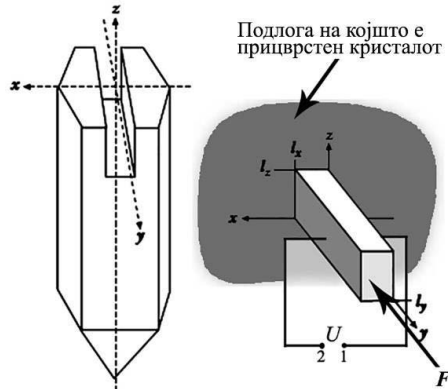


Слика 3.2. Поларизација на пиезоелектричен кварцен кристал SiO_2 : а) кога не дејствува механичка сила, б) при дејство на механичка сила во логитудинална насока и в) при дејство на механичка сила во трансферзална насока.

тогаш центарот C_{Q+} на позитивни полнежи (јоните на силициум) геометриски се совпаѓа со центарот на негативни полнежи C_{Q-} (јоните на кислород), притоа материјалот е електрично неутрален. Бидејќи се работи за јонски кристал, концентрацијата на силициумски јони ја дава концентрацијата на C_{Q+} на позитивни полнежи. Во случај на дејство на механичка сила во насока на оската на која се поставени електродите, се јавува електрично поле во истиот правец. Во овој случај на логитудинална деформација, центрите на полнеж се разделуваат, така што векторот на поларизација е насочен од негативниот полнеж C_{Q-} кон центарот на позитивниот полнеж C_{Q+} . Деформацијата на кристалната решетка доведува до зголемување на позитивниот полнеж на силициумот на долната електрода, којшто ќе биде компензиран со натрупување на негативен полнеж, од самиот кристал. Слично се случува и на другата страна на кристалот, каде се зголемува негативниот полнеж на јоните на кислород, којшто ќе биде компензиран со недостаток на негативен полнеж и тоа доведува до поместување на центрите на позитивниот и негативниот полнеж. Додека, при дејство на силата во правец нормален на оската каде се поставени електродите, тогаш се јавува електричен напон со спротивна поларизација (слика

3.3). Векторот на поларизација има спротивна поларизација при механичка деформација во нормална насока (слика 3.2 и слика 3.3).

Поради деформација навнатре (компресија) на кристалот се јавува напон, притоа електричниот вод 1 треба да биде позитивната електрода. Како резултат на поларизација на кристалот се јавува електростатска индукција на краевите на електродите, при што индуцираниот напон е пропорционален на мали поместувања. Обратен ефект е кога спојките (клемите) 1 и 2 се поврзани со извор на прав напон (слика 3.3). Ако електричниот вод 1 е поврзан на позитивниот пол на изворот, се јавува внатрешна сила што предизвикува ширење на кристалот. За мали поместувања, силата со која кристалот дејствува на околината е пропорционална на електричниот полнеж, т.е. напонот на електродите (слика 3.3).



Слика 3.3. Сечење на пиезоелектричен кристал, којшто служи како електро-механички претворач.

3.2. Механички и електрични својства на пиезоелектричен претворач

Дејството на механичка сила F придонесува за деформација на пиезоелектричниот кристал и појава на напон на краевите на електродите кај правиот пиезоелектричен ефект (слика 3.4). Во случај кога не постои дејство на електрично поле кое е резултат на механичка сила, електростатската индукција D е еднаква на поларизацијата P на кристалот:

$$D = P \quad (3.2.1).$$

Ако се јави електрично поле, тогаш електростатската индукција која претставува површинска густина на полнеж е дадена со равенката:

$$D = \varepsilon E + P \quad (3.2.2),$$

каде што ε е диелектрична константа на кристалот и E е јачина на електричното поле на краевите на кристалот. Покрај тоа, поларизацијата P на кристалот се јавува поради дејство на механичко напрегање σ , кое претставува дејство на механичка сила на единица површина. Во голем опсег на механичко напрегање зависноста на електричната поларизација е линеарна функција од механичкото напрегање и е дадена со равенката:

$$P = -d_{31} \cdot \sigma \quad (3.2.3),$$

каде што $\sigma = \frac{F}{S_{xz}}$ е механичкото

напрегање и d_{31} е пиезоелектрична константа со димензии на C/N или m/V, при насоката на силата и електричното поле кога тие се нормални помеѓу себе, а знакот минус е поради дејство на силата во насоката на негативните вредности на y -оската. Во случај тие да се во иста насока тогаш диелектричната константа ќе се означи со d_{11} , d_{22} и d_{33} , притоа 1, 2 и 3 може да се сметаат како означување на насоките x , y или z . Електростатската индукција може да се одреди од полнежот на електродите, дадено со равенката:

$$D = \frac{q}{S_{yz}} = \frac{q}{l_y l_z} \quad (3.2.4).$$

Јачината на електричното поле кое зависи од приложената механичка сила, дадена е со равенката:

$$E = \frac{U}{l_x} \quad (3.2.5).$$

Со замена во равенката 3.2.2 се добива:

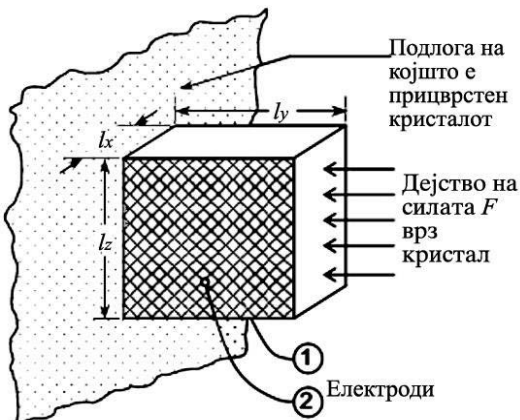
$$\frac{q}{l_y l_z} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{U}{l_x} - d_{31} \cdot \sigma \quad (3.2.6),$$

каде што ε_0 е диелектрична константа на вакуумот, ε_r е диелектрична константа на кристалот во x -оската. Со средување на последната равенка се добива:

$$q = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{l_y l_z}{l_x} U - d_{31} \cdot l_y l_z \cdot \frac{F}{l_x l_z} = C_E U - d_{31} F \quad (3.2.7),$$

каде што C_E е капацитетот на кристалот, т.е. на плочест рамен кондензатор со електроди со површина $l_y l_z$, на растојанија $x = 0$ и $x = l_x$.

Од друга страна, при обратниот пиезоелектричен ефект кристалот се приклучува на извор на прав напон, притоа кристалот се деформира, при една насока на поларизација на електродите се зголемува, а во друга насока на поларизација на електродите се



Слика 3.4. Прав пиезоелектричен ефект на кварцен кристал.

намалува. Деформацијата што се должи на Хуковиот закон на еластичност на тврдо тело е дадена со равенката:

$$\eta = \frac{\Delta l_y}{l_y} = \frac{F}{S_{xz}} \frac{1}{Y} \quad (3.2.8),$$

каде што Y е Јунгов модул на еластичност (во единици N/m^2), при електричен краток спој на клемите 1 и 2 (слика 3.4). Вкупната деформација на кристалот се должи на поларизација на електродите на кристалот и механичко напрегањето по y -оската, дадено со равенката:

$$\xi = d_{31} \cdot U - \frac{F}{l_x l_z} \frac{1}{Y} = d_{31} \cdot U - C_M \cdot F \quad (3.2.9),$$

каде што C_M е константа на еластичност на кристалот, кога насоката на силата и електричното поле кога тие се нормални помеѓу себе, а знакот минус е поради дејство на внатрешните сили кои се во насоката спротивна на силата којашто ја предизвикува деформацијата.

Во пракса C_E и C_M се менуваат со деформацијата, при што при многу мали поместувањата тогаш ќе важат горните линеаризирани равенки. Ако материјалот не покажува пиезоелектричен ефект, примена на надворешната сила ќе доведе до деформација на кристалот, во согласност со Хуковиот закон. Всушност пиезоелектричниот ефект придонесува за појава на индуциран полнеж и електричен напон на електродите, при деформација на кристалот, и обратно при вклучување на електричен напон се јавува механичка деформација на кристалот.

3.3. Еквивалентен круг на пиезоелектричен претворач

Со цел работата на пиезоелектричниот претворач да се изрази поверно на реалноста, се прават еквивалентни кругови. Затоа, равенките (3.2.7) и (3.2.9) се преуредуваат, за да може да се одреди напонот на електродите и силата која е потребна за појава на индуциран полнеж, дадени со равенките:

$$U = \frac{d_{31}}{C_E} F + \frac{1}{C_E} q \quad (3.3.1).$$

$$F = \frac{d_{31}}{C_M} U - \frac{1}{C_M} \xi \quad (3.3.2), \text{ и}$$

Со цел напонот и силата на пиезоелектричниот претворач да се изрази преку полнежот и поместувањето (деформацијата) се врши преуредување на горните равенки, притоа се добива:

$$U = \frac{d_{31}^2}{C_E C_M} U - \frac{d_{31}}{C_E C_M} \xi + \frac{1}{C_E} q \quad (3.3.3).$$

$$U \left(1 - \frac{d_{31}^2}{C_E C_M} \right) = \frac{1}{C_E} q - \frac{d_{31}}{C_E C_M} \xi \quad (3.3.4).$$

$$U(1 - k_{31}^2) = \frac{1}{C_E} q - \frac{d_{31}}{C_E C_M} \xi \quad (3.3.5),$$

$$U = \frac{1}{(1 - k_{31}^2)} \left(\frac{1}{C_E} q - \frac{d_{31}}{C_E C_M} \xi \right) \quad (3.3.6),$$

$$F = \frac{d_{31}}{C_M} \left(\frac{d_{31}}{C_E} F + \frac{1}{C_E} q \right) - \frac{1}{C_M} \xi \quad (3.3.7), \text{ и}$$

$$F = \frac{1}{(1 - k_{31}^2)} \left(\frac{d_{31}}{C_E C_M} q - \frac{1}{C_M} \xi \right) \quad (3.3.8),$$

каде што k_{31} е бездимензионален коефициент на електромеханичка врска на пиезоелектричниот кристал. Врската помеѓу коефициент на електромеханичка врска на пиезоелектричниот кристал и пиезоелектричната константа е дадена со равенката:

$$k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{C_E C_M}} = d_{31} \sqrt{\frac{\gamma}{\epsilon_0 \epsilon_r}}, \quad 0 < k_{31} < 1 \quad (3.3.9).$$

Друг важен параметар е коефициентот на пиезоелектричен стрес g_{31} , во единици Vm/N или m²/C, даден со равенката:

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{k_{31}}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \gamma}} \quad (3.3.10).$$

Равенките 3.3.6 и 3.3.8 можат да се поедностават:

$$U = \frac{1}{C'_E} q - \frac{d_{31}}{C'_E C'_M} \xi = \frac{1}{C'_E} \left(q - \frac{d_{31}}{C'_M} \xi \right) \quad (3.3.11) \text{ и}$$

$$F = \frac{d_{31}}{C'_M C'_E} q - \frac{1}{C'_M} \xi = \frac{1}{C'_M} \left(\frac{d_{31}}{C'_E} q - \xi \right) \quad (3.3.12),$$

каде што $C'_E = (1 - k_{31}^2) \cdot C_E$, $C'_M = (1 - k_{31}^2) \cdot C_M$ и $C'_E C'_M = C_M C'_E$.

При дејство на хармониска сила F_a и хармониски напон U_a на пиезоелектричен претвораќ, тогаш поместувањето и полнежот можат да се изразат со користење на физичките величини струја и брзина, дадени со равенките:

$$g = \frac{d\xi}{dt} = i\omega\xi \quad (3.3.13) \text{ и}$$

$$I = \frac{dq}{dt} = i\omega q \quad (3.3.14).$$

каде што промените на деформацијата и полнежот на кристалот се хармониски со текот на времето. Оттука, равенките 3.3.11 и 3.3.12 можат да се преуредат, така што се добива:

$$U_a = \frac{1}{i\omega C'_E} \left(I - \frac{d_{31}}{C_M} g \right) \quad (3.3.15), \text{ и}$$

$$F_a = \frac{1}{i\omega C'_M} \left(\frac{d_{31}}{C_E} I - g \right) \quad (3.3.16).$$

C'_E е електричен капацитет на претвораот, измерен на водовите при синусен влезен напон и струја, а механичките водови се блокирани (отворен круг), односно не постои движење ($g = 0$). Исто така, при многу ниска фреквенција, инертната маса и механичкиот отпор (отпор на воздухот и друго) можат да се занемарат. Негативните вредности на елементот $-C'_E$ се должат на привлечната сила помеѓу електродите, која се менува со поместувањето. Додека пак, C'_M е константа на еластичност на претвораот, при ниска фреквенција на напонот и струјата, при отворен круг $I = 0$. Силата се менува по законот на синусна функција што предизвикува поместувањето да биде по законот на синусната функција и може да биде измерено. Негативната вредност на капацитетот $-C'_M$ се должи на привлечната сила помеѓу електродите.

При дејство на хармониска сила F_a и хармониски напон U_a на пиезоелектричен претвораот, тогаш со замена на равенките 3.3.13 и 3.3.14 во равенките 3.3.1 и 3.3.2 се добива:

$$U_a = \frac{d_{31}}{C_E} F_a + \frac{1}{i\omega C'_E} I \quad (3.3.17), \text{ и}$$

$$F_a = \frac{d_{31}}{C_M} U_a - \frac{1}{i\omega C'_M} g \quad (3.3.18).$$

Равенките напишани погоре се опишуваат со еквивалентни кругови дадени на слика 3.5. C_M е константа на еластичност на претвораот, при ниска фреквенција на приложената сила на спојките 3 и 4, и мерење на поместувањето на кристалот кое се менува по законот на синусна функција, а инертноста на масата и механичкиот отпор (кристалот е цврст) можат да се занемарат. Во текот на мерењето спојките 1 и 2 се кратко споени, така што $U = 0$ (слика 3.5а). Од друга страна, C_E е електричен капацитет на претвораот измерен при ниски фреквенции, притоа спојките 3 и 4 се на кратко споени $F_a = 0$ (слика 3.5б).

При синусен напон на приложената сила, на спојките 3 и 4 се добива напон на отворен круг (не тече струја – слика 3.5б), даден со равенката:

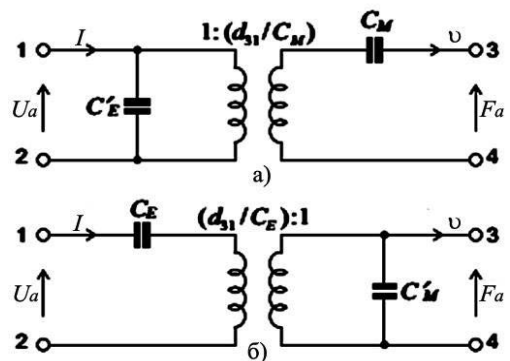
$$U_a = \frac{d_{31}}{C_E} F_a \quad (3.3.19).$$

При синусоиден напон на спојките 1 и 2 се добива сила на отворен круг (нема оптоварување – слика 3.5а), дадено со равенката:

$$F_a = \frac{d_{31}}{C_M} U_a \quad (3.3.20).$$

Во зависност од употребата на претвораот ќе се земе соодветниот еквивалентен круг. Ако пиезоелектричниот претворач е микрофон, којшто е спрегнат со портата на транзистор со ефект на поле, така што се работи за отворен круг. Физичките параметри на претвораот се опишуваат со слика 3.5б, бидејќи капацитетот C_E може да се занемари во анализата за $I = 0$.

Додека пак, ако претвораот е звучник којшто е спрегнат со засилувач со мала вредност на импедансот, така што електричните спојки се во краток спој (слика 3.5а). Во тој случај, капацитетот



Слика 3.5. Еквивалентни кругови на пиезоелектричен кристал.

C_E може да се занемари во однос на излезниот отпор на засилувачот, бидејќи звучникот секогаш се сврзува после засилувачот. Ако уредот не може да се поместува ($\vartheta = 0$), напонот се приклучува низ клемите 1 и 2, нема да може да се складира механичката енергија (слика 3.5а), туку ќе се складира електрична енергија. При високи фреквенции, масата на претвораот и неговиот отпор треба да се земе во обзир во електричниот круг (слика 3.5а), притоа се треба да се додаде сериски со терминал 3 (слика 3.5а и слика 3.5б).

3.4. Примена на пиезоелектричен претворац и мерење на дебелината на тенки филмови со кварцен кристал

Примената на пиезоелектричен претворац е во мерната технологија, бесконтактно тестирање на материјали, медицината и електрониката. Во зависност од примената, се користи директниот пиезоелектричен ефект, инверзен пиезоелектричен ефект или комбинација од двете. Најчесто пиезоелектричниот претворац се користи како сензор во даден уред:

- технологија за мерење на процеси и следење на состојбата:
 - сензори за сила, вртежен момент, забрзување, вискозитет,
 - мерење на температурата и геометриското растојание,
- автомобилска индустрија:
 - сензори за паркирање,
 - системи за вбригување во дизел-мотори,
- технологија на производство:
 - ултразвучно заварување,
 - ултразвучно чистење,
- стручно тестирање:
 - откривање на недостатоци,
 - карактеризација на материјал и уред,
- медицина:
 - дијагностика, на пример, прегледи за бременост,
 - терапија, на пример, фрагментација на камен во бубрег (литотрипсија),
- електроника за широка потрошувачка:
 - звучници,
 - печатачи со мастило,
 - поставки за леќи во камери,
- паметни материјали и структури:
 - активна контрола на бучавата,
 - музика, така, на пример, за пикап за гитари,
 - зафаќање на енергијата за извори со мала потрошувачка,
 - трансформација на електричната во механичката енергија.

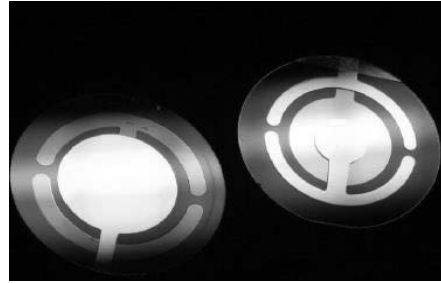
Пиезоелектричен ефект е феномен што се јавува во некои кристални материјали, притоа се генерира електричен напон при надворешно механичко напрегање – стрес и се применува на некои кристални материјали. За таа цел, начесто се користи силициум диоксид (SiO_2) за пиезоелектрични резонатори, α -кварц и специфична кристална форма на SiO_2 се користи за уредот т.н. кварцно кристална микровага (QCM). Уредите базирани на SiO_2 служат како стабилни генератори на напон со стабилна фреквенција, со прав пиезоелектричен ефект и обратен (инверзен) пиезоелектричен ефект.

Во фармацевтската индустрија, обложувањето на апчињата се прави со спреирање на полимерен раствор со суспендираните честички, притоа дебелината на филмот е околу $(5 \div 50) \mu\text{m}$. Дебелината и униформноста на филмот се важни својства за квалитетот и цената на лекот. Обично како метод за мерење на дебелината на филмот е гравиметрискиот метод на мерење. Имено, прво ќе се измери тежината на апчињата без тенкиот филм, разликата во масата на апчињата со филм и без филм, како и знаејќи ја на нивната густина и површина на апчето може да се пресмета дебелината на филмот. Методот е едноставен, но грешката е голема, поради големите грешки во мерењето на масата. Меѓутоа, методот не може да се користи за контрола на дебелината на филмот во самиот процес на покривање со тенок филм. Точното мерење на дебелината на филмот во реално време може да се користи за подобрување на квалитетот на апчињата. Тоа е особено важно во технологијата на тенки филмови на полупроводници кои се користат за производство на уреди со мали димензии, како што се мобилни телефони, компјутери и уреди за електронска меморија на податоци.

Режимите на осцилирање и својствата на кристалот поврзани со температурата зависат од тоа како ќе биде отсечен кристалот. Всушност, насоката и големината на механичкото напрегање на пиезоелектрикот зависат од аголот на сечење на кристалот. Кварцните кристали со сечење АТ се користат за кварцно кристална микровага (QCM). АТ-сечењето на кварцниот кристал се добива при сечење на кристалот под агол од $35,25^\circ$ во однос на z-оската на вештачки кристал, и може да генерира фреквенција од 1 MHz до неколку стотици MHz. За АТ-сечени кристали за осцилатори, дебелината на кварцната плоча е важен параметар за да се одреди неговата фреквенција на осцилирање.

Со помош на кварцен кристал е можно мерење во реално време на дебелината на филмот, врз база на промена на фреквенцијата на осцилации на кварцниот кристал. Пиезоелектричниот ефект на кварцните кристали се користи за мерење на дебелината на филмот. Кај правиот пиезоелектричен ефект дејството на механичко напрегање на кварцниот кристал предизвикува појава на електричен потенцијал на неговите краеве. При механичко напрегање од $9,8 \times 10^4 \text{ Pa}$, електричниот напон на електродите достигнува вредност од 0,5 V. Оттука, резонантната фреквенција на кварцен кристален осцилатор се менува со промена на неговата дебелина. Покрај тоа, резонантната фреквенција на кварцните кристали се менува со геометријата, насоката на механичката оска и дебелината на кристалот (слика 3.6). Со зголемување на дебелината на кварцниот кристал, резонантната фреквенција ќе се намали. Во случај кога кристалот е обложен со тенок филм, т.е. материјал како што е на обложена таблета (подлогата), тогаш

резонантната фреквенција ќе се намали. Промената на фреквенцијата предизвикана од таложењето на филмот овозможува пресметување на моменталната дебелина на филмот.



Кај осцилаторот од кварцен кристал за мерење на дебелината на филмот треба кварцната плоча да биде исечена АТ форма, чија фрек-

Слика 3.6. Плочки од кварцен кристал со електроди.

венција е осетлива на промената на масата. Резонантна фреквенција се јавува кога дебелината на кварцната плочка е непарен цел број на половина бранови должини, на индуцираниот електричен бран. Резонантната фреквенција на АТ исечен кварцен кристал е дадена со равенката:

$$f = \frac{n}{2d_Q} \left(\frac{c}{\rho} \right)^{1/2} \quad (3.4.1).$$

каде што n е непарен број, $n = 1, 3, 5$, d_Q е дебелината на кварцната кристална плочка, c е коефициент на еластичност, ρ е густината на кварцниот кристал (околу $2,65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$). Од последната равенка следува дека фреквенцијата зависи од d_Q , c и ρ . Основната фреквенција за $n = 1$ ќе биде:

$$f = \frac{N}{d_Q} \quad (3.4.2).$$

каде што, $N = 0,5 (c/\rho)^{1/2} = 1670 \text{ Hz} \cdot \text{mm}$ (АТ – сечење на кристалот) се вика фреквентна константа за кварцен кристал, d_Q е дебелина на кварцната кристална плочка. Со диференцирање на равенката 3.4.2 се добива:

$$\Delta f = -\frac{N}{d_Q^2} \Delta d_Q \quad (3.4.3).$$

Променливата фреквенција (Δf) е функција од промената на дебелината (Δd_Q). Во случај кога филмот е материјал што не е кварцен кристал, тогаш зголемувањето на дебелината (Δd_Q) треба да се должи на зголемување на дебелината на филмот (Δd_m). Оттука следува:

$$\Delta d_Q = (\rho_m / \rho_Q) \cdot \Delta d_m \quad (3.4.4),$$

каде што ρ_m е густината на филмот, ако материјалот не е кварцен кристал и ρ_Q е густина на кварцниот кристал ($2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$). Од последните две равенки се добива:

$$\Delta f = -\frac{N}{d_Q^2} \cdot \Delta d_Q = -\frac{\rho_m}{\rho_Q} \cdot \frac{f^2}{N} \cdot \Delta d_m = s \cdot \Delta d_m \quad (3.4.5),$$

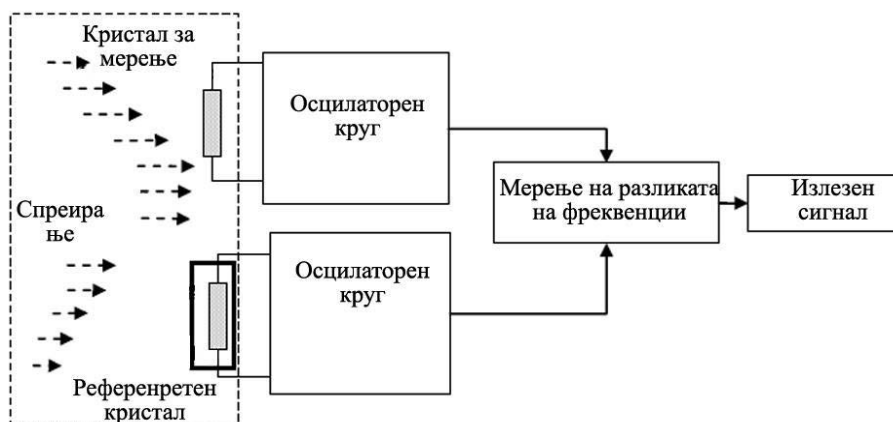
каде што $s = -\frac{\rho_m}{\rho_Q} \cdot \frac{f^2}{N}$ се вика нарекува трансформациона осетливост и

карактеристика за даден кварцен кристал. Дебелина на филмот е дадена со равенката:

$$\Delta d_m = \frac{\Delta f}{s} \quad (3.4.6).$$

Врз база на претходните равенки, овозможува конструкција на уред за мерење на дебелината на филмот на одреден материјал, притоа дебелината на филмот и масата на филмот е далеку помала од масата на кварцната кристална плочка. Од последната равенка може да ја одредиме дебелината на филмот врз база на поместувањето на фреквенцијата која се зголемува линеарно со растењето на филмот.

При обложување на некои материјали (честички, апчиња итн.) кои треба да бидат обложени, се поставуваат во ротационен цилиндар, при што се движат непрекинато и се спреираат (прскаат) со растворот за обложување (полимерно соединение или суспензијата). Спреирираниот раствор за обложување треба биде во форма тенок филм, цврст и компактен. При мерење на дебелината на филмот со кварцен кристален осцилатор треба температурата и притисокот да бидат константни.

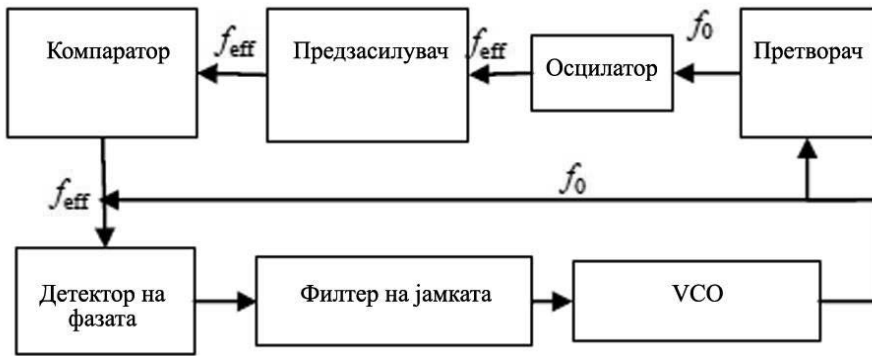


Слика 3.7. Шематски приказ на мерниот систем со кварцна вага.

За намалување на грешките од системот за мерење се дизајнира мерна апаратура, која директно ќе ги мери фреквенциите на осцилаторот без филм и осцилаторот со филм (слика 3.7). Излезниот сигнал од мерното коло ја детектира разликата во фреквенцијата $\Delta f = f_r - f_m$, на референрентната фреквенција f_r и измерената фреквенција со филм f_m .

За дадениот осцилатор, неговата резонантна фреквенција и следење на влезниот сигнал се користи фазно-затворена повратна врска (PLL). PLL е контролен систем кој генерира излезен сигнал чија фаза е поврзана со фазата на влезниот „референрентен“ сигнал. Тоа претставува електронско

коло кое се состои од осцилатор на променлива фреквенција и фазен детектор (слика 3.8). Ова електрично коло ја споредува фазата на влезниот сигнал со фазата на сигналот добиен од неговиот излезен осцилатор и ја прилагодува фреквенцијата на неговиот осцилатор за да



Слика 3.8. Шема на работа на уред со кварцен осцилатор.

се совпаѓаат фазите. Сигналот од детектор на фазата се користи за контрола на осцилаторот, со повратна врска. Системот се состои од фазен детектор, филтер на повратната врска и напонски контролиран осцилатор (VCO). Резонантната фреквенција на кристалот е f_{eff} , а f_0 е измерената фреквенција. Излезниот сигнал од VCO се трансформира во синусоидален сигнал за работа на осцилаторот. Излезниот сигнал се трансформира во квадратен сигнал од напонскиот компаратор и се споредува со сигналот на VCO детекторот на фазата. На крај, овој сигнал од фазниот детектор се користи за контрола на VCO. Оттука, излезниот сигнал од VCO може да се промени со промена на фреквенцијата на осцилаторот.

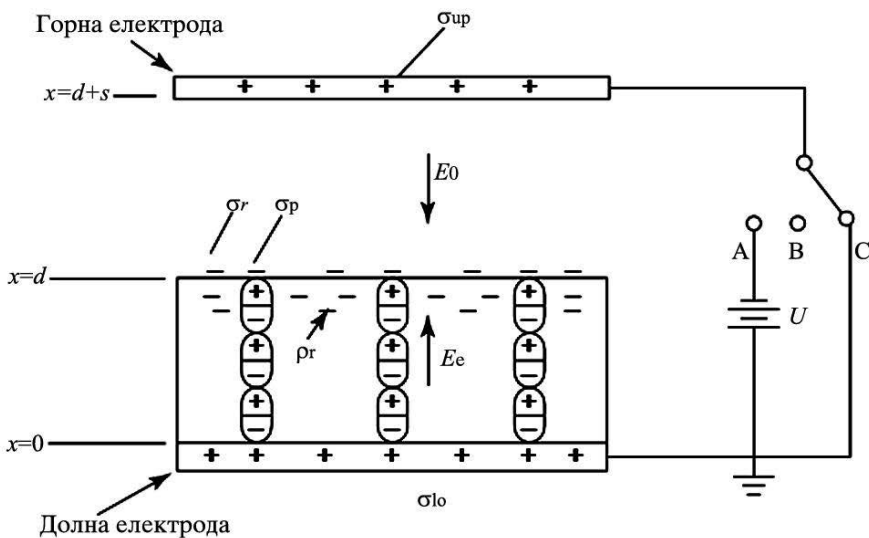
3.5. Електрети

Електрет е електростатски еквивалент на постојан магнет, којшто е сличен на пиезоелектричните и пироелектричните материјали. Електретите се применуваат во микрофоните и слушалките, со добри перформанси на високи фреквенции. Во модерни телефонски слушалки се користат електрети. Исто така, микрофоните во паметните телефони се од електрети.

Електрет е трајно електричен поларизиран диелектричен материјал и може да се смета за електростатски еквивалент на постојан магнет. Електрет се користи во микрофони, во форма на прилично тенки филмови направени од тефлон, полипропилен, Милар (полимер полиестер) и други полимери и е со дебелината од 4 μm до 20 μm . Додека за работа на кондензаторскиот микрофон треба прав напон, електретот генерира сопствено електрично поле, без потреба од надворешен извор на напон. Електретите се создаваат при внесување на диелектричен материјал во силно електрично поле, кое предизвикува акумулација на полнеж во него. Електрично поле ги поместува внатрешните и надворешните полнежи додека не паднат во некои стапици и останат заробени во диелектричниот слој, што доведува до трајна поларизација на диелектрикот. Најчесто за наелектризирање на електретите се применува техниката на корона празнење. Имено, се генерираат јони од корона празнење, со користење на силно електростатско поле помеѓу електрода во форма на мрежа и подлогата (диелектрикот), при што полнежите се инјектираат од јоните кон површината на електретот. Полимерниот електрет се создава со инјектирање (вметнување) на полнежи, притоа за корона празнење треба јачина на електричното поле од (50 ÷ 100) kV/mm. Друг метод за создавање на електрет е наелектризирање на капка течност (вода или етанол) која е во контакт со електрода, а другата страна е во контакт со површината на диелектрикот. Едната страна од површина на диелектрикот е метализирана, додека површина не е метализирана, и е во контакт со тенкиот течен слој или капка. Металната електрода е поврзана со капката и слојот течност, притоа на горната и долната електрода се поврзани со извор на висок напон. Тоа доведува до создавање на наелектризиран двоен слој помеѓу електродата и диелектрикот, и пренесување на полнежот кон диелектричниот филм и негова претворба во електрет. Задржување на полнежот во диелектрик, треба да се повлече електрода (или да испари течноста) пред да се исклучи електричното поле. Познато е дека електричниот полнеж се намалува со текот на времето, во зависност од времето на релаксација на материјалот. Во електретите, промената на полнежот во материјалот

е бавен процес, притоа времето на релаксација е многу години, што е важна карактеристика во повеќето микрофони.

Основниот ефект на електрети се базира појавата на електростатска индукција, притоа надворешното електрично поле од наелектризиран електрет (диелектрик), притоа може двете површини да се без дополнителен филм, или едната површина да биде без филм, а другата површина да биде метализирана. Најчесто, електретите се со едната површина која е метализирана, а другата површина е без филм, така што при донесување на електричен напон на метализираната површина ќе доведе до поларизација во диелектричниот материјал. Друга конфигурација на електретите е кога двете површини се метализирани и се користат за електрети за складирање на полнеж, во уредите за зачувување на податоци. Пиезоелектрични и пироелектрични ефекти се базираат на оваа конфигурација на диелектриците. Главно електретите се електростатски претворачи и се употребуваат за микрофони, каде што електретната дијафрагма е метализирана од едната страна, а задната метална плоча е одделена од дијафрагмата (слика 3.9), со воздушен процеп (зјај). Горната метална електрода (мембрана) е флексибилна и е паралелна со површина на електретот без присуство на каков било тенок слој – филм (необработена). Дебелината на електретот е d , а должината на воздушниот процеп е s . Во случај, кога прекинувачот е на положба А, електретот е поврзан на извор (DC) на прав напон, чија вредност е U . При голем напон се јавува електрично празнење во воздушниот процеп, тогаш по завршувањето на периодот на наелектризирање, прекинувачот се поместува во положба В (отво-



Слика 3.9. Распоред на полнежите во електрет.

рено коло). Како резултат се формира електрет којшто се состои од квази-трајно зафатени полнежи на горната површина (без филм), за да се формира површински густина на полнеж σ_r , квази-трајно заробени реални полнежи во најголем дел, за да се формира волуменска густина на полнеж ρ_r и униформна поларизација P , која се состои од квази постојано „замрзната“ диполарна поларизација P_p и моментално индуцираната поларизација P_i , поради надворешното електрично поле. Терминот квази означува дека полнежите се акумулираат како резултат на приложеното силно електрично поле, а не е карактеристика на материјалот на почетокот.

Анализата на електретот ќе се направи во случај кога е наелектризирана само едната негова површина. Во тој случај густината на полнеж е нула, затоа што имаме распределба на еднаков позитивен и негативен полнеж, дадено со равенката:

$$\rho(x) = 0 \quad (3.5.1).$$

Додека пак, површинската густина на полнеж на дебелина d на електретот се должи на површинската густина на заробените полнежи σ_r и поларизацијата на материјалот P , дадено со равенката:

$$\sigma(d) = \sigma_r - P \quad (3.5.2).$$

При свртување на прекинувачот во положба С (краток спој), напонот помеѓу двете електроди е нула. Во овој случај, настанува преуредување на полнежот на двете електроди и на горната површина на електретот. Површинската густина на полнежот на долната електрода σ_{lo} и горната електрода σ_{up} , треба да биде еднаква на површинската густина на полнеж на горната површина на електретот, дадено со равенката:

$$\sigma_{lo} + \sigma_{up} = -\sigma \quad (3.5.3).$$

Горната равенка може да се изрази и преку електричното поле и се добива:

$$\epsilon_r \epsilon_0 E_e + \epsilon_0 E_0 = -\sigma \quad (3.5.4).$$

Од сликата 3.9. се гледа дека насоката на електричното поле E_e во електретот насоката на електричното поле E_0 помеѓу електретот и горната електрода се спротивни. Бидејќи се работи за различни вредности на дебелината на електретот и воздушниот процеп, тогаш падот на напонот во електретот со дебелина d и падот на напонот во празниот простор се еднакви, т.е следува:

$$E_e d = E_0 s \quad (3.5.5).$$

Последната равенка може да се замени во равенката 3.5.4 и се добива:

$$\epsilon_r \epsilon_0 E_e + \epsilon_0 \frac{E_e d}{s} = -\sigma \quad (3.5.6),$$

$$\epsilon_0 E_e \left(\epsilon_r + \epsilon_0 \frac{d}{s} \right) = -\sigma \quad (3.5.7),$$

$$E_e = -\frac{\sigma s}{\varepsilon_0(\varepsilon_r s + d)} \quad (3.5.8),$$

$$\varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{s}{d} E_0 + \varepsilon_0 E_0 = -\sigma \quad (3.5.9),$$

$$E_0 = -\frac{\sigma d}{\varepsilon_0(\varepsilon_r s + d)} \quad (3.5.10),$$

$$E_e = -\frac{\sigma s}{\varepsilon_0(\varepsilon_r s + d)} \quad (3.5.11), \text{ и}$$

$$\frac{\varepsilon_r \sigma s}{(\varepsilon_r s + d)} + \frac{\sigma d}{(\varepsilon_r s + d)} = \sigma \quad (3.5.12).$$

Со споредба на 3.5.3 со последната равенка се добива:

$$\sigma_{lo} = -\frac{\varepsilon_r \sigma s}{(\varepsilon_r s + d)} \quad (3.5.13),$$

$$\sigma_{up} = -\frac{\sigma d}{(\varepsilon_r s + d)} \quad (3.5.14).$$

Промената на должината на воздушниот зјај ќе предизвика промена на јачината на електричното поле E_e и промена на јачината на електричното поле E_0 . Тоа ќе предизвика и промената во σ_{lo} и σ_{up} подразбира дека ќе има проток на струја, при краток спој. Додека пак, при сврзување на потрошувач (отпорник) помеѓу двете електроди ќе јави електричниот сигнал којшто ќе се менува со надворешна сила. Од равенките 3.5.10. и 3.5.11 се гледа дека ако ја придвижиме горната електрода до бесконечност ($s \gg d$), тогаш следува:

$$E_0 = -\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \left(\varepsilon_r \frac{s}{d} + 1 \right)} = -\frac{\sigma}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \frac{d}{s} \approx 0 \quad (3.5.15),$$

$$E_e = -\frac{\sigma s}{\varepsilon_0(\varepsilon_r s + d)} = -\frac{\sigma s}{\varepsilon_0 s \left(\varepsilon_r + \frac{d}{s} \right)} = -\frac{\sigma}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \quad (3.5.16).$$

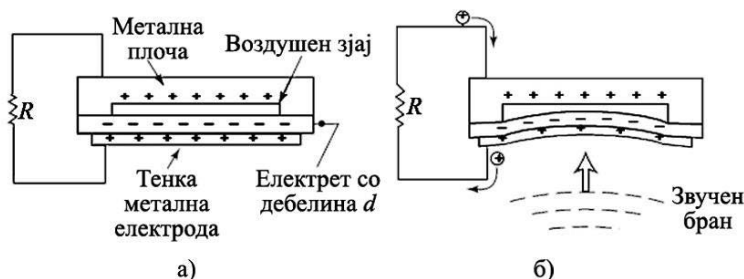
Оттука потенцијалот низ електретот и воздушниот процеп е даден со равенката:

$$V_e = V_0 = -\frac{\sigma}{\varepsilon_r \varepsilon_0} d \quad (3.5.17),$$

каде што напонот независи од параметарот s .

3.6. Примена на електретите

Најчесто електретите се применуваат за уредите како претворачи и сензорите. Всушност секоја надворешна сила што доведува до механичка компресија, топлина, звучни бранови, електрична енергија, светлина или зрачење ќе биде во взаемнодејство со акумулираните полнежи во електретите. Тоа овозможува конципирање и производство на нови уреди во медицината и и биологијата. Најпрво, електретите биле направени од восок кои имале слаба термичка стабилност. Со тек на време, во 1962 година се направени електрети од флуорополимери како што се PTFE (политетрафлуороетилен или тефлон), PTFE-FEP (политетрафлуороетилен-флуориран етилен пропилен) и PVDF (поливинилиден флуорид), бидејќи тие се тенки, флексибилни полимерни филмови и се со добра термичка стабилност. Првите уреди направени од електрети биле микрофоните и слушалките. Микрофоните направени од електрет се со мали димензии, евтини, издржливи и со добри карактеристики на високи фреквенции. Исто така, современите телефонски слушалки се направени од електрети.



Слика 3.10. Електрет микрофон: а) шематски дијаграм на електрет микрофон и б) течење на струја при дејство на звучен бран.

Принципот на работа на електретните микрофони е даден на слика 3.10. Тенкиот филм (фолија) е негативно наелектризиран електрет, каде што на едната површина е наталожено метален филм, а другата површина е без каков било слој и претставува дијафрагма. Помеѓу метална плоча и дијафрагмата има воздушен процеп. Во случај да нема звучен бран, напонот на електретот U_e и напонот на воздушниот зјај U_0 се исти, и се дадени со равенката:

$$|U_e| = E_e d = |U_0| = E_0 s = - \frac{\sigma_T ds}{(\epsilon_r s + d) \epsilon_0} \quad (3.6.1), \text{ и}$$

$$\sigma_T = \sigma = \sigma_r - P + \sigma_p \quad (3.6.2),$$

каде што σ_T е вкупната површинската густина на полнеж на електретот, P е униформна поларизација, σ_r е површинската густина на полнеж, σ_p е површинската густина на полнеж која се должи на постојани диполи –

„замрзнати“, d е дебелината на електретот и s е воздушниот зјај. При осцилации на дијафрагмата под дејство на звучен бран, притоа воздушниот процеп ќе се менува во согласност со фреквенцијата на звучниот бран, дадено со равенката:

$$s_1 = s + a \sin \omega t \quad (3.6.3),$$

каде што s е првобитниот воздушен зјај, ω е фреквенција на осцилирање на дијафрагмата и a е амплитудата на осцилирање на дијафрагмата. Оттука, индуцираниот полнеж на горната електрода (равенка 3.5.14) е дадено со равенката:

$$\sigma_{up} = -\frac{\sigma_T d}{\varepsilon_r (s + a \sin \omega t) + d} \quad (3.6.4).$$

Промените на површинската густина на полнеж на горната електрода ќе доведе до течење на струја i низ потрошувачот со отпор R , дадена со равенката:

$$i = A \frac{d\sigma_{up}}{dt} = \frac{Ada\varepsilon_r\omega\sigma_T}{[\varepsilon_r (s + a \sin \omega t) + d]^2} \cos \omega t \quad (3.6.5).$$

каде што A е површина на електретот. За мали вредности на амплитудата на осцилирање на дијафрагмата ($a \ll s$), напонот на краевите на отпорникот е даден со равенката:

$$i = A \frac{d\sigma_{up}}{dt} = \frac{Ada\varepsilon_r\omega\sigma_T}{[\varepsilon_r (s + a \sin \omega t) + d]^2} \cos \omega t \quad (3.6.6).$$

$$U_R = iR = \frac{Ada\varepsilon_r\omega\sigma_T R}{(\varepsilon_r s + d)^2} \cos \omega t = \text{const} \cdot \cos \omega t \quad (3.6.7).$$

Овој напон може да се засили со засилувач за да може да работи микрофонот, без никакво надворешно напојување. Електретните микрофони се направени од PTFE-FEP (тетрафлуороетилен т.н. тефлон со кополимер флуориран етилен пропилен) филм со дебелина од (50 ÷ 100) μm , со складирана густина на полнеж од (10 ÷ 20) nC cm^{-2} и воздушен зјај од (10 ÷ 20) μm (слика 3.11).

Покрај употребата на електретите за микрофон, тие се применуваат и во други уреди. Така, на пример, електретите се користат како воздушни филтри, каде што електродите на филтрите се направени од полипропиленски филм, со дебелина од 8 до 10 μm . Потоа, филмовите се наелектризираат со корона празнење и се поставуваат во држачи на мало растојание, паралелно еден во однос на друг. Овие листови од електрети се во вид на саќе, со цел поголе-



Слика 3.11. Реален електретски микрофон.

ма количина на воздух да се прочистува. Електретните листови фаќаат честички од воздух, по пат на индукција на диполите во нив.

Друга примена на електретите е нивна употреба за дозиметријата на зрачењето. Електретниот дозиметар го одредува зрачењето врз база на взаемнодејство на зрачењето и складираните полнежи на електретот. Радијационите ефекти од радиоактивните материјали предизвикуваат генерација на парови јони во воздухот кои придонесуваат за зголемување на спроводливоста на воздухот и опаѓање на полнежот во електретот. Мерење на разликата на напонот на електретот пред и по зрачењето овозможува одредување на количината на јонизација. Со калибрирање на системот се одредува дозата на зрачење во дадена животна средина. По мерењето на дозата на зрачењето со помош на електрет, истиот може повторно да се наелектризира и да служи како дозиметар. Така, на пример, Амрани користел електретна јонска комора за определување количината на радон во подземните води. Имено, била поставена електретна јонска комора низ која струела одредена количина вода. Исто така, тоа овозможува одредување на концентрацијата на радон во воздухот, и да се споредат со вредностите на радонот во водата.

Исто така, откриено е дека во некои биополимери се зачувуваат полнежите или се јавува складирање на полнежите при поларизација. Оттука, овие материјали се однесуваат како електрети во нивната примена во биомедицината. Слични ефекти се најдени и во некои биополимери и протеини. Така, восок од Карнауба е првиот материјал којшто бил користен како електрет.

3.7. Магнетостриктивни претворачи

Од претходните појави се гледа дека електричните полнежи може да доведат до појава на механички сили. Слична појава на електрострикција е магнетострикција. Во процесот на спонтана магнетизација, доменот во феромагнетниот материјал секогаш е придружен со издолжување или скусување на материјалот, во правец на магнетното поле. Појавата на механичка деформација на материјалот како резултат на магнетно поле се вика магнетострикција. Магнетострикцијата е резултат на анизотропијата на материјалот и преферентната насока на магнетизација, во одредени кристалографски насоки. Од друга страна, секоја деформација која се должи на механичките сили, ќе доведе до зголемување на енергијата на истегнување. На тој начин, поради магнетострикција се трансформира електричната енергија во енергија на магнетно поле, а таа се

трансформира во механичка енергија, во магнетостриктивните претворачи (слика 3.12). Оваа појава е непожелна во магнетното јадро на електромоторите поради големите вибрации и големата бучава во трансформаторите. Материјалот Терфенол-D, се карактеризира со посилен магнетостриктивен ефект отколку чистите феромагнетни метали.

За разлика од пиезоелектричноста, магнетостриктивниот ефект е нелинеарен ефект, бидејќи промената на формата е иста, без оглед на правецот на магнетното поле. Поради нелинеарноста на магнетостриксијата материјалите се изложени на статичкото механичко напрегање или на магнетно поле.

Статичкото механичко напрегање на материјалот како функција на применетото магнетно поле зависи од својствата на материјалот, дадено со константата на материјалот k_{ms} . Во регионот, пред да се случи заситување на магнетниот флуks, механичкото напрегање кое се јавува како резултат на магнетната индукција е дадено со равенката:

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} \approx k_{ms} B^2 \quad (3.7.1).$$

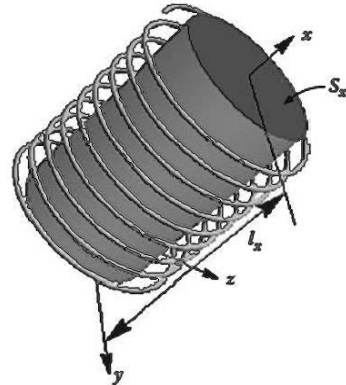
При механичкото напрегање како резултат на магнетостриксијата се јавуваат внатрешни еластични сили кои се покоруваат на Хуковиот закон и се спротивставуваат на деформацијата, која е резултат на надворешното магнетно поле. Оттука, механичкото напрегање на материјалот е дадено со равенката:

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = -\frac{1}{Y} \frac{F_x}{S_x} + KB_i \quad (3.7.2).$$

каде што, Y е Јунгов модул на еластичност на прачката, F_x е Хуковата сила која е еднаква со внатрешните сили, S_x е површината на цилиндарот, B е магнетната индукција која се должи на надворешното магнетно поле, K е константа на магнетостриксија на прачката. Константата на магнетостриксија ќе зависи од надворешната магнетна индукција B_0 , дадено со равенката:

$$K = 2Yk_{ms} B_0 \quad (3.7.3).$$

Во случајот на користење на магнетостриктивната прачка, промената на густината на магнетниот флуks се должи на јачина на надворешно магнетно поле H и промената на механичкото напрегање. Имено, деформацијата на прачката под дејство на надворешно магнетно поле,



Слика 3.12. Калем со цилиндрично јадро од магнетостриктивен материјал со должина l_x .

кое е резултат на променлива електрична струја во калемот, ќе доведе до промената на магнетната индукција која се должи на овие два ефекта, дадено со равенката:

$$B_i = \mu H_i + \mu K \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (3.7.4).$$

каде што μ е магнетна пермеабилност на материјалот. Во случај кога магнетно поле $H_i = 0$, следува:

$$B_i = \mu K \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (3.7.5).$$

Со замена на последната равенка во равенката 3.7.2. се добива:

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = -\frac{1}{Y} \frac{F_x}{S_x} + \mu K^2 \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (3.7.6)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} (1 - \mu K^2) = -\frac{1}{Y} \frac{F_x}{S_x} \quad (3.7.7),$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = -\frac{1}{Y(1 - \mu K^2)} \frac{F_x}{S_x} \quad (3.7.8),$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = -\frac{1}{Y'} \frac{F_x}{S_x} \quad (3.7.9).$$

Последната равенка е Хуковиот закон за еластичност на тврдо тело, каде што наместо константата на Јунговиот модул, имаме ефективен Јунгов модул, даден со равенката:

$$Y' = Y(1 - \mu K^2) = Y(1 - 4\mu Y^2 k_{MS}^2 B_0^2) = Y(1 - k_{ME}^2) \quad (3.7.10).$$

каде што k_{ME} е електромеханички коефициент на магнетостриктивниот уред.

Магнетостриктивните претвораи се слични на претвораите направени од пиезоелектрична керамика, но имаат предност поради тоа што не користат високи напони. Јадрата обично се направени така што при резонанција да се добие максимална механичка деформација. Од друга страна, механичките загуби во магнетостриктивните материјали се ниски, со мала магнетна хистереза и Фуколови струи во материјалот, и загуби на отпор во калемот за магнетизирање. Во практичната употреба, загубите на електромагнетно зрачење се многу поголеми отколку загубите кои се должат на претворање на електричната енергија во топлина. Покрај тоа, кај некои магнетостриктивни претвораи е можен ефектот на лост.

4. ПОЛУСПРОВОДНИЧКА ТЕХНОЛОГИЈА

Електронските кола се состојат од електронски уреди (транзистори, отпорници, кондензатори, диоди и друго), кои се помеѓу себе електрично поврзани со метални водови или се електрично изолирани помеѓу себе. Развиени се различни технологии за реализација на електронските уреди и се класифицирани во три главни групи:

1. технологија на печатени плочки,
2. хибридна технологија и
3. полупроводничка технологија.

Во секоја група имаме подгрупи, така технологијата на печатени плочки може да се подели во:

- технологија на поврзување на елементите со помош на плочка со дупчиња (ТНТ),
- технологија на поврзување на елементите со помош на залемување на површината на плочката (SMT).

Хибридната технологија се состои од:

- технологија со дебел филм,
- технологија со тенок филм.

Додека пак, полупроводничката технологија се состои од:

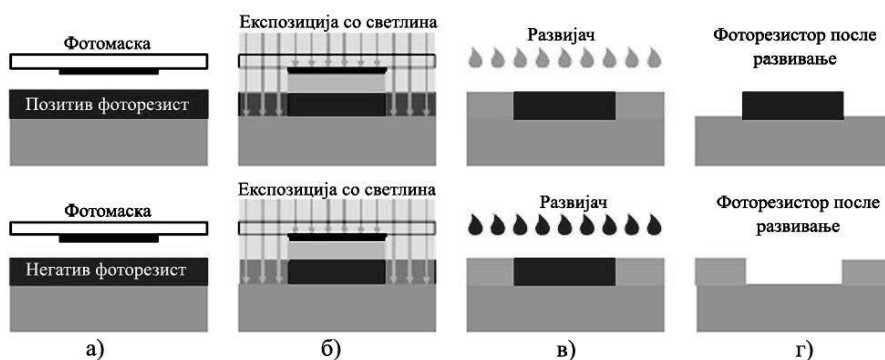
- дискретни полупроводнички компоненти, и
- интегрирани кола.

4.1. Фотолитографија

Фотолитографијата е метода која најмногу се користи во процесите на добивање на полупроводнички уреди. За таа цел, треба дводимензионална слика да се пренесе на супстратот, за добивање или заштита на потребните структури на површината супстратот (плочка во форма на диск од монокристален силициум). Истиот метод се користи и за добивање електронски спроводни водови, како и за поврзување на сите елементи во електронските кола.

На плочката во форма на диск од монокристален силициум се нанесува тенок филм којшто е осетлив на светлина, т.н. фоторезистор.

Фоторезисторот може да биде во форма на течност, којашто се нанесува со спреирање (прскање во форма на ситни капки), коишто се слеваат една со друга и формираат тенок рамномерен филм. Исто така, течниот фоторезистор може да се наталожи со методот на ширење на капка, со помош на ротација (spin coating). Имено, течноста се нанесува во средината на подлогата, во форма на капка. Поради големата брзина на ротација на неа дејствува центрифугалната сила која придонесува за ширење на капката во форма на тенок филм. Фоторезисторот во форма на течност се суши на собна температура, притоа испарува растворувачот и се добива тенок филм во тврда состојба. Друга метода е нанесување на фоторезисторот во форма на тенок филм во тврда состојба којшто е нанесен на прозирна фолија. Фоторезисторите обично се полимери кои се осетливи на UV (ултравиолетова) светлина. При осветлување на позитивен фоторезистор, неосветлените региони нема да се растворат во развивачот. Всушност, неосветлените региони се добиваат на места каде што маската е црно обоена. Од друга страна, кај негативен фоторезистор регионите кои се осветлуваат со светлина нема да се растворат во разивач, а тоа се безбојните региони на фотомаската (слика 4.1). Всушност, осветлувањето на негативен фоторезистор придонесува за полимеризација на полимерите во фоторезисторот и нивно нерастворање во развивачот. Нерастворениот фоторезистор може да послужи како маска за некои наредни чекори во процесот на



Слика 4.1. Шематски приказ на фотолитографија: а) поставување на фотомаска, б) експозиција, в) развивање и г) изглед на фоторезистор после развивање.

производство на елементот. Од друга страна, на местата каде нема фоторезистор може да се примени нагризивање на подлогата, ако тоа е од интерес. Друга карактеристика на фоторезисторот е неговата експозиција. Имено при осветлување на позитивен фоторезистор со одредена бранова должина интензитет, времетраење), придонесува за распаѓање на фоторезисторот. Додека пак, за негативен фоторезистор осветлените региони остануваат после развивањето, а неосветлените

региони се растворуваат во развивачот. Со загревање на одредена температура, фоторезисторот се залепува на подлогата, со што е подготвен за осветлување со светлина.

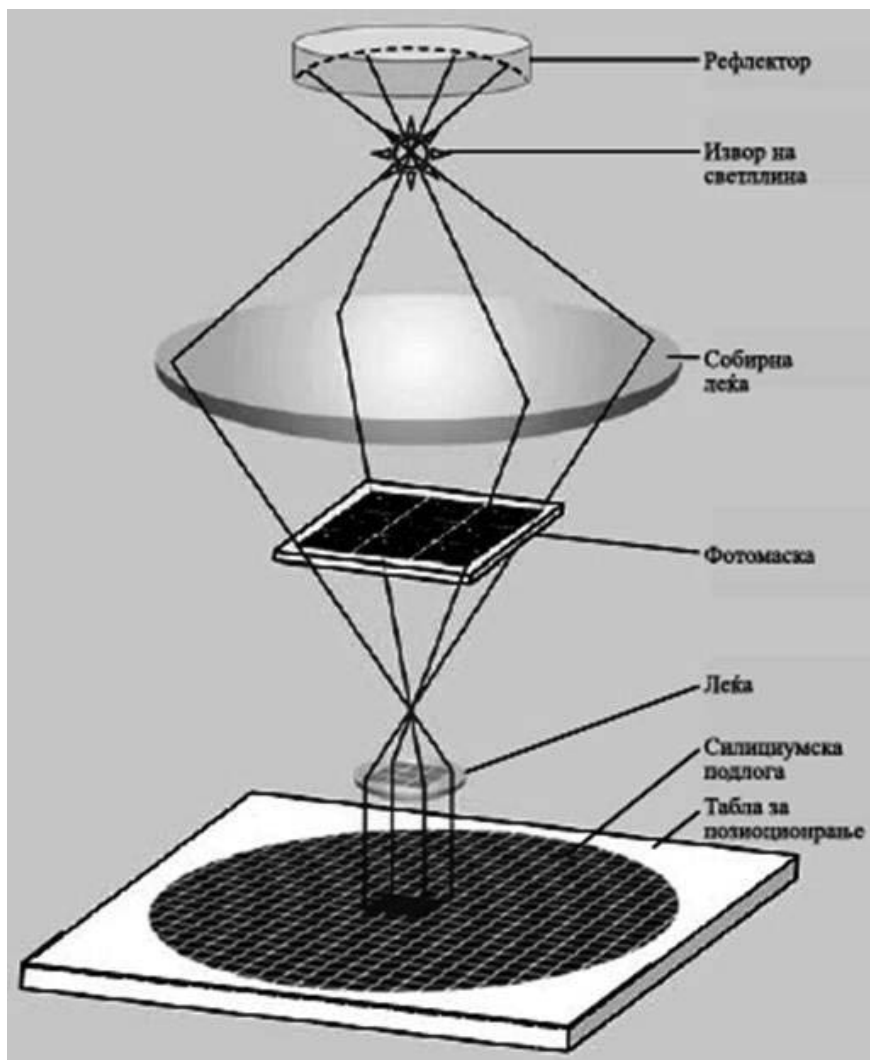
Покрај тоа, најчесто за осветлување се користи UV (ултравиолетова) светлина и не треба целиот филм од фоторезисторот да биде осветлен со светлина, туку одредени делови, со цел да се зачува или изгради соодветна структура на полупроводничкиот елемент (диода, транзистор или друго). Затоа, се прави фотомаска која содржи црно или бело обоени региони, во зависност од тоа дали се користи позитивен фоторезистор или негативен фоторезистор. Фотомаската може да биде тенка стаклена фолија или полимерна фолија која е стабилна на температура и хемикалии при нејзино печатење со ласерски принтер или печатар со мастило. Кога фотомаската ќе се осветли со UV лампа, се добива сенка врз фоторезисторот за да се добие саканата структура на електронскиот елемент. Експозицијата на маската може да биде со директна светлина или светлина од проектор.

При директна експозиција, фотомаската се поставува над и во непосредна близина на супстратот (слика 4.1.a), или е во директен контакт со фоторезисторот (слика 4.1.б). Односот помеѓу маската и сликата што се добива на фоторезисторот е 1 : 1, што значи дека маската треба да биде соодветна на големината на супстратот. Контактната експозиција е несоодветна за масовно производство, бидејќи може да предизвика оштетување на фотомаската или на фоторезисторот. Додека, експозицијата на фоторезисторот при фотомаска во близина не може да биде на големо растојание, туку треба да биде на растојание помеѓу 10 μm и 40 μm , бидејќи ќе доведе до намалување на резолуцијата на сликата.

Во случај кога димензиите на водовите и другите потребни структури на маската се од ред на големина на бранова должина на светлината, при експозицијата ќе се јави дифракција на светлината, која е негативна појава. Затоа, при директната експозиција на фоторезисторот треба водовите и другите структури на фотомаската да бидат поголеми од брановата должина на светлината за да не се добие матна слика. Од друга страна, при експозицијата на фоторезисторот при користење на фотомаска во близина, резолуцијата на водовите и другите структури на фотомаската ќе биде околу 3 μm . Сепак, во современите полупроводнички технологии за полупроводници, резолуцијата треба да биде околу 10 nm, што е невозможно со оваа техника.

Друга техника на експозиција е осветлување со проектор, каде што резолуцијата на сликата е многу поголема од директната експозиција. Имено, при експозицијата со проектор, водовите и другите структури на фотомаската се осветлуваат со проектор, притоа

светлината поминува низ леќа и се фокусира на монокристал од силициумска плочка (слика 4.2). Во овој случај фотомаската и плочката од силициум се физички одделени, сликата е оптички намалена со што се зголемува интензитетот и контрастноста на сликата. Тоа придонесува за подобрување на квалитетот на сликата врз фоторезисторот и добивање на елементи на плочката од силициум, со минијатурни



Слика 4.2. Шематски приказ на фотолитографија на силициумска подлога при експозиција од проектор.

димензии. За таа цел, се применуваат фотомаски со 4X, 5X и 10X, т.е. односот на сликата добиена на фоторезисторот и маската е во размер 4, 5 и 10 : 1. Меѓутоа, изработката на вакви фотомаски е друг проблем, притоа леќата треба да има минимални оптички недостатоци. Овие фотомаски се употребуваат за изработка на интегрирани кола, каде што

за еден уред на интегралното коло се користи една маска. Исто така, при изработката на интегрални кола се применуваат повеќе чекори, на иста постапка на различни места на плочката од силициум (слика 4.2). Обично за експозиција на плочките од силициум се користи ултравиолетова светлина, поради добрата оптичка резолуција. Покрај тоа, технологијата на експозиција и фотомаска постојано се развива за да се зголеми резолуцијата на сликата на 10 nm, при примена на светлина од ласер (аргон-флурид) со бранова должина од 193 nm (аргон-флуорид ласер). Ваквата прецизност на изработка на интегрални кола овозможува голема концентрација на уреди на мала површина. Наука која се бави со изработка и проектирање на интегрални кола (чипови) со толку мала резолуција е Наноелектрониката. Оптичката резолуција може да се подобри со користење на ултравиолетова светлина, со мала бранова должина. Во последно време се применува директна експозиција на фоторезисторот со електронски сноп. При овој процес структурите се градат директно на силициумската плочка, без потреба од скапи фотомаски.

4.2. Технологија за добивање на различни структури врз силициумска плочка

Основа на полупроводничката технологија е силициум (Si) којшто се употребува за производство на диоди, транзистор, интегрални кола и други сложени уреди. Силициумот се добива од силициум диоксид (SiO_2) или кварц, којшто го има во изобилие во природата, а со тоа и цената на силициумот е ниска. Најпрво, кварцот се редуцира до металуршки силициум во топилници со помош на јаглерод (кокс), притоа се добива силициум со чистота околу 96%. Понатаму, силициумот се прочистува со помош на електролиза на растопени соли на температура над 600 °C, во којшто се растворува металуршкиот силициум. На овој начин се добива силициум со чистота на 99% и претставува материјал за добивање на монокристален силициум, со методот на Чохралски. Покрај тоа, силициумот има добри механички, хемиски и електрични својства. Механичките својства на силициумот се добри затоа што тој е цврст, хемиски е стабилен на киселини и бази. Силициумот е материјал којшто е речиси изолатор, но со допингување станува полупроводник.

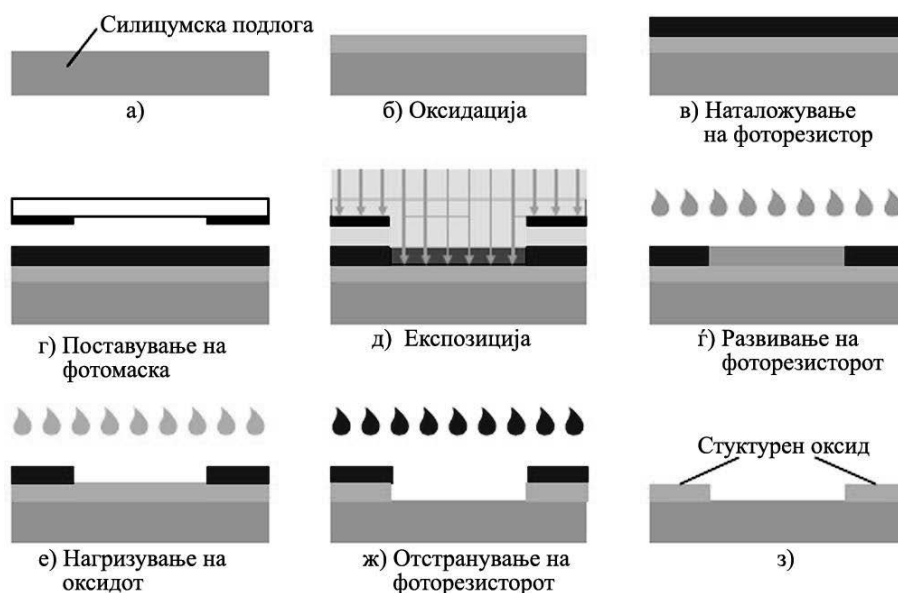
Физичките својства на силициумот се одлични. Имено, силициумот е индиректен полупроводник со ширина на забранетата зона на 1,1 eV, голема подвижност на носителите, а сопствената спроводливост е незначителна и се зголемува за температури над 200 °C. Затоа, силициумот широко се применува кај различни уреди кои

работат на собна температура. Покрај тоа, напонот потребен за појава на спроводливост на силициумот во транзисторите со ефект на поле (FET) и транзисторите MOSFET е под 1 V, што е многу важно за сите електронски уреди. Покрај тоа, во уредите се користи слој од силициум диоксидот (SiO_2), којшто е многу стабилен материјал, може да се користи како електричен изолатор помеѓу два или повеќе уреди на една плочка (интегрално коло-чип), и служи како диелектрик во кондензатори и транзистори со ефект на поле. Силициумот е добар топлински спроводник, што овозможува одведување на топлината кон средината, со помош на метален радијатор. Тоа овозможува минијатуризација на уредите, затоа што уредите лесно се ладат и не е можно нивно брзо загревање и оштетување. Силициумот може да биде во форма на монокристал или да биде со поликристална структура. Добивањето на силициумот во форма на монокристал се добива со методот на Чохларски или со методот на зонско топење, притоа електролитскиот силициум се топи на температура од 1414 °C. Во растопината се става мал силициум монокристал, при постојано вртење на монокристалот и градиент на температурата близу до температурата на кристализација на силициумот. На атомите на монокристалот се сврзуваат атоми од растопината на силициум, така што со методот на Чохларски малиот силициумски монокристал бавно се извлекува од растопината. Тоа овозможува растење на монокристал којшто ќе биде многу поголем од почетниот монокристал. Покрај тоа, силициумот може да се допингува со додавање на примесни атоми (допанти), во форма на чисти материјали од фосфор или бор. Од друга страна, во процесот на добивање на монокристален силициум со методот на зонско топење, се поставува мал монокристал во растопината која ротира и постепено се лади во насока спротивна од страната каде што е поставен малиот монокристал. Двете методи овозможуваат добиениот монокристал да е во форма на цилиндар којшто понатаму се сече во форма на диск плочка (wafer) со дебелина од 1 mm. Во монокристалниот силициум во форма на диск, атомите се распоредени во кристалната решетка на начин што зависи од неговата кристална структура која се повторува низ целата диск плочка и со минимални дефекти во материјалот. Потоа, површината на диск плочката се полира, така што рапавоста е околу 0,1 nm и се со дебелина над 200 μm . Исто така, дијаметар на монокристалната силициумска диск плочка е од 200 mm до 400 mm, и се основа во производството на интегрални кола и микропроцесори.

Исто така, силициумот како материјал има предности во однос на другите полупроводници, затоа што формира стабилен природен оксид, од силициум диоксид (SiO_2). Силициум диоксид е одличен електричен изолатор, со голема вредност на диелектрична константа и се применува во MOSFET транзисторите. Покрај тоа, силициум диоксид е механички

стабилен и може да послужи како маска во процесите на фотолитографија. За добивање на силициум диоксид се применуваат различни процеси, со цел да послужи како маска или како структурен слој во некој уред. Во процесот на добивање на структурни елементи врз монокристална силициумска плочка се применува планарната технологија, каде што обично слоевите се паралелни на површината на силициумот. Најчеста метода за добивање на силициум оксид е термичката оксидација на површината на силициумската плочка. Дебелината на оксидот расте со тек на времето. За таа цел, постојат два вида различни процеси на термичка оксидација: сува оксидација и влажна оксидација. При сувата оксидација, силициумските плочки се загреваат во печка на температура од 1000 °C до 1200 °C во атмосфера на кислород (O_2), притоа се добива оксид со незначителни дефекти. Овој процес се користи за добивање на многу тенки оксиди, за портите MOSFET транзистори и за диелектрици во кондензатори. Друга постапка на оксидација на силициумската подлога е влажна оксидација. При овој процес, кислородот струи заедно со пареа, притоа силициумската плочка е загреана на температура од 1000 °C до 1200 °C и се изложува на пареата. Реакцијата на оксидација се одвива многу побрзо отколку сувата оксидација, но самиот процес тешко се контролира, а добиениот оксид е со послаб квалитет. Исто така, оваа оксидација на силициумските плочки се користи за производство на транзистор со изолирана порта со оксид (MOSFET транзистор), каде што одделни региони или транзисторите се странично изолирани помеѓу себе. Во случај, кога како појдовни супстанција се користи органско соединение на силициум, тогаш силициум диоксид се добива внесување на кислород и при распаѓање на органско соединение на силициум, се јавува реакција на оксидација на силициумот, во соодветна комора. Овој вид оксидација служи за електрично изолирање на слоевите помеѓу себе, кои служат за метализација.

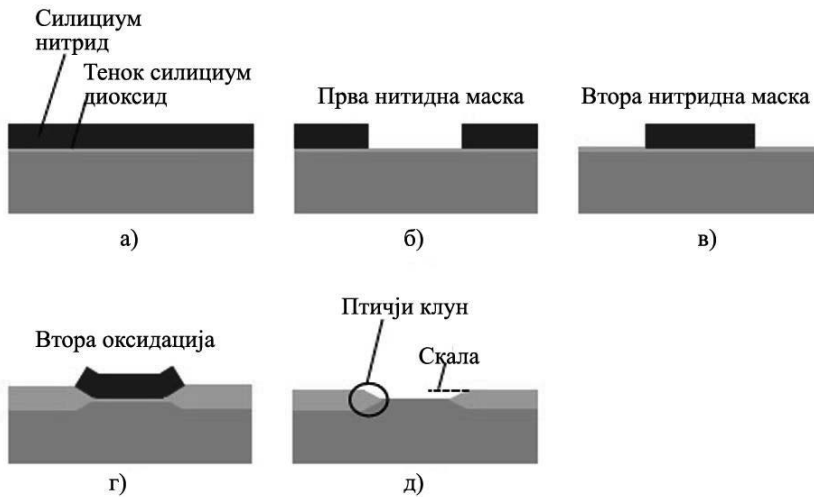
Друг процес што треба да се направи е хемиско отстранување на силициум диоксид, со цел правење на нова маска на самата плочка или таложење на друг слој во процесот на изработка на транзистори, диоди и интегрални кола (слика 4.3). Најпрво силициумската плочка се оксидира (слика 4.3.а) потоа се наталожува позитивен фоторезистор, се поставува фотомаска и се осветлува со светлина. Осветлените места на фоторезисторот се отстрануваат со развивач. Регионите на кои им е отстранет фоторезисторот, се нагризува слојот од силициум диоксид. Најчесто користен метод за отстранување на слојот од силициум диоксид е влажно нагризување, притоа силициумот диоксид се раствора во флуороводородна киселина или друго хемиско средство. Недостаток на влажното нагризување е што тоа е изотропно, што може да доведе до странично нагризување под фоторезисторот. Оттука, оксидните отвори



Слика 4.3. Шематски приказ на фотолитографија на силициум диоксид врз силициумска подлога.

се поголеми од отворите во фоторезисторот. Затоа, влажното нагризување се користи само за растворање и отстранување на цели слоеви. Друг процес на нагризување е сувото нагризување на силициум диоксид. За таа цел, се користи реактивно јонско нагризување при што соединението се јонизира, со помош на гасна плазма. Јоните ја бомбардираат силициумската плочка и на местата каде силициум диоксид е без фоторезистор, ќе се јави нагризување. При овој процес нема поместување на работ на фоторезисторот, што овозможува добивање на прецизни структури врз силициумска плочка.

Со цел да се надминат проблемите со степенеста структура врз силициумската плочка, се врши локална оксидација. При локална оксидација, силициум оксид не може да се структурира со маскирање и нагризување. Затоа се прави маскирање со силициум нитридот (Si_3N_4), наместо со фоторезистор. Бидејќи адхезивноста на силициум нитрид е слаба кон силициумската плочка, тој се наталожува врз силициум диоксид (слика 4.4.а). Потоа, маската од силициум нитрид се нагризува со методата на фотолитографија (слика 4.4.б), при што се отстранува само немаскираниот дел од силициум нитрид. Потоа, повторно се прави термичката оксидација која е изотропна, притоа оксидниот слој расте на границата со силициум нитрид и во хоризонтална насока. Силициум оксидот се шири под силициум нитридот, притоа расте под одреден агол. Ширењето на силициум диоксидот придонесува за остри рабови на неговите краеве. За добивање на саканата структура се наталожува повторно силициум нитрид, но сега маскирањето е обратно (слика 4.4.в).



Слика 4.4. Шематски приказ на фотолитографија на силициум нитрид врз силициумска подлога.

Се отстранува немаскираниот дел врз силициум диоксидот и врши повторна термализација на силициумската плочка. Оксидниот слој расте на границата со силициум нитрид и во хоризонтална насока, но со спротивна косина од претходната постапка (слика 4.4.г). На крајот се отстранува силициум нитридот, притоа се добива скалест силициум оксид, за половина чекор повисок во форма на шилец т.н. „птичји клун“, којшто ќе се употреби во MOSFET транзисторите (слика 4.4.д).

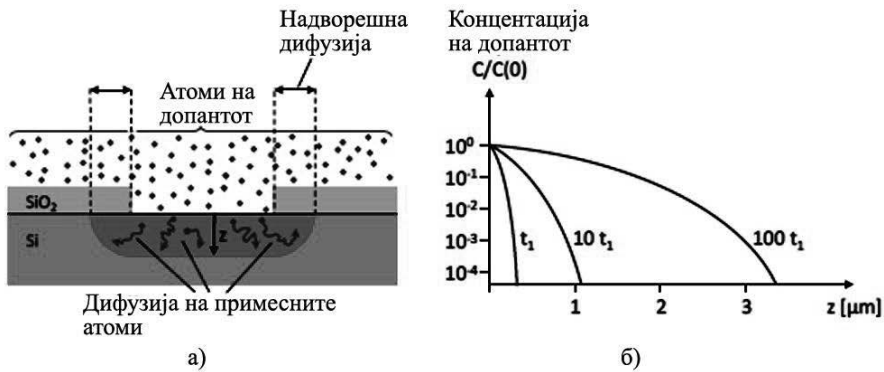
4.3. Допингување на силициумска плочка

Допингувањето е многу важна постапка за добивање диоди, транзистори и интегрални кола кои понатаму се употребуваат во различни полупроводнички уреди. Допингувањето на монокристална силициумска плочка може да биде со петтовалентен елемент, при што ќе се јават слободни електрони, а материјалот е n-тип полупроводник. Од друга страна при допингување на монокристална силициумска плочка со тривалентен елемент, ќе се јават слободни шуплини поради нереализирани ковалентни врски, а материјалот е p-тип полупроводник. Силициумот за да биде n-тип полупроводник, треба да се допингува со фосфор, арсен и антимон. Додека пак, силициумот ќе биде p-тип полупроводник при негово допингување со бор.

Допингувањето е процес на вметнување и замена на матичните атоми со туѓи атоми, а поради малата количина се викаат уште и примеси. Самиот процес на допингување може да се случи со додавање на примесни атоми при производството на монокристални силициумски плочки и се вика легирање, т.е. со додавање на примеси во растопината од силициум. Од друга страна, допингувањето може да биде со вградување на примесни атоми на едната површина на силициумската плочка, при термичка дифузија и бомбардирање со јони (имплантација).

Процесот на допингување на површината на силициумската плочка по пат на дифузија, означува дека примесните атоми навлегуваат во силициумот поради разликата во концентрациите на примесните атоми во силициумот и надвор од него. Покрај тоа, потребно е силициумските атоми и примесните атоми да бидат термички возбудени, при што можат да се движат во рамките на решетка. Затоа, монокристалните силициумски плочки се загреваат во печка, на температура околу 1200 °C. Допингувањето се врши со внесување на гас фосфин (PH_3) за добивање на n-тип полупроводник или со внесување на гас диборан (B_2H_6) за добивање на p-тип полупроводник, во печката за термализација. При процесот на допингување примесните атоми може да ги зафатат празните места во кристалната решетка на силициумот или да ги заменат силициумските атоми во кристалната решетка.

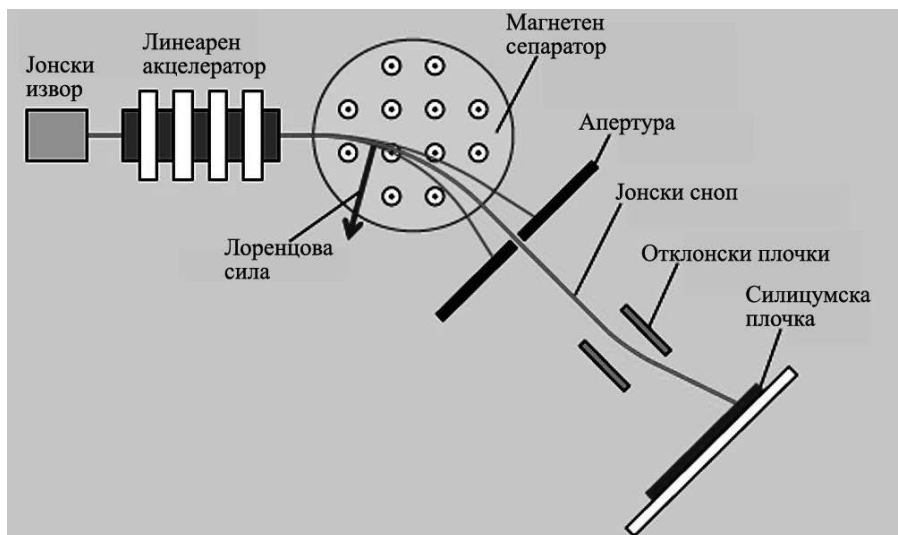
Најчесто во процесот на допингување со дифузија се применува структуриран оксиден слој како маска, бидејќи тој е стабилен на високи температури. Допантите ќе навлезат во силициумот само низ „прозорците“ каде нема силициум диоксид (слика 4.5.a). Дифузијата на допантите зависи од градиент на концентрација на допантот во силициумот и надвор од него, притоа концентрацијата е C ($z = 0$) на површината на силициумот, а се намалува со зголемување на длабочина z и времето t (слика 4.5.b). Бидејќи се работи за термичка дифузија, допантите се шират во сите правци, притоа примесните атоми



Слика 4.5. Допинг на силициум преку дифузија: а) распоред на структурата при дифузија на допантот и б) профили на допингување со дифузија.

дифундираат и под оксидот за маскирање, а дифузијата се вика изотропна или надворешна дифузија. На тој начин, се врши поместување на работ на допингуваниот силициум странично и во длабочина. Меѓутоа, при повторна термичка оксидација на силициумската плочка, допингуваниот силициум се претвора во силициум диоксид, а допантите дифундираат кон површината на силициумот. На тој начин може да се изгуби допингуваниот слој на силициум. Тоа е во случај кога се прави маска од силициум диоксид, која е потребна за добивање на различни структури врз силициумската плочка.

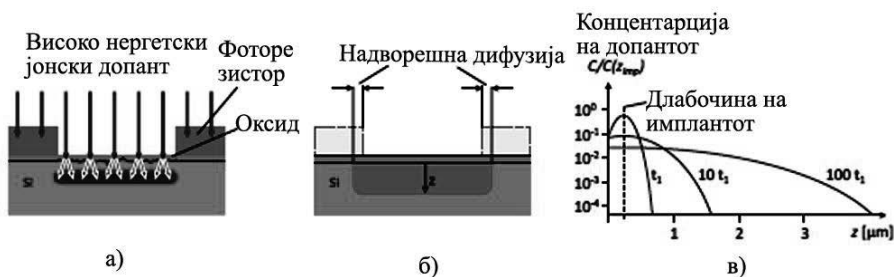
За таа цел, допингувањето се прави со јонска имплантација која овозможува надминување на проблемите со дифузија, за добивање на структури врз силициумот. Имено, допантот е во форма на јонизирани честички кои се забрзуваат до голема брзина во електрично поле и со нив се бомбардира монокристалната силициумска плочка. За таа цел, се користи јонски извор на допант кој се забрзува со линеарен акцелератор и навлегува во магнетно поле, чија насока е нормална на насоката на движење на честичките (слика 4.6). Позитивно наелектризираните јони под дејство на Лоренцовата сила се движат по кружни траектории чиј радиус е функција на масата на честичките. Во зависност од енергијата на јоните ќе зависи патеката на јоните. Низ апертурата (пукнатината) ќе поминат јоните кои имаат иста енергија и го сочинуваат јонскиот сноп. Отклонувањето на јонскиот сноп се прави со помош на две отклонски плочки, меѓу кои има електрично поле. Кинетичката енергија на јони предизвикува тие да навлезат во внатрешноста на силициумската плочка, при собна температура. Јоните се судираат со силициумските атоми, при што тие се забавуваат. Длабочината на навлегување на јоните во силициумската плочка ќе зависи од енергијата на јоните, т.е. од напонот на линеарниот акцелератор. Во овој случај, фоторезистор



Слика 4.6. Шематски приказ на допингување со имплантација на јони.

може да се користи како директна маска, за селективно допингување. За заштита на површината на силициумската плочка се нанесува тенок оксиден слој, што ги рефлектира јоните, а со тоа спречува допингување на непотребни места (слика 4.7.а).

При бомбардирањето со честичките, површината на силициумот малку се оштетува. Затоа, по отстранувањето на фоторезисторот (слика 4.7.б), силициумската плочка се загрева во температурен опсег на 800 – 1000 °C, со цел на интеграција на примесните атоми во кристалот од силициум. Ваквиот процес се вика процес на калење. На тој начин, допантите се активираат електрично во силициумска плочка, што доведува до промена на видот на спроводливоста и големината на специфичниот отпор на плочката. Во процесот на калење се случува и надворешна дифузија, која е занемарлива во однос на термалната дифузија. Имплантацијата е доста изразена при допингување на мала длабочина од површината на силициумската плочка (слика 4.7.в). При



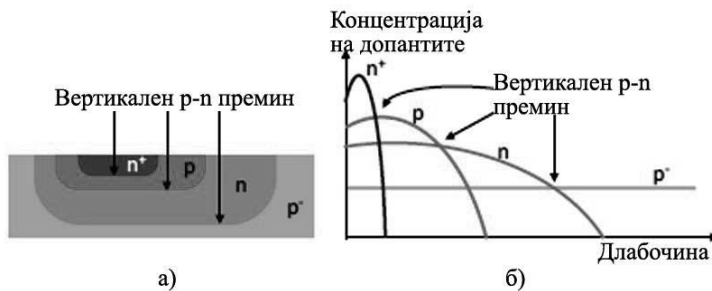
Слика 4.7. Допинг со имплантација на јони: шематски приказ на дифузија со имплантација, б) отстранувањето на фоторезисторот и профил на допингот во кристалот и в) профили на допингувањето за три различни времиња на допингување.

допингување со имплантација, секоја силициумска плочка се третира индивидуално, при што потребно е термализација на висока температура, за кратко време. Силициумските плочки допингувани со методот на имплантација овозможуваат добивање добри полупроводници, со точност од 5 % на допингување, намалување на нивните димензии и извршување на повеќекратна дифузија, без оштетување на претходните слоеви.

4.4. Вертикален р-п премин и MOS-FET транзистор

При процесите на допингување се применува дифузијата и имплантацијата кои создаваат нехомогено допингување, притоа концентрацијата на допантот се намалува со зголемување на длабочината. Од сликите 4.5 и слика 4.7 се гледа дека допингуваните региони се хомогени, при што границите на регионите се местата каде што носителите на полнеж се менуваат. Во случај на две соседни р и п допингувани области, тогаш границата помеѓу нив го означува р-п преминот. Концентрацијата на акцепторите и донорите е во рамнотежа на границата на р-п преминот.

Во случај на транзистор, тој има четири различни допингувани области, каде што постојат три р-п премини (слика 4.8). Од сликата се гледа дека кривите на концентрација на носителите означуваат континуирани премини, помеѓу n-тип и p-тип полупроводниците. Додека пак, кривата што ја дава концентрацијата на носителите на

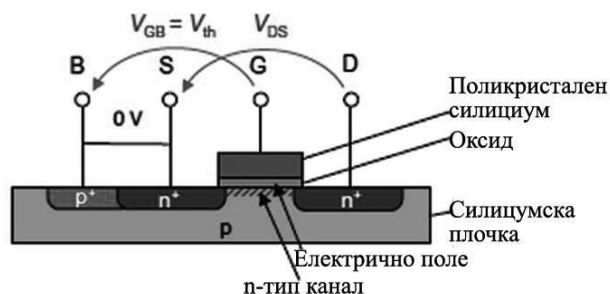


Слика 4.8. Вертикални р-п премини: а) шематски приказ и б) премини направени со повеќе селективни чекори на допингување.

полупроводникот p^+ типот е константа, бидејќи силициумска плочка претходно е хомогено допингувана со голема концентрација на шуплини. Од кривите се гледа дека допантите се акумулираат на силициумската плочка неповратно, при секое допингување. Вертикалните р-п премини можат да бидат произведени со повторно допингување, со дифузија или имплантација во самите допингувани области. Концентрацијата на

носителите мора да биде повторно компензирана од ново допингување, сè додека комплементарните допанти не станат мнозинство. За промената на n-тип на регион во p-тип регион треба концентрацијата на акцепторите да биде значително поголема од концентрацијата на донорите. Оттука, регионите кои биле подложени на повеќекратно допингување, отсекогаш се силно допингувани региони.

Друг вид транзистори е MOS-FET којшто може да биде NMOS-FET или PMOS-FET. Во случај на NMOS-FET носители на полнеж се електрони, а кај PMOS-FET носители на полнеж се шуплини. Додека пак, горниот слој на FET е направен од поликристален силициум, со спротивна спроводливост во однос на основната плочка која е монокристална силициумска плочка, и може да биде на n-тип или p-тип полупроводник. Транзистор со ефект на поле има два допингувани региона, извор и понор на одредено растојание помеѓу себе и портата. Портата се состои од тенок оксиден слој, наталожен врз монокристалната силициумска плочка, а врз него се наталожува спроводна управувачка електрода, од поликристален силициум. Портата ја контролира спроводливоста помеѓу изворот и понорот, притоа се однесува како кондензатор, а управувачката електрода има спротивна спроводливост во однос на силициумската плочка. Ако портата не е приклучена на извор на напон, тогаш барем еден од премините помеѓу изворот и понорот е поларизиран во инверзна насока (слика 4.9). Во тој случај низ транзисторот не тече струја. Додека пак, ако на портата се донесе позитивен напон, тогаш по пат на електростатска индукција горната површина на силициумската плочка ќе се наелектризира негативно. Во NMOS-FET транзистор со зголемување на напонот V_{GB} расте електричното поле, во моментот кога индуцираните електрони се побројни од шуплините, тогаш тој напон се вика праг на напон V_{th} . Во тој случај, малцинските носители сега се мнозински носители и обратно. Горната површина од силициумската плочка, т.е. граничниот слој станува n-тип полупроводник, притоа се јавува спроводливост помеѓу изворот и понорот, и се вика канал на транзисторот. Оттука, ако се донесе позитивниот напон помеѓу изворот (S) и понорот (D), низ каналот



Слика 4.9. Шематски приказ на NMOS транзистор со ефект на поле.

кој е создаден од електрони потекува струја, а со тоа протекува струја и низ транзисторот. Во овој случај, спроводливоста на каналот ќе зависи од напонот на портата. Доколку оксидот е потенок, толку ќе биде потребен помал напон на портата за да се создаде силно електрично поле. Исто така, со намалување на дебелината на оксидот на портата се намалува и нивото на допингување на управувачката електрода.

4.5. Хомоепитаксија и хетероепитаксија

Монокристалниот силициум може да биде и во форма на тенок филм, којшто е нанесен врз монокристална силициумска плочка. Процесот на таложeње на монокристален тенок слој може да биде со различни методи врз дадена подлога и се вика епитаксија. Ако се наталожува врз силициумска плочка, тогаш неговата структура ќе зависи од видот на подлогата, дали нејзината структура е монокристална или поликристална. Ако подлогата е ист материјал, тогаш ќе се наталожи монокристалниот тенок слој и се вика хомоепитаксија. Додека хетероепитаксија е растење на монокристален тенок слој од друг материјал, во однос на подлогата.

Во случај на хомоепитаксија, силициумските атоми се таложат на монокристалната силициумска површина, притоа тие ја следат атомската структура на монокристалната силициумска плочка. Наталожените монокристални слоеви се допингуваат со различни примеси, притоа се разликува од допантот на силициумската плочка. На тој начин можат да се направат „остри“ вертикални p-n премини на целата површина на силициумската плочка. Вградените допингувани слоеви може да бидат и одделно допингувани.

Така, на пример, ако силициумската плочка е p-тип полупроводник и врз неа треба да се наталожи n-тип монокристален (епитаксијален) слој. За таа цел, се применува методата на имплантација на јони или дифузија, при што се употребува степенесто таложeње. За донори се употребуваат арсен или антимон, бидејќи кај овие елементи страничната дифузија е многу помала во однос на фосфорот. После тоа, слоевите се термализираат на високи температури за да биде ефикасно допингувањето.

Во интегрални кола (IC) дебелината на епитаксијалните слоеви е неколку микрометри, што е околу 1 – 2 % во однос на дебелината на монокристалната силициумска плочка. Во почетокот на производство на интегралните кола не се применуваше епитаксијално растење на слоеви, туку уредите кои се во непосредна близина беа само електрично изолирани на површината со оксид, а под површината со инверзно

поларизирани p–n контакти. Меѓутоа, со минијатуризацијата на уредите, технологија на епитаксија се примени со цел да се зголеми густината на уредите во интегралното коло.

Техниката на електрична изолација со помош на оксид има предност во однос на техниката на изолација врз база на инверзно поларизирани p–n контакти, поради помалиот број дефекти во структурата. Во зависност од процесот на добивање на полупроводник, длабочината на изолацијата во форма на процеп (или бариера) е од редот на неколку стотици нанометри (CMOS логички кола) до неколку микрометри (BCD кола во автомобилската електроника). Постојат два главни типа процепи: процеп за плитка изолација и процеп за длабока изолација. Техниките за изолација со помош на процеп се применуваат за спречување на страничната дифузија, во процесот на добивање на структурни слоеви. За целосно електрично изолирање на уредот, треба тој да биде опкружен од сите страни со изолационен материјал.

Додека пак, при хетероепитаксијата, материјалот, структурата на слојот што треба да се наталожи, се разликува од структурата на монокристалната силициумска плочка. Обично, монокристален силициумски тенок слој се наталожува на плочка којашто е оксиден материјал, којшто може да биде со аморфна структура или поликристална структура. Во тој случај, на аморфна структура или поликристална структура на супстратот, тогаш наталожениот слој од силициум ќе биде составен од мали кристали со различна ориентација – поликристален силициум. Малите кристали во поликристалниот силициумски филм се викаат зрна, притоа таложењето на поликристален силициум е карактеристично за хетероепитаксија. Големината на зрната е неколку стотина нанометри и зависи од параметрите на таложење. На границите на зрната се јавува прекин на кристалните решетки и разлика во ориентација на зрната, што доведува до протекување на струјата на границите на зрната. Поради тоа поликристалниот силициум не е погоден за p–n премини. Сепак, поликристалниот силициум се користи како контролна електрода во транзистори со ефект на поле (порта), омски отпорници и електрода за кондензаторите. Полисилициумот може да биде структурен елемент којшто се добива со фотолитографија и нагризување. Врз поликристалниот силициум се наталожува метализираниот слој.

Покрај тоа, поликристалниот силициум служи како електричен вод бидејќи неговата спроводливост е слична на металните водови, при негово силно допингување. Меѓутоа, поврзувањето на уредите со поликристален силициум како електричен вод може да се направи, кога тие се во непосредна близина и кога течат мали струи. Треба да се има во обзир дека користењето на полисилициум како електричен вод може да доведе до пад на напонот на самиот вод.

4.6. Метализација на структурните елементи врз силициумска плочка

По формирањето на уредите, тие мора да бидат електрично поврзани за да се изгради електричното коло. За таа цел, наизменично се редат оксидни слоеви за електрична изолација и метални слоеви, за меѓусебна врска на водови на елементите. Исто така, металните водови ги поврзуваат слоевите помеѓу себе и структурните елементи, во рамките на еден слој.

Затоа, за секој слој на метализација треба да се дизајнираат два слоја, притоа првиот слој е за дефинирање на контактот низ оксиден слој и вториот слој за дефинирање на распоредот на електричните водови, над оксидниот слој. Ваквиот начин на структурирање на слоевите и нивно поврзување со метални водови се вика рутирање.

Во интегралните кола потребни се многу слоеви за метализација за да се поврзат различни структури во една заедничка мрежа на уреди. Добивањето на структурните елементи и уреди во интегралното коло зависи од производителот, а за воспоставување на металните водови е стандардизирано за сите интегрални кола (слика 4.10). Обично метал-



Слика 4.10. Шематски приказ на рутите на метализација.

ните слоеви се подредени од дното кон врвот на интегралното коло. Исто така, металниот вод кој служи за поврзување на два соседни метални слоеви помеѓу себе, се вика чивија. Од друга страна, металните водови кои прават електрични контакти помеѓу првиот метален слој и површината на силициумот, т.е. елементите, се викаат контакти. Оттука, рутата на металниот вод зависи од двата соседни слоја. Од слика 4.10. се гледа дека рутите на пар од слоевите се следните: контакт + метал-1, чивија-1 + метал-2 итн.

Материјалот за таложење на металните слоеви и структурите треба да се добива (наталожи) со едноставни методи, и да има атхезија кон оксидот. За таа цел, материјалот треба да ги исполнува следниве услови:

- голема електрична спроводливост,
- голема густина на струја,
- добар електричен контакт со силициум,
- добар електричен контакт со околината (за електрично поврзување на чипот со матичната плоча),
- отпорност на корозија и механичка стабилност и
- можност за повеќеслојно рутирање.

Според физичките карактеристики на металите, алуминиум најмногу одговара за метализација. Покрај тоа, се додаваат примеси од силициум и бакар во алуминиум, при што се добива легурата AlSiCu која има добри карактеристики и била користена како материјал за метализација подолго време. Со минитуризација на уредите во интегралното коло, се намалуваат и димензиите на водовите од алуминиум, што доведува до појава на паразитскиот отпор. Затоа, алуминиумот беше заменет со бакар кој има мал специфичен отпор. Тоа овозможува водовите помеѓу структурите на интегралното коло и другите електронски уреди да бидат пократки и потенки. Намалување на пресекот на бакарните водови придонесува за намалување на паразитскиот капацитет, што е особено важно за аналогните и дигиталните кола.

Меѓута, бакарот има својство да се оксидира во воздух, а посебно при загревање, што не е случај со алуминиумот. Затоа, бакарот мора да се заштити од дифузија и оксидација со соодветни заштитни слоеви. Покрај тоа, новите техники на структурирање на уредите се развиваат, при што при сувото нагризување на бакарот има тешкотии. Промената на алуминиумските водови со бакарни водови е направено кога водовите со дебелина од 350 nm се намалија на 90 nm. Меѓутоа, двата материјала се употребуваат за метализација. Имено, горниот слој за метализација во интегралните кола се прави во форма дебел бакарен слој. На тој начин се поврзуваат сите структурни елементи, при што течат големи струи (од редот на ампери), додека металните слоеви на дното на уредот или интегралното коло се изработени во алуминиум.

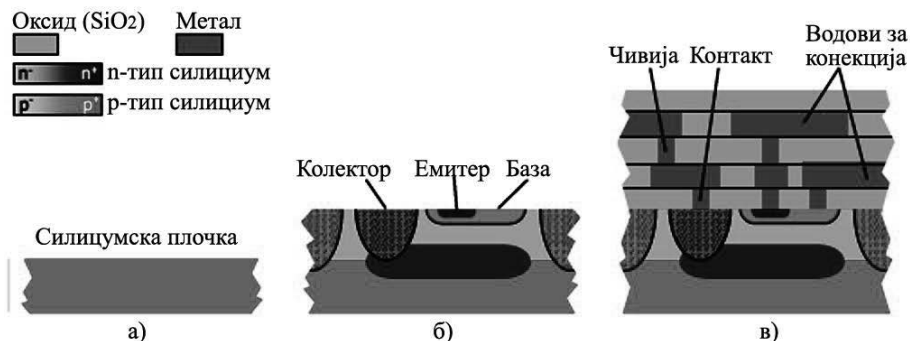
4.7. Технологија на полупроводнички интегрирани уреди

Интегрираните уреди се добиваат со sukcesивно допингување на силициумската плочка, на различни начини. Допингувањето може да се направи наизменично со различни примеси (донатори и акцептори), различни концентрации, различна длабочина на допингување и место на допингување. Уредите добиени во интегрирана техника може да се произведат со употреба на едноставни процеси на допингување, помалку од 10 постапки на допингување. Додека, во покомплексните уреди треба да се спроведат повеќе од 20 постапки на допингување. Начесто се наталожува дополнителен монокристален слој врз монокристална силициумска плочка којшто е допингуван со примесни атоми, а самиот процес се вика епитаксија.

Различни видови електронски уреди, како што се транзистори, диоди и отпорници, можат да се создадат на монокристална силициумска плочка, со допингување на различни области. Кога станува збор за уреди на интегрални кола, се мисли на различни делови на монолитен полупроводнички уред. За разлика од уредите кои се поставуваат на плоча од каширан пертинакс, т.е. на печатено коло (PCB), уредите во интегралното коло не се електрично изолирани едни од други. Тоа може да предизвика интеракција на уредите во интегралното коло.

Еден уред којшто е сместен на интегрално коло, е даден на слика 4.11. Дебелината на монокристалната силициумска плочка е помала од 1 mm, притоа допингуваните области и електричните водови се сместени во многу тенок слој на едната површина, од двете површини на интегралното коло. Активната површина на уредот е приближно 1 до 2 % во однос на дебелината на силициумската плочка.

Производството на електронските уреди започнува со повеќе постапки на допингување на монокристалната силициумска плочка. Најпрво плочката силно се допингува со донори, притоа се создава n^+ -тип полупроводник којшто има голема спроводливост, а потоа концентрацијата на донорите се намалува, така што се добива n -тип полупроводник. Потоа се допингува со акцептори, при што материјалот станува p -тип полупроводник. Потоа повторно се допингува со донорски примеси. На крајот се прави метализација на уредот, т.е. биполарниот NPN транзистор (слика 4.11). Во текот на сите постапки на допингување се применува фотолитографија каде што маската е ред на големина од неколку нанометри. На ист начин се постапува и при воспоставување на водовите за поврзување на уредите. Словите за изолација и метални слоеви наизменично се наредени еден врз друг и структурирани во задниот дел од уредот. Сите региони од површината на силициумот се електрично поврзани со контакти, со металните водови во интегралното коло. Помеѓу двата изолаторски слоја се



Слика 4.11. Шематски приказ на интегрално коло IC со област каде има NPN транзистор: а) на почетокот на процесот, б) создадени NPN полупроводници и в) по последната фаза на производството со водовите за конекција.

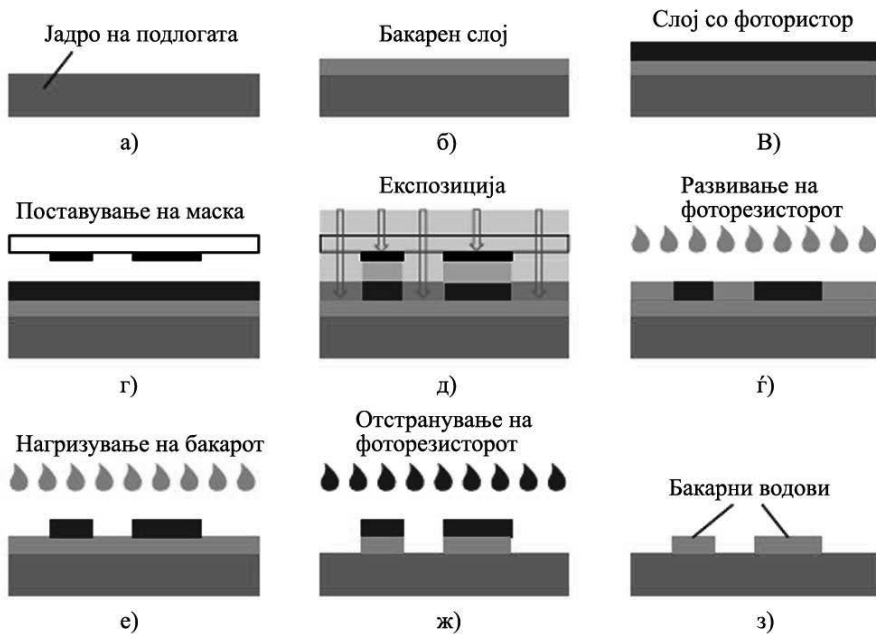
поврзуваат металните водови со чивија, којашто претставува краток метален вод. На сличен начин се прават и други транзистори, диоди, отпорници и диоди, притоа металните водови служат за нивно поврзување.

4.8. Технологија на печатени плочки

Технологија на печатено коло (PCB) е најшироко користена постапка за пакување на електронски уреди како што се: диоди, транзистори, отпорници, кондензатори, интегрални кола и друго. На едната страна, таа обезбедува механичка цврстина и електрично поврзување на електронските уреди, преку нивно залемување на печатено коло. Основа на печатената плоча е електрично изолирана плоча, т.н. јадро на подлогата која е изработена од епоксидна смола, зајакнета со стаклени влакна (компонентен материјал). Од едната или од двете страни се поставени две тенки метални плочи, на кои треба да бидат направени водовите за електрично поврзување на електронските уреди.

За метална плоча се користи бакар со дебелина 35 μm , бидејќи е одличен електричен спроводник. Исто така, бакарот може да се нагизува со цел да се направат водови на кои лесно ќе се залемат уредите (или елементите) и ќе се направи поврзување на повеќе уреди со помош на бакарните водови. Јадрото на подлогата се вика уште и носач на подлогата, бидејќи ги држи електронските уреди и водовите за меѓусебно поврзување (слика 4.12). За таа цел, на плочата од каширан пертинакс се поставува фоторезистор-негатив со помош на ламинатор на температура од 90 $^{\circ}\text{C}$ до 100 $^{\circ}\text{C}$. При осветлување на фоторезистор-

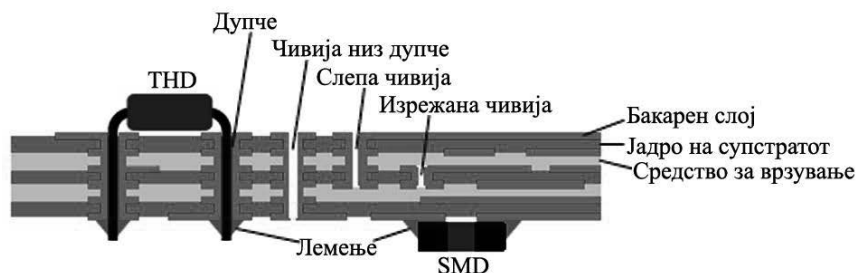
негатив со ултравиолетова светлина тој не се раствора во развивач. Во следниот чекор се прави маска на компјутер со соодветен софтвер или се прави шема на водовите со пенкало на бел лист хартија, се фотографира со мобилен и се дотерува сликата со софтверот Adobe Photoshop. За фоторезистор-негатив треба маската да биде инверзија на нацртаните водови, т.е. тие треба да бидат просирни. Маската се поставува на просирна стаклена плоча, притоа се гледа шемата на водовите за поврзување на уредите помеѓу себе, изворот на напојување, масата, како и уредите за извршување. Маската се поставува на долната страна на стаклото во однос на изворот на светлина. Потоа стаклото со



Слика 4.12. Шематски приказ на на постапки врз печатени плочки: а) јадро на подлогата, б) бакарен слој, в) слој од фоторезистор, г) маска, д) експозиција, ф) развивање на фоторезисторот, е) нагризување, ж) отстранување на фоторезисторот и з) бакарни водови.

маската се поставува врз кашираниот пертинакс со фоторезистор и се осветлува со ултравиолетова светлина. Потоа, кашираниот пертинакс со фоторезисторот се потопува во развивач којшто е 1,25 % воден раствор на натриум карбонат монохидрат ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и е соодветен за даден фоторезистор. Во овој случај, за фоторезистор-негатив темните региони се раствораат во развивачот и лесно се отстрануваат од плочката, од кашираниот пертинакс. Додека на осветлените региони се задржува фоторезисторот, кој ќе го штити слојот на бакар од нагризување во следниот чекор. За нагризување на бакарот може да се користи воден раствор на фери хлорид хексахидрат (40 % $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) или воден

раствор од хлороводородна киселина и водороден пероксид (30 ml 9,5 M на HCl, 10 ml 34 M на H₂O₂ и 100 ml на H₂O). По нагризувањето, плочката се става во развивач од 1,45 % воден раствор на натрум хидроксид за да се отстрани преостанатиот фоторезистор. На крајот остануваат бакарните водови, според сликата на маската. За поставување на електронските уреди на печатената плоча се прават дупчиња, каде што ќе се сместат нозете на електронските уреди. Откако ќе се постават електронските уреди во дупчињата, се пристапува кон залемување коешто се состои од топење на калај на местото каде што се поставени електронските уреди. Уредите се свртени со своите ножиња кон бакарните водови, притоа тие се поврзуваат со печатеното коло со залемување. Процесот на залемување се состои од топење на калај на местото каде што се поставени електронските уреди и поврзување со печатеното коло, со правење на легура со бакарната плоча, при изладување на калајот. Всушност, зацврстувањето на уредите и електричниот контакт со печатената плоча се прави со залемување.



Слика 4.13. Пресек на повеќеслојна печатена плоча со шест слоеви на рутирање.

Плочите може да се направени од неколку јадра, како подлоги за електронските уреди и се викаат повеќеслојни печатени плочи. Овие плочи може да бидат составени од три јадра и шест слоеви за поставување на водови на електронските уреди, на горниот и долниот дел на секое од трите јадра. Плочите се прицврстуваат со лепак којшто претставува електричен изолатор помеѓу два соседни бакарни слоја од соседните јадра на подлогите за да се спречи краток спој. Два слоја на бакар се споени со чивија и служат за електрично поврзување на различни водови (рутирање), од различни слоеви на бакар. Чивиите се создаваат со правење на дупчиња низ слоевите, во почетокот на производствениот процес (слика 4.13). Потоа, сидот на чивијата се наталожува бакар, со цел да бидат електрично спроводливи.

За монтажа на електронските елементи се користат две различни технологии за поставување на печатената плоча:

а) технологија на поврзување на уредите, преку водови на кои има дупчиња-отвори (ТНТ) и

б) технологија на монтирање на самата површина (SMT).

Технологија на поврзување на уредите, преку дупчиња (THT) се користи за уредите кои треба да воспостават електричен контакт преку водовите на печатената плоча. Имено, тие се вметнуваат во отвори, во кои веќе има чивии или истите се залемуваат на тоа место (слика 4.13 – THT). Додека пак, со технологија на монтирање на самата површина (SMT), уредите имаат метални нозе во форма на тенок лист (слика 4.13 – SMD), за поврзување со површината на водовите на печатената плоча.

4.9. Интегрално коло

Интегралните кола (ICs) првпат се произведени во 60-тите години на минатиот век и со тоа почна нова област во електрониката т.н. микроелектроника. На тој начин се придонесе за минитуризација на полупроводничките уреди, нивна голема концентрација и стабилност на интегралното коло. Во 1961 година било направено првото интегрално коло коешто се продавало на пазар и претставувало логички мемориски елемент, составено од четири транзистори и пет отпорници. Со тек на времето, се намалуваат димензиите на уредите, внатре во интегралното коло, потрошувачката на енергија се намалила и се воведени нови функции кои треба да ги извршуваат интегралните кола. Како резултат на тоа, настана голем напредок во електрониката и нивна примена во секојдневниот живот. Така, на пример, ако применетата електроника во модерниот мобилен телефон се изрази во дискретни (индивидуални) електронски компоненти кои ќе бидат поставени на плоча за печатени кола (PCB), тогаш ќе ни треба површина колку една куќа за да се постават уредите. Ваков уред ќе биде бескорисен поради неговите димензии, а неговата работа ќе биде несигурна.

Во последно време интегралните кола се сложени, бидејќи содржат дигитални и аналогни кола. Првите интегрални кола биле направени од аналогни кола каде што вредноста на измерената величина се менува континуирано, без разлика дали се менува периодично или е константа. Во некои електронски системи има потреба од аналогно процесирање на електричните сигнали, обично изразени во напон и струја. Така, на пример, податоците што се примаат од различни сензори се главно аналогни сигнали, во форма на напон или струја и со помош на интегрално коло се носи на влезот на екрани, звучници, грејачи, електромотори, вентили и друго. За таа цел, се користи CMOS (комплементарни метал оксид и силициум) технологијата, која се состои од два комплементарни n-тип и p-тип еднополарни транзистори со слоеви од метал и оксид. Покрај тоа, во аналогните уреди се

применуваат биполарни транзистори кои се карактеризираат со големи работни напони, робустност (габарит) и температурна зависност на нивните карактеристики. Типичен пример за примена на биполарен транзистор е неговата примена во електронски стабилизатор на напон, каде што течат големи струи, а стабилизацијата на напонот се одвива непрекинато со тек на времето.

Друг вид се дигиталните интегрални кола, каде што сигналите се во форма на бинарни сигнали, со само две различни вредности, 1 или 0. Вредноста 1 (еден) одговара на праг на напонот над која интегралното коло ќе ја чита вредноста и врши различни операции. Додека вредноста 0 (нула) на електричниот сигнал, најчесто изразен во волти, нема да предизвика дејство на интегралното коло. Овие состојби на електричниот сигнал зависат и од времето кое е потребно за да има измерената величина одредена големина. Затоа, дигиталните кола најчесто се опремени со уред т.н. часовник, којшто ќе го одреди времето на дејство на интегралното коло, при што ќе изврши одредена операција на дигиталниот сигнал. За таа цел, во дигиталните интегрални кола се користат униполарни транзистори CMOS кои можат да ги задоволат овие барања.

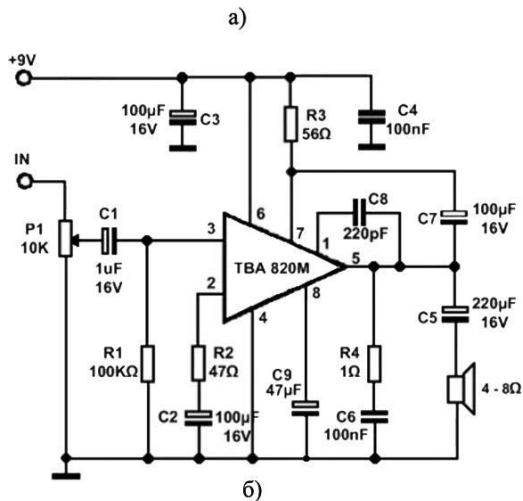
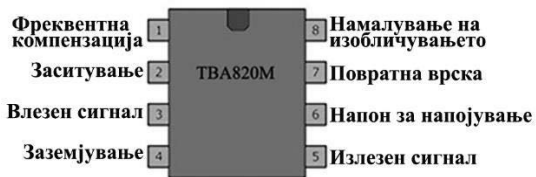
Современите интегрални кола (ICs) во дигиталната електроника се во форма на процесори или микроконтролори, кои интегрираат бројни јадра и периферни уреди и се сместени директно на самото интегрално коло. Овие интегрални кола (чипови) во дигиталната електроника можат да содржат повеќе од десет милијарди транзистори (2020 година). Така, на пример, во 2014 година е произведен процесор Intel® i7 Haswell-E за компјутер, каде што димензиите на структурните уреди во интегралното коло се 22 nm и има површина од 355 mm². За споредба комплексноста на овие уреди е таква што големина од 2 cm² е како да се набљудува еден град со софтверот карта (maps), во којшто има улици (водови), згради (цели електронски уреди од транзистори, диоди, отпорници) и друго. Во денешно време постои висок степен на интеграција, каде што во интегралното коло се присутни дигитални и аналогни уреди. Всушност, сигналите се мешавина од дигитални и аналогни сигнали, така што современите интегрални кола се изработени во CMOS, BiCMOS (биполарни транзистори и CMOS) and BCD (биполарни транзистори, CMOS и DMOS) технологија. Ознаката DMOS се однесува за двоен дифузен силициумски транзистор со метал и оксид, каде што се користат униполарни транзистори кои работат на големи струи. Во случај кога во интегралното коло се вклучени и транзистори со голема моќност, тогаш тоа се вика паметно интегрално коло. Всушност во паметното интегрално коло може да има интегрирано повеќе електронски склопови, како што се: аналогни кола за сензори, внатрешен извор на стабилен напон, контролна единица за извршување на операции, единица

дигитално процесирање и други. Овие паметни интегрални кола во *BCD* технологија се со резолуција од 130 nm на електронските структурни елементи, со површина од 34 mm², и содржат 164000 уреди во склоповите на аналогни кола и 3 милиони транзистори во склоповите на дигитални кола. Напонот на напојување на овие интегрални кола е 14 V, а пробивниот напон на структурните уреди во чипот е 60 V.

4.10. Аудиозасилувач со интегрално коло TBA820M

За да се види едноставноста на изведбата на некој сложен уред со интегрално коло и совршеноста на интегралното коло, ќе се направи аудиозасилувач во интегрирана техника. За таа цел, ќе користиме интегрално коло TBA820M, кондензатори и отпорници (слика 4.14). TBA820M е монокитен интегриран аудиозасилувач во пластично пакување со 8 нозе. Читањето на распоредот на нозете е во насока обратна од насоката на часовникот. На врвот на интегралното коло има забец, со цел да се одреди распоредот на нозете. Тој е засилувач на моќноста во класа B и е наменет за засилување на електрични сигнали на ниска фреквенција.

Главни карактеристики на интегралното коло се: минимален работен напон на напојување од 3V, мала струја на мирување, мал број надворешни компоненти, нема изобличување на сигналите и мала загуба на моќноста. Излезната моќност на интегралното коло зависи од напонот за напојување и омскиот отпор на звучникот, така што моќноста е $P_o=2\text{ W}$ при 12 V и 8 Ω ; 1,6 W при 9 V и 4 Ω , и 1,2 W при 9 V и 8 Ω . Интегралното коло TBA820M служи за засилување на аудиосигнали од грамофонски претворач, радио или од мобилен телефон, притоа излезот од овие уреди се сврзува со влезот на засилувачот.



Слика 4.14. Интегралното коло TBA820M: а) шематски приказ на интегралното коло и б) аудиозасилувач со интегралното коло.

За менување на интензитетот на влезниот сигнал се користи потенциометар P_1 , со цел да се менува големината на влезниот сигнал. Електролитскиот кондензатор C_1 служи за донесување сигнал на влезот на интегралното коло, притоа правиот напон нема да помине. На ногичката (електричниот вод) 3 се поврзува отпорникот R_1 којшто го одредува и влезниот импеданс на засилувачот. Покрај тоа, отпорникот R_1 треба да биде голем за да не се оптовари изворот на сигнал. На електричниот вод 3 е вредноста на наизменичниот влезен напон во интегралното коло, и би требало да биде иста со вредноста на наизменичниот напон пред потенциометар P_1 . Степенот на засилување и фреквентната карактеристика на засилувачот ќе зависи од вредноста на кондензаторот C_2 и отпорникот R_2 . На електричниот вод 5 е поврзан отпорникот R_4 и кондензаторот C_6 , кои придонесуваат за одведување на вишите хармоници од засилувањето на маса, со што се добива добра фреквентна карактеристика на засилувањето. Кондензаторот C_8 обезбедува фреквентна компензација на излезниот сигнал со засилувањето, преку повратна врска се обезбедува константно засилување на широк опсег на фреквенции. Исто така, кондензаторот C_7 обезбедува за стабилна работа на засилувачот, преку повратна врска на излезниот сигнал со засилувањето. Додека пак, кондензаторот C_9 го намалува изобличувањето на излезниот сигнал, т.е. сигналите со голема амплитуда ги намалува, што е нужно за стабилна работа на засилувачот. За да се спречи течењето на права струја низ звучникот, истиот се спојува преку кондензаторот C_5 . Покрај тоа, овој кондензатор спречува краток спој на излезот на интегралното коло, за правата струја. Отпорникот R_3 и кондензаторот C_6 служат за одведување на вишите хармоници од засилувањето на маса, со што се добива добра фреквентна карактеристика на засилувањето.

Најпрво се испитува големината и исправноста на отпорниците, кондензаторите и потенциометарот со универзален инструмент. Потоа се прави шема на засилувачот на лист хартија, според големината на плочката од каширан пертинакс. Треба да се внимава за распоредот на нозете на интегралното коло, бидејќи се поставува од спротивната страна на бакарните водови на печатената плочка. Откако ќе се провери на лист хартија дека сите елементи можат да се постават на плочката од каширан пертинакс, се пристапува кон изработка на печатената плочка, со методата на фотолитографија. Може нацртаната слика на бел лист хартија да се фотографира со мобилен телефон и да се пренесе на компјутер. Исто така, може шемата за водовите на печатената плочка да се нацрта со програмот Adobe Photoshop или со софтвер за шема на печатена плочка, на пример Eagle. Покрај тоа, сликата од мобилниот телефон може да се доработи со програмот Adobe Photoshop, да се зголеми или намали дебелината на водовите, или водовите да бидат со

црна боја или безбојни. Во зависност од изборот на фоторезисторот, дали е позитив или негатив, ќе зависи сликата што треба да се пренесе со помош на ласерски принтер. Ние ќе користиме фоторезистор-негатив, во форма на фолија со три слоја. Бидејќи фоторезисторот е негатив, водовите на сликата треба да бидат безбојни, а сите други региони на сликата треба да бидат со црна боја. Тоа лесно се постигнува со избирање алатката волшебно стапче, во софтверот Adobe Photoshop. Со кликање со волшебно стапче на водовите, при притиснато копче *поместување* (shift) на компјутерот, се избира опцијата *уредување* (edit), потоа *обојување* (fill) и на крајот се избира опцијата *бела боја* (white). Потоа се избира опцијата *избери* (select) и алатката *инверзија* (Inverse). Со поместување на курсорот кон алатката правоаголник и негово кликање, се добива конечната слика. Големината на сликата се контролира со алатката *слика* (Image) и опцијата големина на сликата (Image size). Добиената слика се печати на термофолија или друга просирна фолија и ќе биде маска, во методата фотолитографија. Маската се поставува на стаклена плоча, притоа се внимава на распоредот на нозете на интегралното коло, поради огледалната слика од печатачот.

Понатаму фоторезисторот треба да се залепи на бакарната плоча. За таа цел, со помош на две самолепливи ленти (селотејп) се отстранува безбојната заштитна фолија. Потоа фолијата се поставува на плочката од каширан пертинакс и се свртува од страната каде беше извадена заштитната фолија на фоторезисторот, кон страната каде што е бакарот. Фоторезисторот на едниот раб од плочката се притиска и се свиткува кон другата страна на плочката. Плочката со каширан пертинакс и фоторезистор се става во ламинатор, којшто е загреан на температура од 90 °C. Плочката се движи со 0,5 cm во секунда и тоа се повторува неколку пати. Потоа се поставува маската врз плочката со фоторезистор и се осветлува со извор на ултравиолетова светлина, поставен на растојание од 25 cm, за време од 15 min. Потоа се вади маската и повторно се поставуваат две самолепливи ленти на фоторезисторот. На тој начин се отстранува втората заштитна просирна фолија на фоторезисторот. Потоа фоторезисторот се развива во растворувач, каде што осветлените региони од фоторезисторот ќе останат на плочката. Развивачот е 1,25 % воден раствор од натриум карбонат монохидрат ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), или во тежински размер 1 : 80 во однос на водата. Потоа плочката се измива со вода и се пристапува кон нагризување на бакарната плоча, опишана во поглавје 4.8 (Технологија на печатени плочки). Плочката повторно се измива со вода и се отстранува фоторезисторот со 1,45 % раствор на NaOH, или во тежински размер 1 : 70 во однос на водата. За да постават елементите на засилувачот треба да се постават на печатената плоча со правење на дучиња, со помош на

бургија од 1 mm. Елементите се залемуваат со леткум и калај, а како средство за залемување се користи калафониум.

По залемувањето се донесува 12 V напон, од извор на прав напон, се поставуваат две жици за влезниот сигнал и две жици за излезниот сигнал. Наместо звучник со отпор од 8Ω , се поставува реостат којшто може да има променлив отпор. На крајот засилувачот се тестира, со испитување на неговата амплитудна и фреквентна карактеристика. Амплитудната карактеристика се прави со промена на влезниот синусен напон од 5 mV до 150 mV, при фреквенција од 1 kHz. За секој напон се отчитува излезниот напон, притоа се одредува коефициентот на напонско засилување, со формулата $A_v = V_{iz} / V_{vl}$. Графички се прикажува зависноста на коефициентот на напонско засилување од влезниот напон V_{vl} . Исто така, се прави испитување на фреквентната карактеристика, со промена на фреквенцијата од 20 Hz до 20 KHz, при влезниот напон $V_{vl}=10$ mV. За секоја фреквенција се отчитува излезниот напон, притоа се одредува коефициентот на напонско засилување, со формулата $A_v = V_{iz} / V_{vl}$. Графички се прикажува зависноста на коефициентот на напонско засилување од фреквенцијата на влезниот сигнал.

5. ЕЛЕКТРОНСКИ КОЛА НА ОПЕРАЦИСКИ ЗАСИЛУВАЧИ

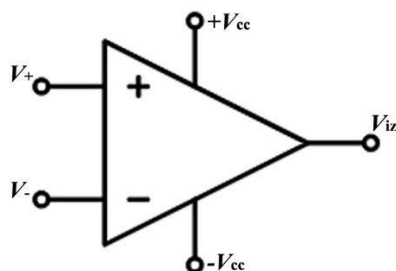
Со развојот на биполарно интегрирано коло беше направен операцискиот засилувач којшто бил откриен од страна на Карл Шварцел и применет во аналогните компјутери (Корн и Корн), со цел извршување на одредени операции. За првпат операцискиот засилувач $\mu\text{A}-709$ бил објавен во списанието „Ферчилд полупроводник“, којшто бил претпоставка за операциски засилувач за општа намена. Додека пак, класичниот операциски засилувач $\mu\text{A}-741$ бил објавен од списанието „Ферчилд“, при крајот на 1960-тите. Името го добиле од нивната способност за извршување на математички операции и решавање на диференцијални равенки. Во почетокот, пред појавата на компјутерите математичките операции собирање, одземање, интеграција и диференцијација се вршеле со еме и се дел од современите електронски уреди. операциски засилувачи. Операционите засилувачи се применуваат во денешно време, и се дел од современите електронски уреди.

5.1. Вовед во операциски засилувач

Операцискиот засилувач е интегрирано коло кое ја засилува разликата помеѓу два влезни напона и произведува единствен излез. Операцискиот засилувач е распространет во аналогната електроника и може да се смета за друг електронски уред, на ист начин како биполарниот или транзистор со ефект на поле. Терминот операциски засилувач потекнува од оригиналните примени на уредот во раните 1960-ти. Операцискиот засилувач заедно со отпорници и кондензатори, се користеше во аналогни компјутери за извршување математички операции за решавање на диференцијални и интегрални равенки. Со тек на времето, примената на операциските засилувачи значително се прошири во електрониката. Идеалниот операциски засилувач ги има следните својства: бесконечен коефициент на засилување, бесконечна влезна импеданса, бесконечен опсег на фреквенции кои се засилуваат и нулта излезна импеданса. Сите стандардни операциски засилувачи сега имаат два симетрични извора за напојување (позитивен и негативен

напон), два различни влеза (неинвертирачки и инвертирачки), а излезот е само еден (слика 5.1). Операцискиот засилувач нема електричен вод за заземјување, иако влезните и излезните напони се поврзани со заземјување, кое се остварува со заеднички електричен вод на двата извора. Обично напоните на напојување на операцискиот засилувач се $\pm 15\text{ V}$, при негова примена во електрониката, со тенденција во денешно време да се користат напони од $\pm 5\text{ V}$.

Ако се донесе напон на неинвертирачкиот влез (+), истиот ќе биде засилен A пати притоа ќе се добие засилен сигнал со иста фаза со влезниот напон. Додека пак, ако се донесе напон на инвертирачкиот влез (-), истиот ќе биде засилен A пати со спротивна фаза, т.е. сигналот е фазно поместен за 180° , во однос на влезниот напон. Влезниот отпор на двата влезе во однос на масата е бескрајно голем, така што може да се смета дека се изолирани еден од друг. Постоенето на два влезе овозможува повратна врска, притоа на едниот влез ќе се воспостави позитивна



Слика 5.1. Шематски приказ на операциски засилувач.

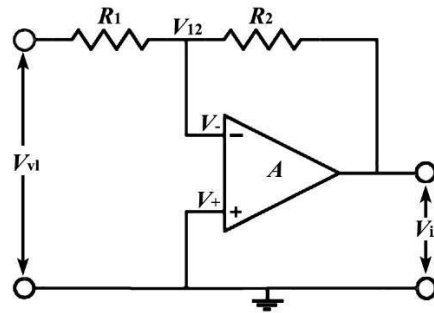
повратна врска, а на другиот влез ќе се воспостави негативна повратна врска. Во случај на негативна повратна врска, истата се остварува со приклучување на дел од излезниот напон на инвертирачкиот влез и е фазно поместен за 180° . Додека, позитивна повратна врска, дел од излезниот сигнал се враќа на неинвертирачкиот влез. Коефициентот на засилување на операцискиот засилувач има голема вредност, околу $A = 10^5$. Операцискиот засилувач се напојува со два извора на напон, притоа двата се сервиски поврзани, а средишниот електричен вод од двата извора е споен за маса. Во отсуство на влезен сигнал, излезниот напон треба да биде нула.

Идеалниот операциски засилувач врши засилување на разликата на напонот на двата влезе, дадено со равенката:

$$V_{iz} = -A(V_- - V_+) \quad (5.1.1).$$

каде што V_+ е неинвертирачкиот влезен напон (+), V_- е инвертирачкиот влезен напон (-), A е коефициент на засилување и V_{iz} е излезниот напон од операцискиот засилувач. Равенката 5.1.1. важи сè додека излезниот напон не стане споредлив со напонот на батеријата. Коефициентот на засилување A на операцискиот засилувач има бескрајно голема вредност, така што за излезниот напон има конечна вредност, при бескрајно мала вредност на разликата на напоните $V_- - V_+$. Обично при воспоставување на негативна повратна врска, операцискиот засилувач се користи како засилувач, додека при воспоставување на позитивна врска, операцискиот засилувач се користи како осцилатор.

Можни се два начина на воспоставување на негативна повратна врска. Првиот начин на воспоставување на негативна врска е со поврзување на неинвертирачкиот влез (+) на маса, што често се применува во многу уреди. Во тој случај, сигналот се донесува преку отпорникот R_1 на инвертирачкиот влез (-), а повратната врска се остварува со помош на отпорникот R_2 споен помеѓу излезот и влезот. При донесување на напон на влезот V_{vl} низ отпорникот R_1 ќе тече струја I . Бидејќи претпоставивме дека влезниот отпор (импеданс) на операцискиот засилувач е бескраен, тогаш мора да тече струја и низ отпорникот R_2 којшто е за повратна врска (слика 5.2). Всушност, отпорите R_1 и R_2 се сериски сврзани, истата струја тече низ двата отпора кон излезот. Исто така, во согласност со Кирховиот закон, струјата треба да биде континуирана, да тече преку отпорникот R_2 за остварување на повратна врска кон изворот на влезен напон V_{vl} . Струјата низ отпорникот R_2 ќе влегува или излегува од излезот на засилувачот, во зависност од состојбата на излезот, т.е. преку изворот за напојување на засилувачот ќе се враќа назад кон влезот. Бидејќи струјата што тече низ отпорите R_1 и R_2 е иста, и е дадена со равенките:



Слика 5.2. Шематски приказ на операциски засилувач со негативна повратна врска со отпорник и во инвертирачка конфигурација.

$$I = \frac{V_{vl} - V_{12}}{R_1} \text{ или } I = \frac{V_{12} - V_{lz}}{R_2} \quad (5.1.2),$$

каде што V_{12} е влезниот напон на засилувачот во однос со излезниот напон и е даден со равенката:

$$V_{lz} = -AV_{12} \quad (5.1.3),$$

Во случај да земеме дека засилувањето A се стреми кон бесконечност, тогаш влезниот напон V_{12} се стреми кон нула. Оттука се добива:

$$\frac{V_{vl}}{R_1} = \frac{-V_{lz}}{R_2} \text{ или } A_r = \frac{V_{lz}}{V_{vl}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (5.1.4),$$

Излезниот сигнал се враќа назад во влезот на операцискиот засилувач како V_{12} , со спротивна фаза на влезниот напон V_{vl} , при што $V_{12} \rightarrow 0$. Всушност, напонот на спојот помеѓу отпорите R_1 и R_2 е ист и се стреми кон нула, исто како напонот на инвертирачкиот влез (-) којшто е приземјен на нула. Бидејќи напонот $V_{12} \rightarrow 0$ на спојот помеѓу отпорите R_1 и R_2 се стреми кон нула, оваа точка се однесува како виртуелна маса. Затоа, треба $V_- - V_+ \rightarrow 0$ за да зависи засилувањето од повратната врска,

остварена со надворешните компоненти (отпорници), притоа засилувањето A не треба да зависи од засилувањето A на самиот засилувач.

Во овој случај влезниот отпор на операцискиот засилувач треба да биде намален на нула, бидејќи имаме виртуелна маса. Меѓутоа, ефективниот отпор на виртуелната маса ќе зависи од струјата што тече, дадена со равенката:

$$I_{12} = \frac{V_{12} - V_{iz}}{R_2} = \frac{V_{12}(1+A)}{R_2}, \text{ бидејќи } V_{iz} = -AV_{12} \quad (5.1.5).$$

Оттука, за отпорот на виртуелната маса, т.е. точката помеѓу отпорите R_1 и R_2 се добива:

$$R_{12} = \frac{V_{12}}{I_{12}} = \frac{V_{12} \cdot R_2}{V_{12}(1+A)} = \frac{R_2}{(1+A)} \quad (5.1.6).$$

При вредност на коефициентот на засилување околу $A = 10^5$ може да се смета дека отпорот на виртуелната маса е нула. Во тој случај, влезниот отпор на операцискиот засилувач ќе зависи од отпорникот R_1 .

Вториот начин е кога во излезот се спојуваат сериски два отпорника, притоа дел од излезниот напон се враќа на инвертирачкиот влез (слика 5.3), а влезниот напон се донесува на неинвертирачкиот влез и станува збор за неинвертирачки операциски засилувач. Отпорникот R_d го претставува влезниот отпор на операцискиот засилувач. При идеален операциски засилувач треба напонот V_d на отпорникот R_d да биде нула, така што напон $V_- = V_{vl}$. Оттука, дел од излезниот напон се враќа на влезот, со помош на делител на напон добиен со два сериски сврзани отпорника, дадено со равенките:

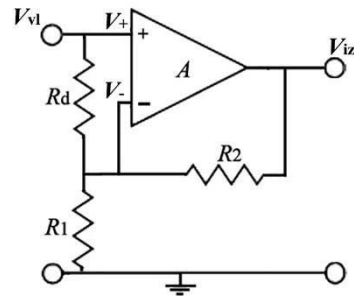
$$V_{iz} = IR_2 + V_-, \quad I = \frac{V_{iz}}{R_1 + R_2} \quad (5.1.7),$$

$$V_- = \frac{V_{iz}R_1}{R_1 + R_2} = V_{vl} \quad (5.1.8) \text{ и}$$

$$V_+ = V_{vl} \quad (5.1.9).$$

Со замена на равенката 5.1.8 и 5.1.9 во равенката 5.1.1, се добива:

$$V_{iz} = -A(V_- - V_+) = A \left(V_{vl} - \frac{V_{iz}R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (5.1.10),$$



Слика 5.3. Шематски приказ на операциски засилувач со негативна повратна врска со делител на напонот и во неинвертирачка конфигурација.

$$V_{iz} \left(\frac{R_1 + R_2 + AR_1}{R_1 + R_2} \right) = \frac{AV_{vl}(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2} \quad (5.1.11),$$

$$V_{iz} = \frac{AV_{vl}(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + AR_1} \quad (5.1.12).$$

Ако земеме дека се работи за идеален операциски засилувач, тогаш засилувањето е бескрајно. Оттука следува:

$$V_{iz} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_{vl} \quad (5.1.13).$$

Реалната вредност на коефициентот на засилување на операцискиот засилувач е дадена со равенката:

$$A_r = \frac{V_{iz}}{V_{vl}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (5.1.14).$$

Од последната равенка се гледа дека реалната вредност на коефициентот на засилување ќе менува од 1 до A и ќе зависи од отпорите R_1 и R_2 . Во случај кога $R_2 = 0$, тогаш засилувачот има коефициент на напонско засилување 1, што е карактеристика за емитерски засилувач (следач). За сите други вредности на R_2 засилувањето ќе биде поголемо од 1, а за $R_1 = 0$ се добива бескрајна вредност.

5.2. Примена на операциски засилувач за собирање, вадење и мерење на отпор

Во многу електрични кола се применува виртуелната маса на операцискиот засилувач, при што сигналот се донесува преку отпорникот R_1 на инвертирачкиот влез (-), а повратната врска се остварува со помош на отпорникот R_2 . Така, на пример, на влезот на операцискиот засилувач може да се донесат повеќе напони, без да има некое взаемнодејство помеѓу нив (слика 5.4). На виртуелната маса на операцискиот засилувач влегуваат повеќе напони, притоа струите се дадени со равенките:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V_2}{R_1} \quad \text{и} \quad I_3 = \frac{V_3}{R_1} \quad (5.2.1).$$

Вкупната струја на влезот ќе биде:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (5.2.2).$$

Исто така, вкупната струја е дадена со равенката:

$$I = \frac{V_{iz}}{R_2} \quad (5.2.3).$$

Со замена се добива:

$$V_{iz} = -(V_1 + V_2 + V_3) \frac{R_2}{R_1} \quad (5.2.4).$$

Во овој случај треба отпорниците R_1 да се еднакви, притоа излезниот напон е збир од влезните напони. Исто така, ако отпорниците R_1 имаат различни вредности, тогаш излезниот напон ќе зависи од отпорот R_2 и влезните струи на секој од отпорниците R_1 .

Ако се оствари врска со неинвертираниот влез, според шемата дадена на слика 5.5, тогаш операцискиот засилувач ќе служи за вадење (разлика) помеѓу напоните V_1 и V_2 . Сепак и овде се зема како услов напонот да биде $V_d \rightarrow 0$. За инвертираниот влез се добива:

$$I = \frac{V_1 - V_-}{R_1} = \frac{V_- - V_{iz}}{R_2} \quad (5.2.5), \text{ или}$$

$$I = \frac{V_- - V_{iz}}{R_2} \quad (5.2.6),$$

каде што влезниот напон V_- на засилувачот во однос со излезниот напон е даден со равенката:

$$V_{iz} = -AV_- \quad (5.2.7),$$

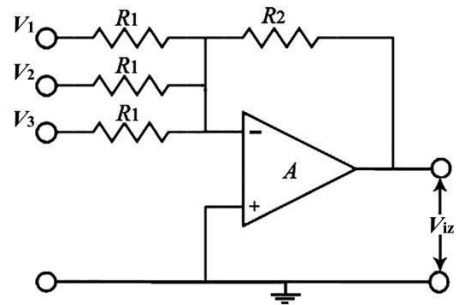
Во случај да земеме дека засилувањето A се стреми кон бесконечност, тогаш влезниот напон V_- се стреми кон нула. Оттука се добива:

$$\frac{V_1}{R_1} = \frac{-V_{iz}}{R_2} \quad (5.2.8).$$

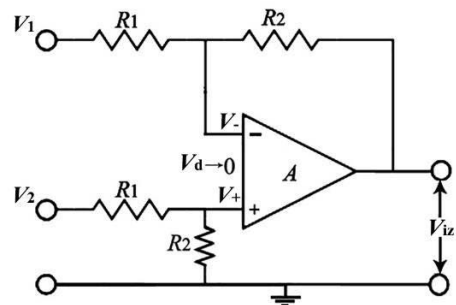
Од друга страна, за неинвертирачкиот влез се добива:

$$V_2 = IR_1 + V_+, \quad I = \frac{V_2}{R_1 + R_2} \quad (5.2.9).$$

$$V_+ = \frac{V_2 R_2}{R_1 + R_2} = V_- \quad (5.2.10).$$



Слика 5.4. Шематски приказ на операциски засилувач за собирање на сигнали.



5.5. Шематски приказ на операциски засилувач за одземање на сигнали.

Од равенката 5.2.5. следува:

$$\frac{-V_-}{R_1} - \frac{V_-}{R_2} = \frac{-V_{iz}}{R_2} + \frac{-V_1}{R_1} \quad (5.2.11),$$

$$V_- \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{V_{iz}}{R_2} + \frac{V_1}{R_1} \quad (5.2.12),$$

Додека пак, од равенката 5.2.10 се добива:

$$\frac{V_2 R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right) = \frac{V_{iz}}{R_2} + \frac{V_1}{R_1} \quad (5.2.13),$$

$$\frac{V_2}{R_1} = \frac{V_{iz}}{R_2} + \frac{V_1}{R_1} \quad (5.2.14),$$

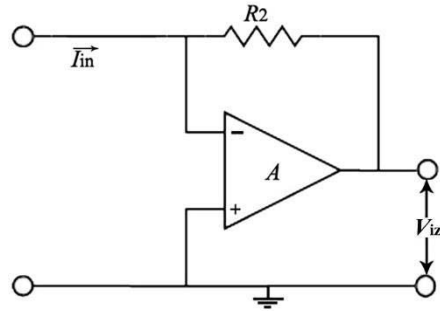
$$V_{iz} = R_2 \frac{V_2 - V_1}{R_1} \quad (5.2.15).$$

При ваков начин на сврзување на отпорниците R_1 и R_2 , како и постоење на два влез со одредени напони, тогаш засилувањето ќе зависи од односот на отпорниците R_2 и R_1 којшто има константна вредност и од разликата на двата влезни напони. Со комбинации на различните отпорници се добиваат различни пропорции на собирање и одземање.

Во двете операции на засилувач функцијата на влезниот отпорник R_1 е претворање на влезниот напон во струја. Ако сакаме струен сигнал да го претвориме во напон, тогаш ќе го изоставиме отпорникот R_1 (слика 5.6). Сепак, и при оваа шема постои виртуелна маса, притоа излезниот напон е даден со равенката:

$$V_{iz} = -I_{in} R_2 \quad (5.2.16).$$

Претходната равенка важи во случај кога на излезот немаме приклучено потрошувач со голема моќност, односно кога струјата што тече е многу мала. Оваа шема на операциски засилувач е наречен трансимпедансен засилувач за претворба на струја во напон или директно во единици за отпор. Всушност, оваа шема се користи за мерење на отпор (поставен како R_2), притоа вредноста на отпорот треба да биде поголема од $10^9 \Omega$.



Слика 5.6. Шематски приказ на операциски засилувач за претворба на струја во напон.

5.3. Примена на операциски засилувач за интегрирање и диференцирање

Досегашните шеми беа кога повратната врска се остварува со помош на отпорници, притоа влезниот сигнал би можело да биде прав или наизменичен напон. Меѓутоа, повратната врска може да се оствари и со помош на кондензатор. Во тој случај, очигледно е дека повратната врска ќе се остварува за наизменични напони (слика 5.7).

Бидејќи при вакво сврзување на операцискиот засилувач имаме виртуелна маса, полнежот Q на кондензаторот C е даден со равенката:

$$Q = -\int_0^t I_{in} dt \quad (5.3.1).$$

Од друга страна, струјата што тече низ отпорникот R е дадена со равенката:

$$I_{in} = \frac{V_{vl}}{R} \quad (5.3.2).$$

Напонот на краевите на кондензаторот придонесува за негово наелектризирање, дадено со равенката:

$$V_{iz} = \frac{Q}{C} \quad (5.3.3).$$

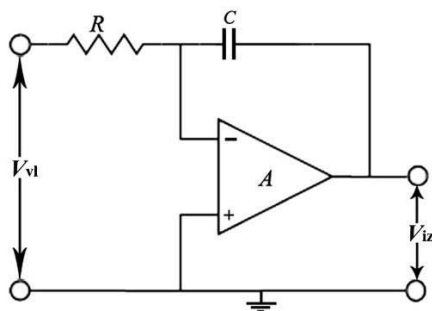
Со замена се добива:

$$V_{iz} = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_{vl} dt \quad (5.3.4).$$

Излезниот напон е интеграл на влезниот напон, којшто се дели со вредноста на временската константа RC , така што обично се вика Милеров интегратор.

Низ кондензаторот течат струи, притоа се интегрираат сите сигнали, во рамките на одреден појас на фреквенции. Покрај тоа, влезниот напон предизвикува течење на струја директно во интеграторот, што може да предизвика поместување на нулата вредност на сигналот. Меѓутоа, компензација на поместување на нулата на интеграторот се врши со донесување на прав напон на влезот, покрај наизменичниот напон.

Операцискиот засилувач во функција на интегратор е составен дел на многу уреди. Така, на пример, интеграторот е составен уред во функцискиот генератор, каде што од правоаголен напон се добива триаголен напон. Секоја физичка величина која ќе може да се претвори во влезен напон, и нејзиниот интеграл има решение, тогаш интеграцијата се врши со операциски засилувач. Незгодата на интеграторот е



Слика 5.7. Шематски приказ на операциски засилувач за интегрирање.

што ако интегрираниот напон е поголем од максималната вредност на излезниот напон, тогаш тој ќе се засити и нема да интегрира.

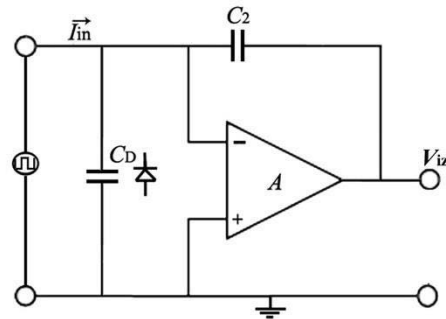
Друга примена на интеграторот е мерење на количеството полнеж, што поминало низ даден електричен круг. Тоа овозможува интеграторот да е составен дел во многу уреди како што се: пиезоелектрични претвораачи, кондензаторски микрофони и полупроводнички детектори на нуклеарни честички. Во полупроводничките детектори се користи р-п премина, којшто се поларизира со висок напон во инверзна насока и се однесува како кондензатор. Јонизирачките честички создаваат парови електрони – шуплина на р-п преминот, притоа со помош на интегратор може да се одреди полнежот, врз база на струјата што тече (слика 5.8). Секоја честица создава полнеж во зависност од енергијата на упадните нуклеарни честички и се појавува како капацитет C_D на р-п преминот на диодата, притоа полнежот може да се измери. Во шемата на сликата се гледа дека изворот на правоаголни импулси (сигнали) е паралелен на р-п преминот на диодата. Со интеграција на импулсот во даден временски интервал се добива излезен напон, којшто е независен од капацитетот на р-п преминот на диодата и даден со равенката:

$$V_{iz} = -\frac{1}{C_2} \int_0^t i dt = -\frac{Q}{C_2} \quad (5.3.5).$$

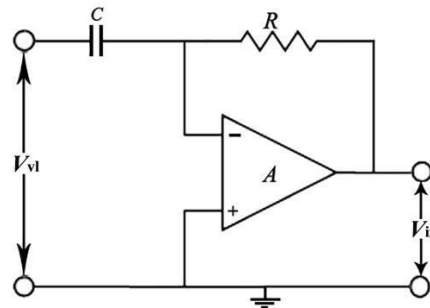
Во пракса паралелно со кондензаторот C_2 се сврзува отпорник, со цел полнежот да опадне на нула помеѓу два импулса добиен од нуклеарните честички, т.е. да дозволи струјата да биде нула, по секој импулс.

Друга примена на операцискиот засилувач е временски диференцијатор (слика 5.9). Разликата во однос на интеграторот е што кондензаторот и отпорникот ги заменуваат местата. Бидејќи и овде постои виртуелна маса на инвертирачкиот влез, следува дека полнежот на кондензаторот ќе биде даден со равенката:

$$Q = -\int_0^t I_{in} dt \quad (5.3.6).$$



Слика 5.8. Шематски приказ на операциски засилувач за полупроводнички детектор.



Слика 5.9. Шематски приказ на операциски засилувач за диференцирање.

Бидејќи истата струја тече и низ отпорникот R , така струјата е дадена со равенката:

$$I_{\text{in}} = \frac{V_{\text{iz}}}{R} \quad (5.3.7).$$

Полнежот на краевите на кондензаторот е како резултат на влезниот напон:

$$Q = CV_{\text{vl}} \quad (5.3.8).$$

Со замена во равенката 5.3.6 се добива:

$$CV_{\text{vl}} = -\int_0^t \frac{V_{\text{iz}}}{R} dt \quad (5.3.9).$$

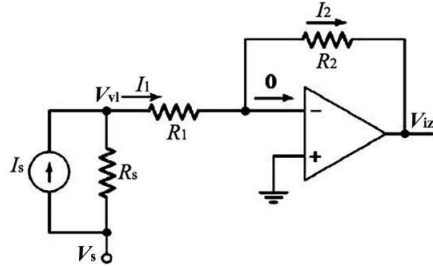
Со диференцирање на последната равенка се добива:

$$V_{\text{iz}} = -RC \frac{dV_{\text{vl}}}{dt} \quad (5.3.10).$$

Всушност се работи за наизменични напони, но може да има и права компонента на напонот. Диференцијаторот наоѓа примена за обликување на напонот, така, на пример, од триаголен напон може да се добие правоаголен напон, на излезот од диференцијаторот. Посебно од интерес е решавање на диференцијални равенки, ако измерената величина може да се претвори во напон.

5.4. Претворање на струја во напон и напон во струја со операциски засилувач

Со одредени шеми на излезот покрај напонот треба да се одреди и струјата што ја даваат некои уреди. Така, на пример, од сончева ќелија, фотодиода и фотодетектор како излез се добива и струја. Всушност, овие уреди претставуваат извори на струја, така што од особена важност е да се одреди струјата, без да се намали нејзината вредност. За таа цел, се користи операциски засилувач при што струјата се претвора во напон, притоа влезниот отпор на засилувачот е многу голем и нема да предизвика оптоварување на изворот на струја (слика 5.10). Влезниот отпор на засилувачот R_1 во однос на виртуелната маса е даден со равенката:



Слика 5.10. Шематски приказ на операциски засилувач за претворање на струја во напон.

$$R_1 = \frac{V_{vl}}{I_1} \quad (5.4.1).$$

За да ја изврши ефикасно претворбата на струјата во напон, потребно е $R_s \gg R_1$, притоа струјата што тече низ отпорникот R_1 , ќе зависи од отпорникот R_s , дадено со равенките:

$$I_s = I_1 = I_2 \quad (5.4.2) \text{ и}$$

$$V_{lz} = -I_2 R_2 = -I_s R_2 \quad (5.4.3).$$

Од последната равенка се гледа дека излезниот напон е пропорционален на влезната струја и отпорникот R_2 .

Покрај тоа, можна е претворба на струја во напон и со операцискиот засилувач се врши претворање на напон во струја. Така, на пример, ако имаме некоја намотка која се движи во магнетно поле, тогаш индуцираната струја во намотката ќе се претвори во напон, со цел подобра контрола и точно отчитување на индуцираната струја. Така, на пример, во процесот на електролиза се наталожува материјал којшто има други својства во однос на катодата. Поради поларизација на електродата, струјата на таложеење се намалува, поради пад на напонот на самиот слој. Затоа, треба струјата да се одржува константна во текот на времето на таложеење при електролиза.

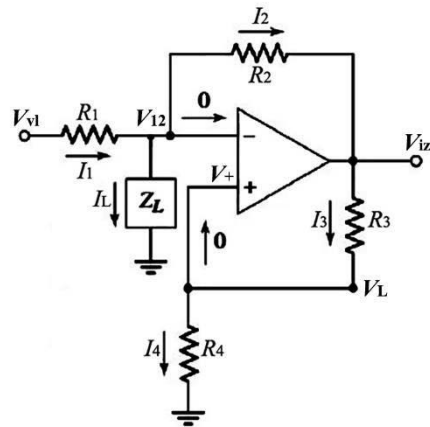
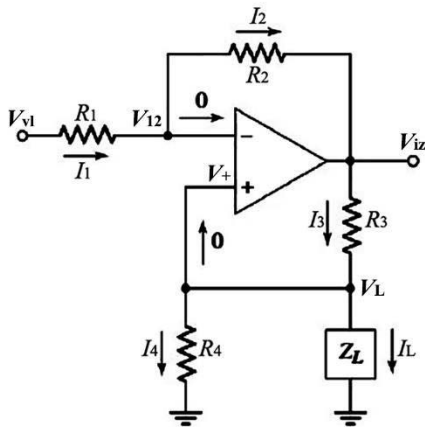
Од претходната шема на слика 5.3, тоа може да се оствари со операциски засилувач со негативна повратна врска, преку отпорникот R_2 . Ако потрошувач би бил на местото на отпорникот R_2 , тогаш струјата низ отпорникот R_2 ќе биде дадена со равенката:

$$I_2 = I_1 = \frac{V_{vl}}{R_1} \quad (5.4.4).$$

Струјата I_2 е пропорционална на влезниот напон V_{vl} и е независна од импедансата на оптоварување или вредноста на отпорот на R_2 . Сепак, во пракса треба едниот вод на потрошувачот да биде на потенцијал на земјата, така што ваквиот начин на добивање на константна струја е непрактичен. Затоа, потрошувачот со импеданс Z_L се сврзува како на шемата (слика 5.11), притоа едниот вод на потрошувачот се сврзува на потенцијал на земјата. Од сликата се гледа дека електричниот вод V_+ на операцискиот засилувач не е на виртуелно заземјување, бидејќи преку импедансот Z_L се сврзува на потенцијал на земјата. Ако ги земеме предвид претходните апроксимации, може да се земе дека:

$$V_{12} = V_+ = V_L = I_L Z_L \quad (5.4.5).$$

Напонот V_+ и напонот V_L се еднакви според еквивалентна шема, дадена на слика 5.12. Од Кирховите закони следува дека, струите I_1 и I_2 се еднакви:



Слика 5.11. Шематски приказ на операциски засилувач за претворање на напон во струја.

Слика 5.12. Шематски приказ на еквивалентен круг на операциски засилувач за претворање на напон во струја.

$$I_1 = I_2 \quad (5.4.6),$$

$$V_{vl} = I_1 R_1 + I_L Z_L \quad (5.4.7),$$

$$I_1 = \frac{V_{vl} - I_L Z_L}{R_1} \quad (5.4.8),$$

$$I_L Z_L = I_2 R_2 + V_{iz} \quad (5.4.9),$$

$$I_2 = \frac{I_L Z_L - V_{iz}}{R_2} \quad (5.4.10) \text{ и}$$

$$\frac{V_{vl} - I_L Z_L}{R_1} = \frac{I_L Z_L - V_{iz}}{R_2} \quad (5.4.11),$$

$$\frac{V_{iz} - I_L Z_L}{R_2} = \frac{I_L Z_L - V_{vl}}{R_1} \quad (5.4.12).$$

Од слика 5.11. следува дека:

$$I_3 = I_4 + I_L \quad (5.4.13),$$

$$V_{iz} = I_3 R_3 + I_L Z_L \quad (5.4.14),$$

$$I_3 = \frac{V_{iz} - I_L Z_L}{R_3} \quad (5.4.15).$$

Бидејќи напонот V_L е ист на отпорниците R_4 и Z_L , се добива:

$$I_4 R_4 = I_L Z_L \quad (5.4.16),$$

$$I_4 = \frac{I_L Z_L}{R_4} \quad (5.4.17) \quad \text{и}$$

со замена во равенката 5.4.13 се добива:

$$\frac{V_{iz} - I_L Z_L}{R_3} = I_L + \frac{I_L Z_L}{R_4} \quad (5.4.18),$$

Во равенките 5.4.12 и 5.4.18, изразот $V_{iz} - I_L Z_L$ е ист, така што:

$$\frac{R_2}{R_1} (I_L Z_L - V_{vl}) = R_3 \left(I_L + \frac{I_L Z_L}{R_4} \right) \quad (5.4.19),$$

$$\frac{R_2}{R_1} I_L Z_L - \frac{R_2}{R_1} V_{vl} = R_3 I_L \left(1 + \frac{Z_L}{R_4} \right) \quad (5.4.20),$$

$$I_L \left(\frac{R_2 Z_L}{R_1 R_3} - 1 - \frac{Z_L}{R_4} \right) = \frac{R_2}{R_1 R_3} V_{vl} \quad (5.4.21),$$

Горната равенка има решение, ако членовите со имагинарни членови се елиминираат, тогаш следува:

$$\frac{R_2 Z_L}{R_1 R_3} = \frac{Z_L}{R_4} \quad (5.4.22),$$

$$\frac{R_2}{R_1 R_3} = \frac{1}{R_4} \quad (5.4.23),$$

$$I_L = -\frac{R_2}{R_1 R_3} V_{vl} = -\frac{1}{R_4} V_{vl} \quad (5.4.24),$$

што значи дека струјата на потрошувачот е пропорционална на влезниот напон, независна од импедансата на потрошувачот Z_L и од вредноста на отпорот R_4 . Тоа важи ако излезниот напон не е споредлив со напонот на напојување на операцискиот засилувач. Влезниот отпор на засилувачот има конечна вредност, којшто зависи од влезниот напон и од импедан-

сата на потрошувачот Z_L . При константна вредност на струјата I_L промената на импедансата на потрошувачот Z_L доведува до промена на напонот $V_L = V_{L2} = V_+$, а со тоа и промена на струјата I_L . Оваа шема претставува следач на напонот, притоа операцискиот засилувач за претворба на напон во струја треба да се постави помеѓу изворот на напон V_i и отпорникот R_1 , со цел да се елиминира ефектот на промена на отпорот на потрошувачот, со промена на влезниот отпор.

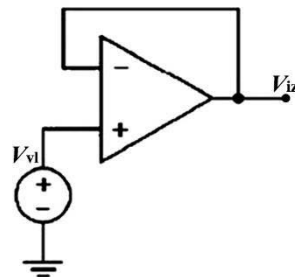
5.5. Напонски следач и инструментален засилувач

Од интерес е да се одреди засилувањето на операцискиот засилувач кога влезниот напон е поврзан на неинвертираниот влез, а другиот влез е поврзан директно со излезот на операцискиот засилувач (слика 5.13). Во овој случај, влезниот отпор на операцискиот засилувач е $R_1 = \infty$, а засилувањето е дадено со равенката:

$$A_v = \frac{V_{iz}}{V_{vi}} \quad (5.5.1).$$

Излезниот напон го следи влезниот напон, така што овој круг на операцискиот засилувач се вика напонски следач, слично на емитерски засилувач на биполарен транзистор. Исто така, засилувањето со повратната врска не зависи од отпорот R_2 , затоа се зема дека $R_2 = 0$, при создавање на краток спој на излезот со влезот.

Коефициентот на напонско засилување е помал од единица, но влезниот отпор на напонскиот следач е речиси бесконечен, а излезниот отпор е нула. Тоа овозможува да не се оптовари претходниот уред, а со тоа сосема малку да се намали излезниот напон и придонесува за стабилност на уредот. Обично се поставува помеѓу засилувач на напон и потрошувач. Влезниот отпор на неинверзивниот влез е многу поголем од $100 \text{ k}\Omega$, тогаш $V_{iz} = V_{vi}$ и ефектот на мал излезен отпор од претходниот степен ќе се занемари.



Слика 5.13. Шематски приказ на напонски следач со операциски засилувач.

Во секојдневниот живот треба да се измерат физички величини, како што се температурата, притисокот, механичко напрегање, протокот на вода, брзината на ветерот, звукот итн. За таа цел, треба овие физички величини да се претворат во електрични сигнали со помош на претворачи. Обично излезниот напон од претворачите е многу мал, понекогаш од ред на големина од неколку μV . Излезниот напон од

претворац треба да биде доволно голем за прикажување на екран и понатамошна обработка со други уреди. Затоа се користат инструментални засилувачи или уреди за кондицирање на сигнали. Карактеристики на инструменталните засилувачи се големиот коефициент на засилување, стабилност на работа, голем влезен отпор, низок излезен отпор и мало поместување на излезниот прав напон. Инструменталниот засилувач се состои од два засилувача A_1 и A_2 коишто имаат голем влезен отпор, како и засилувач на разлика на напон A_3 (слика 5.14).

Анализата ќе се спроведе при апроксимацијата за виртуелна маса. Напоните на инвертирачките влезови на засилувачите A_1 и A_2 го следат напонот на нивните влезови. Од сликата се гледа дека струјата низ отпорникот R_1 е дадена со равенката:

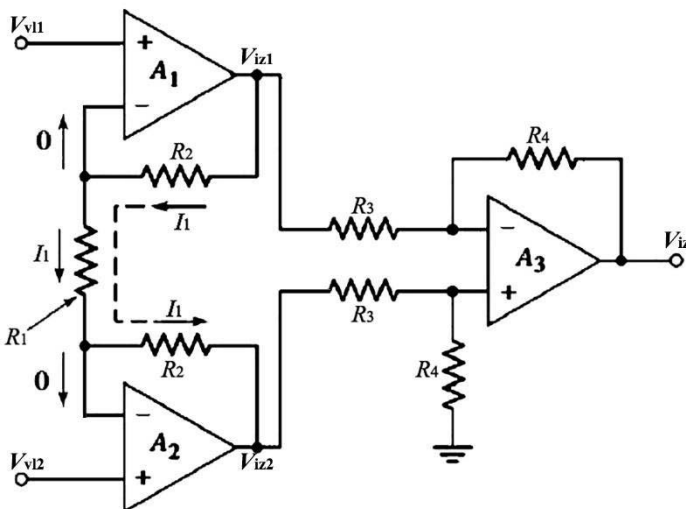
$$I_1 = \frac{V_{v11} - V_{v12}}{R_1} \quad (5.5.2),$$

Истата струја тече и низ отпорниците R_2 , притоа излезните напони на операциските засилувачи A_1 и A_2 се дадени со равенките:

$$\begin{aligned} V_{iz1} &= V_{v11} + I_1 R_2 = V_{v11} + \left(\frac{V_{v11} - V_{v12}}{R_1} \right) R_2 = \\ &= \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{v11} - \frac{R_2}{R_1} V_{v12} \end{aligned} \quad (5.5.3),$$

$$V_{iz2} + I_1 R_2 = V_{v12} \quad (5.5.4).$$

Оттука, следува:



Слика 5.14. Шематски приказ на инструментален засилувач.

$$\begin{aligned}
 V_{iz2} &= V_{v12} - I_1 R_2 = V_{v12} - \left(\frac{V_{v11} - V_{v12}}{R_1} \right) R_2 = \\
 &= \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{v12} - \frac{R_2}{R_1} V_{v11}
 \end{aligned} \tag{5.5.5},$$

Излезниот напон на операцискиот засилувач A_3 е разлика на двата негови влеза:

$$V_{iz} = \frac{R_4}{R_3} (V_{iz2} - V_{iz1}) \tag{5.5.6},$$

Со замена на претходните равенки се добива:

$$V_{iz} = \frac{R_4}{R_3} \left[\left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{v12} - \frac{R_2}{R_1} V_{v11} - \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{v11} + \frac{R_2}{R_1} V_{v12} \right] \tag{5.5.7},$$

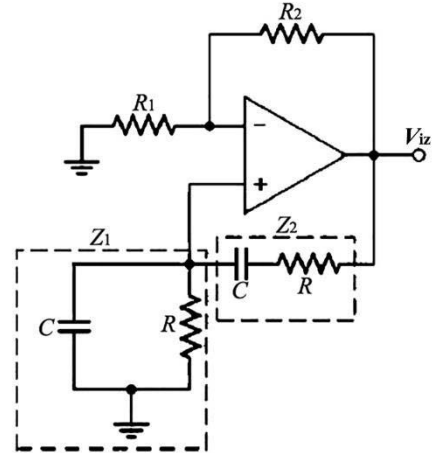
$$V_{iz} = \frac{R_4}{R_3} \left[\left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) V_{v12} - \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) V_{v11} \right] \tag{5.5.8},$$

$$V_{iz} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (V_{v12} - V_{v11}) \tag{5.5.9},$$

Засилувањето на операцискиот диференцијатор ќе зависи од отпорникот R_1 , којшто може да се замени со потенциометар, со што се добива променливо засилување на инструменталниот засилувач.

5.6. Винов осцилатор со операциски засилувач

Операцискиот засилувач може да воспостави и позитивна повратна врска, притоа излезниот сигнал се враќа назад на неинвертирачкиот влез. Ваквиот начин на поврзување може да се искористи за конструкција на осцилатор, за добивање на синусни осцилации. За таа цел, потребно е воспоставување на повратна врска со селективен карактер, која се постигнува со помош на Винов мост. Имено, Виновиот мост се состои од паралелно сврзани отпорник и кондензатор со импеданс Z_1 и импеданс Z_2 со сериски врзани отпорник и кондензатор. За резонантната фреквенција поместувањето на фазата е 0° . Двата импеданса се поврзани за неинвертирачкиот влез на операцискиот засилувач (слика 5.15).



Слика 5.15. Шематски приказ на Винов осцилатор со операциски засилувач.

Излезниот напон од засилувачот е даден со равенката:

$$V_{iz} = A(V_+ - V_-) \quad (5.6.1),$$

$$V_+ = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} V_{iz} \quad (5.6.2),$$

$$V_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{iz} \quad (5.6.3).$$

Со замена во равенката 5.6.1 се добива:

$$V_{iz} = AV_{iz} \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (5.6.4).$$

Засилувањето A на операцискиот засилувач е бескрајно, така што равенката 5.6.4. ќе биде точна ако изразот во заграда е еднаков на нула:

$$\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5.6.5).$$

Последната равенка важи ако е исполнето реалниот дел на равенката од лево и десно да се еднакви и тоа е услов за отпочнување на синусните осцилации. Импедансите Z_1 и Z_2 се дадени со равенките:

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{\frac{1}{i\omega C} + R} + \frac{1}{R} = i\omega C + \frac{1}{R} = \frac{1 + i\omega RC}{R} \quad (5.6.6),$$

$$Z_1 = \frac{R}{1 + i\omega RC} \quad (5.6.7),$$

$$Z_2 = R + \frac{1}{i\omega C} \quad (5.6.8).$$

Со замена во равенката 5.6.5. се добива:

$$\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{\frac{R}{1 + i\omega RC}}{\frac{R}{1 + i\omega RC} + R + \frac{1}{i\omega C}} = \frac{R}{R + R + i\omega R^2 C + R + \frac{1}{i\omega C}} \quad (5.6.9),$$

$$\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{R}{3R + i\omega R^2 C + \frac{1}{i\omega C}} \quad (5.6.10),$$

$$\frac{R}{3R + i\omega R^2 C + \frac{1}{i\omega C}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5.6.11).$$

Услов за отпочнување на осцилациите е:

$$\frac{1}{3} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5.6.12),$$

$$\frac{R_1 + R_2}{R_1} = 3 \quad (5.6.13).$$

$$1 + \frac{R_2}{R_1} = 3 \quad (5.6.14).$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 2 \quad (5.6.15).$$

Во случај отпорниците R_1 и R_2 да се дел од потенциометар, тогаш се добива дека отпорникот R_1 треба да биде една третина во однос на вкупниот отпор на потенциометарот (тример) или R_2 да биде двапати поголем од отпорот на отпорникот R_1 . Во случај да не биде исполнет условот од равенката 5.6.13. операцискиот засилувач со Винов мост ќе претставува селективен засилувач, но не и осцилатор.

Со изедначување на имагнарните членови во равенката 5.6.5. се одредува фреквенцијата на синусните осцилации:

$$i\omega R^2 C + \frac{1}{i\omega C} = 0 \quad (5.6.16).$$

$$i\omega R^2 C = -\frac{1}{i\omega C} \quad (5.6.17).$$

$$\omega = \frac{1}{RC} \quad (5.6.18).$$

Во услови на резонанција, фреквенцијата на осцилаторот ќе зависи од вредноста на отпорниците R и вредноста на капацитетот на конденза-

торите C . Додека пак, амплитудата на осцилации ќе зависи од вредноста на напоните на напојување на операцискиот засилувач и излезниот отпор на засилувачот.

5.7. Шмитово коло за активирање на електричен круг

Операцискиот засилувач треба да биде способен да разликува напони на влезовите до неколку микроволти, а на излезот да се добие напон од неколку волти. Меѓутоа, нивото на шум во влезните напони може да биде неколку миливолти, за соодветен излезен напон. Затоа, се користи Шмитово коло за активирање на електричен круг, како компаратор. Шмитовото коло на активирање (тригер) или бистабилен мултивибратор е уред со две состојби, вклучен или исклучен, со користење на позитивна повратна врска, поголема од единица (слика 5.16а). Позитивна повратна врска се остварува со помош на отпорник којшто е поврзан помеѓу излезот и неинвертирачкиот влез на операцискиот засилувач. Неинвертирачкиот влезен напон V_+ е поврзан со излезниот напон V_{iz} и напонот V_+ како делител на напон, притоа излезниот напон е даден со равенката:

$$V_{iz} = IR_2 + V_+ \quad (5.7.1).$$

Напонот V_+ не останува константен, туку зависи од излезниот напон. Влезниот сигнал е приклучен на инвертирачкиот влез на операцискиот засилувач. Струјата што тече низ отпорниците R_1 и R_2 е дадена со равенката:

$$I = \frac{V_{iz}}{R_1 + R_2} \quad (5.7.2).$$

Со замена во претходната равенка се добива:

$$V_{iz} = \frac{V_{iz}}{R_1 + R_2} R_2 + V_+ \quad (5.7.3),$$

$$V_+ = \frac{V_{iz}}{R_1 + R_2} R_1 \quad (5.7.4).$$

Всушност, Шмитовото коло на активирање е електрично коло со две состојби (бистабилно коло) каде на излезот се добива максимум напон, кога влезниот напон ќе достигне одреден праг и се намалува речиси на нула кога влезниот напон паѓа под одредена вредност. Карактеристиките на напонот од Шмитовото коло зависат од влезниот напон, така што се добива максимален излезен напон $V_{iz} = V_{TH}$ при:

$$V_+ = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_H \quad (5.7.5).$$

Сè додека влезниот сигнал е помал од V_+ , на излезот ќе имаме висок напон, и во случај кога $V_1 = V_+$ се случува прекин на излезниот напон, кој ќе биде V_{TH} (слика 5.16б) и е даден со равенката:

$$V_{TH} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_H \quad (5.7.6).$$

Кога напонот на инвертирачкиот влез V_1 е поголем од V_{TH} , т.е. од напонот на неинвертирачкиот влез, тогаш разликата на напоните ($V_1 - V_{TH}$) се засилува притоа излезниот напон се префрлува на минимален напон или $V_{iz} = V_L$. Во тој случај, V_+ е даден со равенката:

$$V_+ = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_L \quad (5.7.7).$$

При $V_L < V_H$ влезниот напон V_1 сè уште е поголем од V_+ , така што излезниот напон останува на ниско ниво како V_L , со растењето на V_1 (слика 5.16б). Анализата важи ако земеме дека V_H има позитивна вредност, а V_L има негативна вредност.

Сосема е друга ситуацијата кога V_1 се намалува, притоа сè додека V_1 е поголем од напонот $V_+ = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_L$ излезниот напон останува во ниска

состојба. Кога напонот $V_1 = V_+$, тогаш се добива прекин на излезниот напон дефиниран како V_{TL} , дадено со равенката:

$$V_{TL} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_L \quad (5.7.8).$$

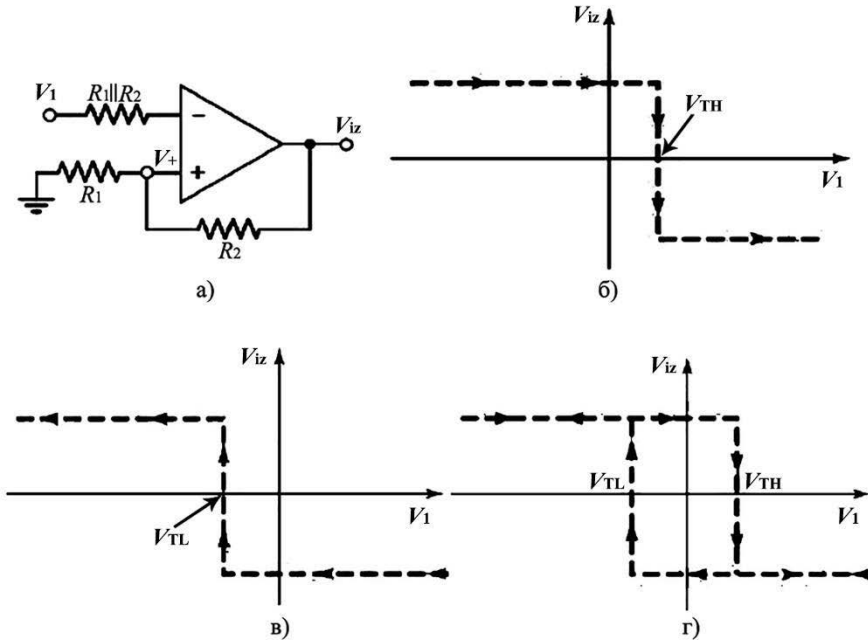
Напонот V_1 се намалува под оваа вредност, така што напонот на неинвертирачкиот влез е поголем од инвертирачкиот влез. Разликата на двата влезе се засилува, притоа излезниот напон се префрла во состојба $V_{iz} = V_H$. Бидејќи V_1 продолжува да се намалува, тој станува помал од или V_+ , притоа V_{iz} останува да има висока вредност (слика 5.16в). Комплетните карактеристики се дадени на (слика 5.16г), при сврзување на излезниот напон со неинвертирачкиот влез.

Исто така, Шмитовото коло на активирање се добива и при влезен напон на неинвертирачкиот влез. Напонот на прекин на Шмитовото коло на активирање може да се помести во позитивна или негативна насока, со примена на референтен напон. При сврзување на инвертирачкиот влез на нула потенцијал, влезниот сигнал се донесува преку отпорникот R_1 , кој е поврзан со неинвертирачкиот влез на компараторот (слика 5.17а). Напон V_+ на неинверзирачкиот влез зависи од влезниот напон V_1 и од излезниот напон V_{iz} .

Напонот на почетокот на неинвертирачкиот влез и излезот од операциониот засилувач е даден со равенката:

$$V_{iz} + V_1 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + V_+ \quad (5.7.9),$$

$$R = R_1 + R_2 \quad (5.7.10).$$



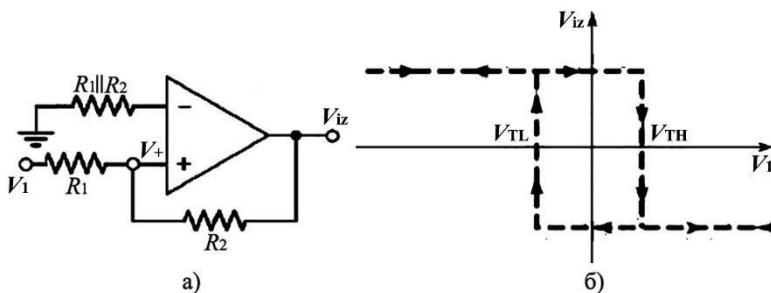
Слика 5.16. Шематски приказ на Шмитовото коло на активирање со операциски засилувач, со влезен напон на инвертирачкиот влез.

Струјата I ќе биде збир од струјата што тече низ отпорникот R_1 и отпорникот R_2 , бидејќи напон V_+ е на виртуелна маса следува дека:

$$I = I_1 + I_2 \quad (5.7.11),$$

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1 + R_2} \quad (5.7.12),$$

$$I_2 = \frac{V_{iz}}{R_1 + R_2} \quad (5.7.13),$$



Слика 5.17. Шематски приказ на Шмитовото коло на активирање со операциски засилувач, со влезен напон на неинвертирачкиот влез.

$$V_{iz} + V_1 = \frac{V_{iz}}{R_1 + R_2} R_1 + \frac{V_1}{R_1 + R_2} R_2 + V_+ \quad (5.7.14),$$

$$V_+ = \left(V_{iz} - \frac{V_{iz}}{R_1 + R_2} R_2 \right) + \left(V_1 - \frac{V_1}{R_1 + R_2} R_1 \right) \quad (5.7.15),$$

$$V_+ = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_1 + \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_{iz} \quad (5.7.16).$$

Во случај кога влезниот напон V_1 има негативна вредност, тогаш излезниот напон има мала вредност, $V_{iz} = V_L$ (негативна вредност). Исто така, напонот на неинверзниот напон V_+ и излезниот напон имаат ниска вредност. Напонот на прекин се добива при $V_1 = V_{TH}$, $V_+ = 0$ и $V_{iz} = V_L$. Со замена во равенката 5.7.16, се добива:

$$0 = R_2 V_{TH} + R_1 V_L \quad (5.7.17),$$

Оттука, напонот V_{TH} е даден со равенката:

$$V_{TH} = - \left(\frac{R_1}{R_2} \right) V_L \quad (5.7.18).$$

Ако V_L има негативна вредност, тогаш V_{TH} има позитивна вредност.

Низок напон на прекин се добива при $V_1 = V_{TL}$, $V_+ = 0$ и $V_{iz} = V_H$. Со замена во равенката 5.7.16, се добива:

$$0 = R_2 V_{TL} + R_1 V_H \quad (5.7.19),$$

Оттука, напонот V_{TL} е даден со равенката:

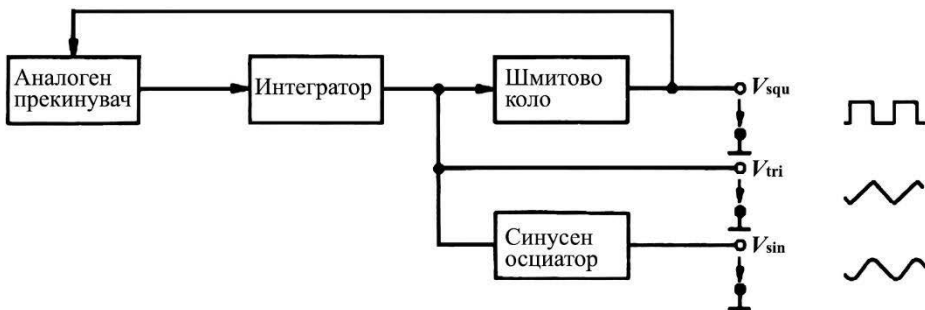
$$V_{TL} = - \left(\frac{R_1}{R_2} \right) V_H \quad (5.7.20).$$

Ако $V_H > 0$ тогаш $V_{TL} < 0$.

Крајните напонски карактеристики на пренос на напон се прикажани на слика 5.176. Се забележува постоење на хистерезист и бистабилни состојби на напон при $V_1 = 0$. Ако V_1 има мала позитивна вредност, тогаш излезниот напон има голема вредност. Додека пак, ако V_1 има мала негативна вредност, тогаш излезниот напон има мала вредност. Шмитовото коло за активација на одреден електричен круг се користи во осцилоскопите и функциските генератори.

5.8. Функциски генератор

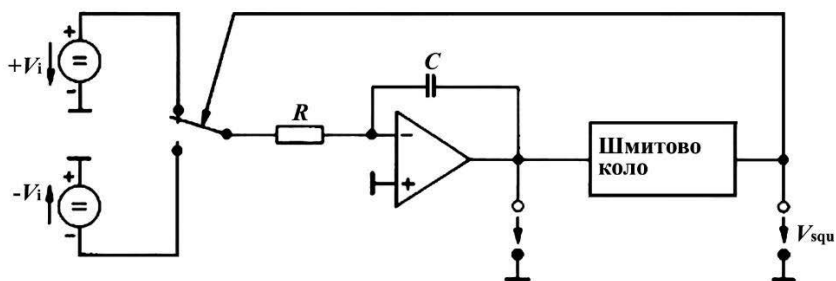
Функцискиот генератор е извор на напон со различни бранови форми, како што се синусна, квадратна, правоаголна, пулсирачка и триаголна. Покрај тоа, амплитуди и фреквенции на излезниот сигнал од функцискиот генератор се променливи, со можност за вклучување на прав напон, заедно со наизменичниот и негово прилагодување. Фреквенцијата на генераторот може да менува од 0,01 Hz до 100 kHz. Излезниот напон од функцискиот генератор е обично 0 – 20 V, од врв до врв (во однос на позитивната насока и негативната насока на у-оската), додека излезната импеданса е обично 50 Ω . Функцискиот генератор се состои од повеќе операциски засилувачи. Така, на пример, операцискиот засилувач се користи за генерирање на нискофреквентни синусни бранови со Винов мост, за триаголен наизменичен напон се користи интегратор и за генерирање на правоаголен напон се користи Шмитово коло или диференцијатор. Меѓутоа, со примена на Шмитово коло за активација може да се добиваат истовремено триаголен бран, квадратен бран и синусен бран (слика 5.18).



Слика 5.18. Шематски приказ на функциски генератор.

За да се создаде квадратен напон, треба да се донесе постојан напон на интеграторот. На излезот од интеграторот напонот може да биде позитивен или негативен, во зависност од поларитетот на напонот на излезот на интеграторот. Ако излезниот напон на интеграторот го достигне нивото на вклучување или исклучување на Шмитовото коло за активација, тогаш напонот на влезот од интеграторот ќе биде обратен. Оттука, квадратен напон на влезот на интеграторот ќе доведе до триаголен напон на излезот од интеграторот, чија фреквенција ќе зависи од нивоата на активација на Шмитовото коло (слика 5.19). Влезниот напон се менува од вредност $+V_i$ или $-V_i$ на интеграторот во колото, во зависност од положбата на аналогниот прекинувач.

Фреквенцијата на функцискиот генератор се контролира со примена на кондензатори со различен капацитет, во LC или RC кола. Исто така, фреквенцијата може да се контролира и со менување на

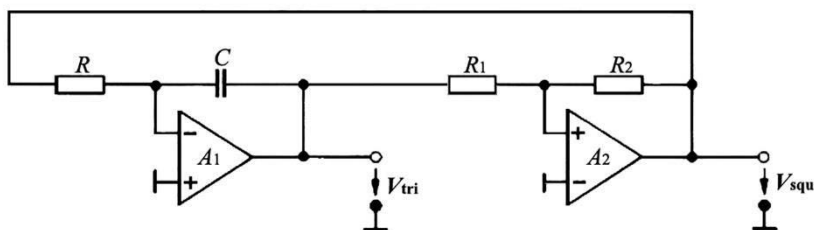


Слика 5.19. Шематски приказ на функциски генератор со интегратор.

големината на струјата во интеграторот. Фреквентно контролираниот напон регулира два извора на струја. Горната граница на напонот во интеграторот се контролира со посебен извор на струја, притоа излезниот напон од интеграторот се зголемува линеарно со текот на времето. На тој начин, излезниот напон од интеграторот има триаголна бранова форма, чија фреквенција се одредува според големината на напонот од изворот на постојана струја. Покрај тоа, на излезот од функцискиот генератор се поставува уред за намалување на големината на излезниот сигнал, притоа неговата импеданса не се менува со фреквенцијата.

Наједноставно е да се користи излезниот напон на Шмитовото коло како влезен напон за интеграторот (слика 5.20). Шмитовото коло обезбедува постојан излезен напон кој ќе биде интегриран од интеграторот. Ако излезниот напон на интеграторот достигне ниво за активирање на Шмитовото коло, напонот V_{squ} се интегрира и моментално го менува знакот што доведува на излезот на интеграторот да се сврти во обратна насока, сè додека не се достигне другото ниво на активирање. Со цел да се осигуриме дека апсолутните вредности на позитивните и негативните наклони се исти, компараторот (A_2) мора да има симетричен излезен напон $\pm V_{squmax}$. Оттука, амплитудата на триаголниот напон е дадена со равенката:

$$V_{tri} = \frac{R_1}{R_2} V_{squmax} \quad (5.8.1).$$



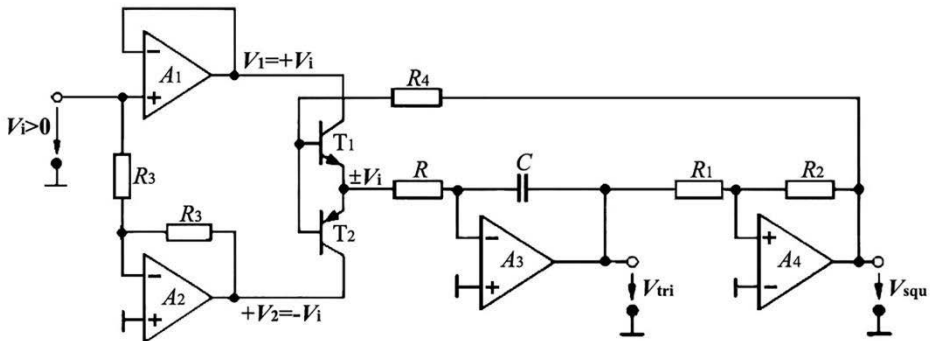
Слика 5.20. Шематски приказ на едноставен функциски генератор.

Периодот на осцилација е еднаков на четири пати повеќе од времето потребно за промена на напонот (слика 5.20) од нула до V_{tri} , дадено со равенката:

$$T = 4 \frac{R_1}{R_2} RC \quad (5.8.2).$$

Покрај тоа, фреквенцијата на излезниот сигнал може да се контролира со менување на напоните $+V_i$ и $-V_i$ (слика 5.21). Напоните $+V_i$ или $-V_i$ се стабилни поради малиот излезен импеданс на операциските засилувачи A_1 и A_2 . Овие напони се носат на влезот на интеграторот преку транзистор T_1 или транзистор T_2 кои се во спој на емитерски засилувач, во зависност од состојбата на вклучување или исклучување на Шмитовото коло. Во случај излезните напони на компараторот (A_4) да се поголеми од $\pm V_i$, двата транзистора работат во подрачје на заситување на емитерските засилувачи, така што излезниот напон од нив е за неколку милivolти помал. Амплитудата на излезниот триаголен напон е дадена со равенката:

$$V_{tri} = \frac{R_1}{R_2} V_{squmax} \quad (5.8.3).$$



Слика 5.21. Шематски приказ на функционален генератор со контролирана фреквенција.

Промената на триаголниот напон со текот на времето е дадена со равенката:

$$\frac{\Delta V_{tri}}{dt} = \pm \frac{V_i}{RC} \quad (5.8.4).$$

Периодот на осцилација е еднаков на четири пати повеќе од времето потребно за промена на напонот на интеграторот (слика 5.20) од нула до V_{tri} , дадено со равенката:

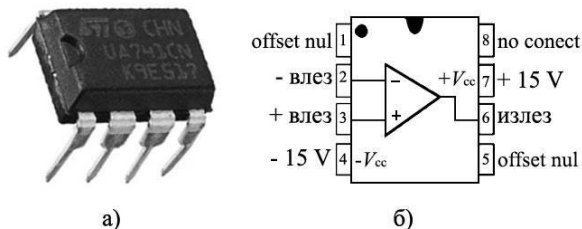
$$f = \frac{V_i}{4RCV_{tri}} = \frac{R_2 V_i}{4R_1} \cdot \frac{1}{RC} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{V_i}{V_{squmax}} \quad (5.8.5).$$

Оттука, се добива дека фреквенцијата е пропорционална на влезниот напон V_i , притоа електричниот круг претставува напонско-фреквентен

претворац. Сигурноста, како и стабилноста на амплитудата и фреквенцијата се неопходни, затоа треба да се направи тие да не зависат од V_{squmax} . Тоа се постигнува со користење на Шмитово коло.

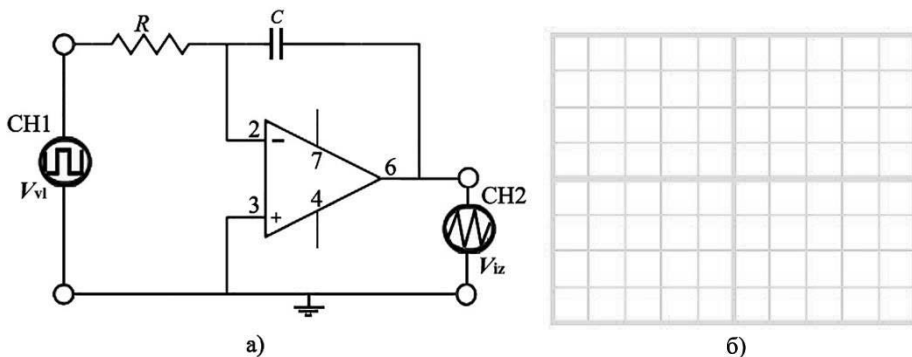
5.9. Изработка на интегратор, диференцијатор и Винов осцилатор со операциски засилувач LM741

Операцискиот засилувач е уред со повеќенаменска употреба во електрониката. Во оваа вежба треба да се изработи интегратор, диференцијатор и осцилатор за добивање на синусни осцилации со Виенов мост. Операцискиот засилувач LM741 се состои од интегрално коло со осум ножиња и се напојува со два извора, извор на позитивен и извор на негативен напон (слика 5.22). Бројењето на нозете на операцискиот засилувач е во насока обратна од стрелката на часовникот, во однос на забецот на горната површина на засилувачот. Напојувањето на засилувачот е со $+15\text{ V}$ и -15 V , а ножичките 1 и 5 треба да се спојат за заземјување, во зависност од шемата. Најпрво се избира која функција ќе ја извршува операцискиот засилувач, потоа се прави печатено електронско коло на плоча од каширан пертинакс и се пристапува кон вметнување на сите уреди на плочата. Печатеното електронско коло се прави со методата на фотолитографија, опишана претходно во книгата. Најдобро е на едно печатено коло да се нанесат водовите за интегратор, диференцијатор и осцилатор со Винов мост. Изведбата да биде таква што операцискиот засилувач LM741 да не се поместува, а другите елементи, отпорници и кондензатори да се преспојуваат и залемуваат. Откако ќе се поврзат сите елементи со операцискиот засилувач, постепено се зголемува напонот од двата извора.



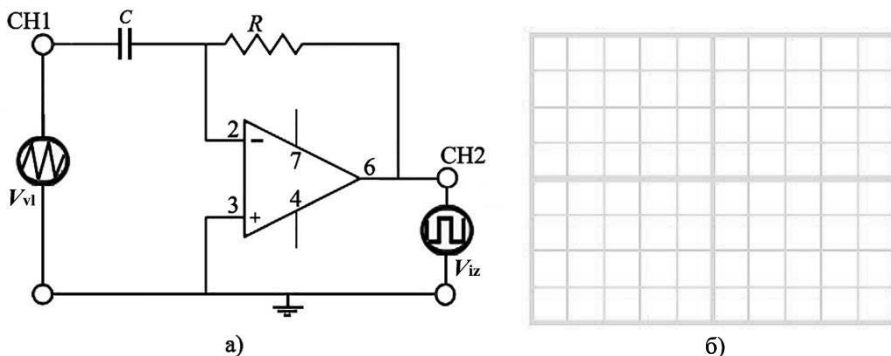
Слика 5.22. Операциски засилувач LM74 741: а) реална слика на засилувачот и б) шематски приказ на засилувачот.

Шемата на интеграторот е дадена на слика 5.23а, каде што $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 100 \text{ nF}$, а правоаголниот сигнал се донесува од функцискиот генератор, притоа фреквенцијата на сигналот е $f = 1 \text{ kHz}$ и амплитудата на напонот е $V_{vi} = 0,4$. Во исто време, овој напон се донесува на осцилоскоп со помош на коаксијален кабел на влезот 1 (CH1), додека излезниот напон се донесува на осцилоскоп на влезот 2 (CH2). На излезот од операцискиот засилувач се добива триаголен напон. Во случај да не се добие триаголен напон, тогаш на влезниот напон од функцискиот генератор се додава права компонента на напонот. Влезниот и излезниот напон се скицираат или се фотографира со мобилен телефон и се поставуваат на местото на сликата 5.23б.



Слика 5.23. Интегратор изведен со операциски засилувач $\mu 741$: а) шема на интегратор и б) форма на сигналите.

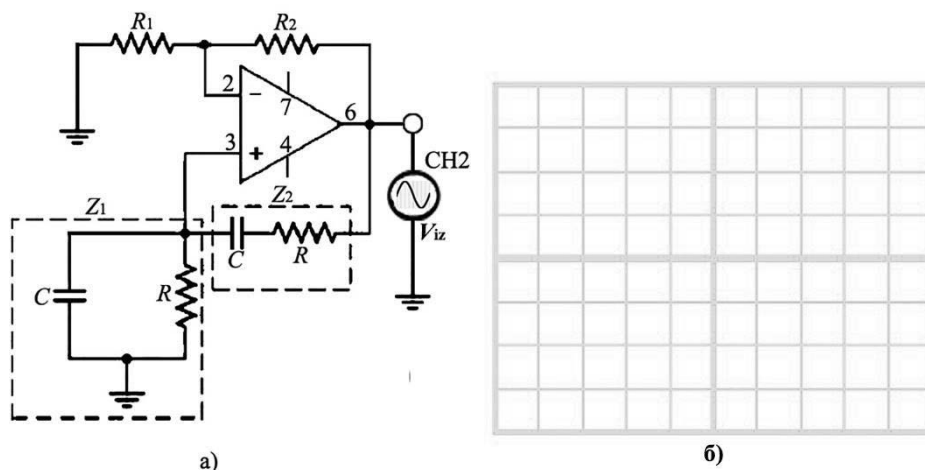
Додека пак, за изведба на диференцијатор со операцискиот засилувач LM 741 се користи шемата дадена на слика 5.24а, каде што отпорникот се заменува со кондензаторот и обратно. Од функцискиот генератор се донесува триаголен напон, наместо правоаголен напон, при фреквенција на сигналот е $f = 1 \text{ kHz}$ и амплитудата на напонот е $V_{vi} = 0,4$. Влезниот напон се донесува на осцилоскоп со помош на коаксијален



Слика 5.24. Диференцијатор изведен со операциски засилувач LM 741: а) шема на диференцијатор и б) форма на сигналите.

кабел на влезот влезот 1 (CH1), додека излезниот напон се донесува на осцилоскоп, на влезот 2 (CH2). На излезот од операцискиот засилувач треба да се добие правоаголен напон. Влезниот и излезниот напон се скицираат или се фотографираат со мобилен телефон и се поставуваат на местото на сликата 5.24б.

Покрај тоа, се конструира синусен осцилатор со операцискиот засилувач LM741 (5.25а), каде што повратната врска се остварува со Винов мост. Вредностите на отпорниците се $R = 1\text{ k}\Omega$, и кондензаторите се $C = 100\text{ nF}$. Отпорниците R_1 и R_2 се дел од потенциометар, со цел побрзо да се постигне резонанција и на екранот на осцилокопот да се добие синусоида. Излезниот напон се скицира или се фотографира со мобилен телефон и се поставува на местото на сликата 5.25б.



Слика 5.25. Синусен осцилатор со Винов мост, изведен со операциски засилувач LM 741: а) шема на осцилаторот и б) форма на сигналот.

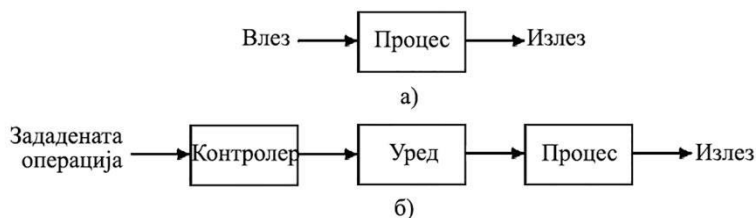
6. АВТОМАТСКА РЕГУЛАЦИЈА НА ПРОЦЕСИ

Во оваа глава ќе ги разгледаме системите за контрола на процеси, со отворена повратна врска и затворена повратна врска. Контролниот систем се базира на повеќе уреди кои регулацијата ја остваруваат со повратни врски. Во последно време, автоматската регулација на процеси се користи во современите производствени процеси, контрола на алтернативните извори на енергија, конструкцијата на инструменти, хибридниите автомобили, а во последно време и нивното автоматско возење. За да се контролираат одредени процеси, потребно е воспоставување цели и променливи што треба да се контролираат, опсег на дејствување, моделирање и анализа. Исто така, можно е последователно извршување на повеќе процеси и нивно временско разграничување.

6.1. Вовед во контролори

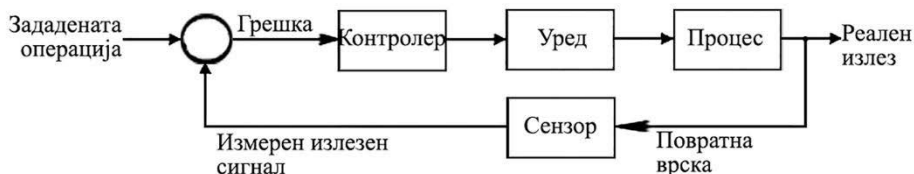
Во зависност од целта што треба да се оствари, треба да направиме контрола на одредени физички величини во даден уред, чија промена доведува до одредени електрични, механички или хемиски ефекти. Всушност, контролен систем е поврзување на повеќе компоненти, што обезбедува соодветна промена на системот. Во основа промената на системот се обезбедува со линеарна промена на некоја компонента или дејствување со сложена математичка функција, со што се остварува причинско-последична врска на компонентите на системот. Така, на пример, треба да ја задржиме константната температура на печка, без разлика на промените на температурата на околината. Во овој систем треба да има одреден референтен сигнал според кој може да се спореди излезната температура, т.е. температурата на печката. Секое отстапување треба да биде засилено и системот дејствува за да го врати излезот во посакуваната вредност. Ова може да биде остварено со позитивна или негативна повратна врска, притоа се можни проблеми со одржување на стабилноста, во однос на отстапувањето на температурата. Обично компонентата или процесот што треба да биде контролиран, треба да се претстави со блок шема (слика 6.1). Од односот на влезниот сигнал и излезниот сигнал е даден процесот што

треба да се направи на влезниот сигнал за да добиеме соодветен излезен сигнал (слика 6.1а), најчесто тоа се постигнува со засилувач. Од друга страна, контролниот отворен систем без повратна врска користи контролор и уред за да се добие посакуваната вредност на величината (слика 6.1б). Исто така, во затворениот контролен систем се користи



Слика 6.1. Контрола на процеси: а) процес којшто треба да се контролира и б) отворен систем на контрола на процеси без повратна врска.

дополнително мерење на реалниот излезен сигнал и негова споредба со посакуваната вредност на излезот. Мерењето на излезниот сигнал, негова споредба и враќање на влезот се вика сигнал за повратна врска. Сигналот за повратна врска се враќа на влезот со помош на различни уреди и ја сочинуваат повратната врска, во одреден затворен систем. Систем за контрола со повратна врска е систем за контрола, со тенденција да го одржува односот на една системска променлива со друга, со соодветни функции за споредување на овие променливи и користење на разликата како услов за контрола. За таа цел, потребен е соодветен сензор, така што измерениот излезен сигнал да е приближно на реалниот излез на системот (слика 6.2). Системот за контрола со

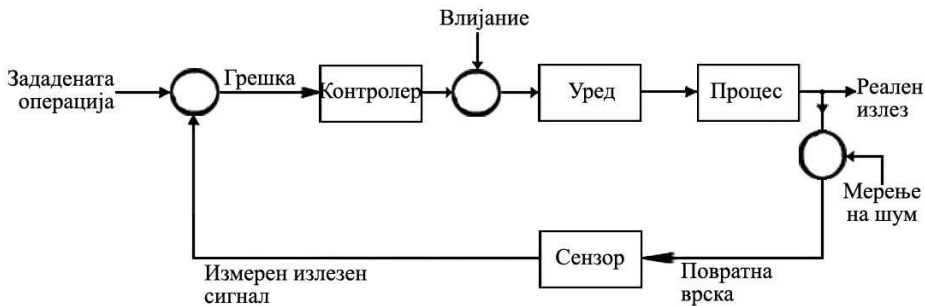


Слика 6.2. Затворен контролен систем со повратна врска.

повратна врска може да користи функција која ќе го изрази односот помеѓу излезниот сигнал и референтниот влезен сигнал. Обично разликата помеѓу излезниот сигнал и референтниот влезен сигнал се засилува и се користи за контрола на процесот, притоа разликата се намалува. Всушност, разликата помеѓу посакуваниот излез и реалниот излез е еднаква на грешката, којашто се коригира со контролорот. Излезот на контролорот го активира уредот за извршување, за да се промени процесот и со цел да се намали грешката. После извршениот процес, дел од излезот се одзема и се враќа како влезен сигнал до

контролорот и на тој начин се остварува негативна повратна врска. При затворен систем за контрола со повратна врска се мери излезниот сигнал и преку повратната врска се споредува сигналот со посакуваната вредност на излезниот сигнал, како референтен или како наредба. На тој начин затворениот систем за контрола со повратна врска има многу предности во однос на контролата со отворен круг, како што се елиминираат или намалуваат надворешни влијанија и се подобрува точноста на мерењето, како и со цел на намалување на хаотичните електрични осцилации (шумовите или фон).

За таа цел, со дополнителни блокови ги вметнуваме влијанијата и шумовите (електрични) при мерењето. Всушност, овие негативни појави се надворешни влезни сигнали, кои можат да бидат неизбежни во конструкцијата на уредот. Така, на пример, како надворешно влијание може да биде температурата на околината која доведува до промена на параметрите на системот (слика 6.3). Исто така, електрични пречки

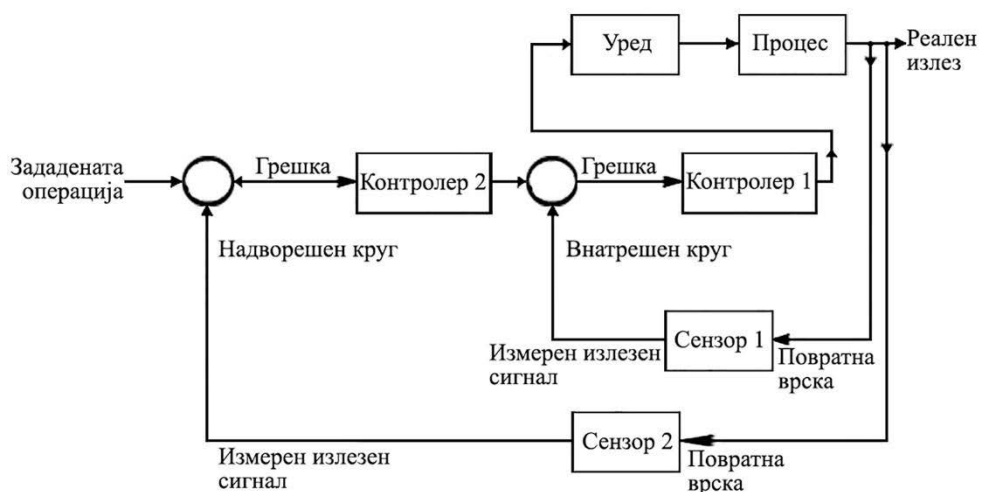


Слика 6.3. Затворен контролен систем со повратна врска, за намалување на шумовите.

(шумови) во форма на хаотични електрични импулси, можат да се должат на некористењето на коаксијални кабли или близина на моќен електомагнетен уред. Надворешните влијанија и мерењето на шумот треба да се земат во обзир во реалните уреди.

Покрај тоа, постојат системи со две повратни врски, при што едната е внатрешен круг, а другата е надворешен круг (слика 6.4). Во двете повратни врски има контролор и сензор. Од интерес е да се проучи затворен систем со една повратна врска, со цел да создаеме за начинот на дејствување и резултатите од неа. На сличен начин би можеле да ја предвидиме и втората повратна врска. Со тек на времето, системите стануваат посложени со меѓусебни врски на повеќе контролирани променливи, кои треба да се земат во обзир во блок-дијаграмот. Перформансите на контролниот систем е големината на грешката e_p , којашто претставува разлика помеѓу постојаната (зададена) вредност на величината или референтната вредност r и добиената вредност после системот c_p , дадено со равенката:

$$e_{(p)} = r - c_{(p)} \quad (6.1.1).$$



Слика 6.4. Затворен контролен систем со две повратни врски.

Бидејќи вредноста на излезната вредност од контролниот систем може да се менува со тек на времето, притоа грешката ќе се менува со тек на времето, но контролниот систем има за цел да ја намали грешката.

6.2. Видови во контролори

Наједноставен пример на контрола е рачна контрола на вентил за пареа, со цел регулирање на температурата на радијаторот во просторија. За време на работата, одговорното лице треба да ја следи температурата на радијаторот. Со помош на термометар, може да се набљудува како се менува температурата на радијаторот. Од отчитување на температурата, одговорното лице ќе преземе соодветно дејство и ќе го прилагоди вентилот за пареа, за да има соодветна вредност температурата на радијаторот. Во зависност од времето за кое се пушта повеќе пареа и температурата на пареата, ќе зависи температурата на радијаторот. Ако температурата ја надмине пропишаната вредност, тогаш одговорниот ќе треба да го затвори вентилот и обратно. Овој пристап со рачна контрола може да биде многу скап, бидејќи се користи работната сила, точноста не може да биде голема во однос на автоматска контрола.

Од друга страна, при користење на автоматска контрола со затворен круг, потребно е елементот за мерење на одредена физичка величина да генерира излезен сигнал којшто може да се регистрира од

даден инструмент. Така, на пример, при контрола на температурата со термометарот, тој може да се замени со термопар којшто е поврзан со контролор, а тој ќе биде поврзан со уредот за извршување, за да се изврши корекција на работата на вентилот за пареа.

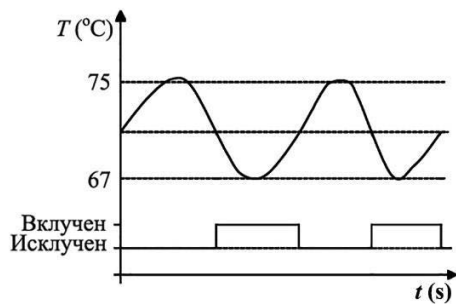
Системите за автоматска контрола можат да бидат:

- контролори со две позиции (вклучено/исклучено),
- линеарни (пропорционални) контролори,
- контролори за интеграција и
- контролори за диференцијација.

Контролорот со две позиции е наједноставниот автоматски елемент за регулација (засилувач, релеј, тиристор, MOSFET транзистор или тријак), којшто го контролира уредот за извршување (грејач, електромотор, вентил итн). Контролорот (елементот за регулација) може да има две положби, да биде отворен (вклучен) или затворен (исклучен). Овие две позиции ќе се менуваат наизменично, а времетраењето во дадена позиција ќе зависи од елементот на извршување и процесот. Така, на пример, температурата на водата во бојлерот се контролира со термостат и работи во две состојби (вклучен или исклучен) (слика 6.5). Термостатот со задоцнување ќе се исклучи, иако температурата ќе ја достигне поставената температура, притоа температурата ќе продолжи да се зголемува над референтната температура. Од друга страна, со исклучување на термостатот температурата на водата во бојлерот се намалува, на

вредност помала од референтната температура и после тоа повторно се вклучува. На тој начин, се добива дека температурата на водата има осцилаторен карактер околу зададена температура што треба да се воспостави. При овој вид контролор треба да се утврдат максималните и минималните вредности на температурата и времето на траење на еден циклус на осцилација. Контролорот со две положби отворен (вклучен) или затворен (исклучен) може да не е доволно за контролирање на уредите, при ненадејни промени и негово изместување од рамнотежата.

Затоа се користат други методи за автоматска контрола, со земање предвид на корекциите на грешките кои се јавуваат. За таа цел се користат, линеарни (пропорционални) контролори, контролори за интеграција и контролори за диференцијација. Овие контролни методи можат да се користат поединечно или во комбинација на две или повеќе,



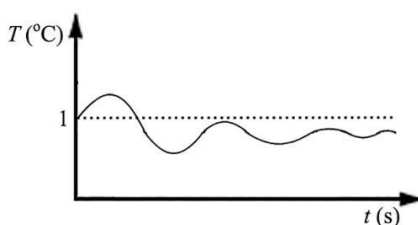
Слика 6.5. Затворен контролен систем со две положби на контролорот (вклучен и исклучен) и промена на температурата на водата.

при примена на автоматска контрола на процесот, во зависност од степенот на контрола.

Друг вид контрола на системот е концептот на пропорционален режим, каде што постои линеарна врска помеѓу излезот на контролорот и грешката (слика 6.6). Во одреден опсег на грешки и во однос на зададената вредност, секоја вредност на грешката има уникатна вредност, при одредена вредност на излезниот сигнал. Меѓутоа, опсегот на грешки на пропорционален режим на работа на контролорот е од 0 % до 100 % и се нарекува подрачје на пропорционалност. Излезниот сигнал p е даден со равенката:

$$p = p_0 + K_p e_p \quad (6.2.1).$$

каде што K_p е коефициент на засилување или осетливост, e_p е грешката што се јавува помеѓу излезниот сигнал и сигналот од контролорот и p_0 е излезниот сигнал без грешка. Оттука, колку е поголема грешката, толку ќе биде поголема корекцијата на сигналот што треба да се примени (слика 6.6).



Дејствувањето на контролорот има осцилаторен карактер којшто со тек на времето се намалува. Покрај тоа, контролираниот сигнал на елементот за

извршување достигнува нова вредност во однос на сигналот од контролорот. Разликата помеѓу оригиналната и новата вредност на рамнотежа се нарекува поместување на нулата. Во случај на моментална грешка, системот реагира со промена на излезот на контролорот, во насока да се изврши враќање на грешката на нула. Ако таа промена се должи на промена на вредноста на моќноста на потрошувачот, тоа ќе предзвика трајна промена во излезот на контролорот, а грешката нема да биде нула. Покрај кореспонденција помеѓу излезот на контролорот и грешката, на излезот на контролорот нема да се постигне нула грешка. На тој начин, системот постојано се поместува и се намалува грешката, при промена на моќноста на потрошувачот.

Грешката за поместување на нулата на пропорционалниот режим се јавува, бидејќи контролорот не може да се прилагоди на промена на моќноста на потрошувачот. Меѓутоа, интегралниот режим на контрола ги елиминира овие недостатоци, притоа контролорот се прилагодува на промените, а на излезот ќе се добие нула грешка. Потребата од интегрално дејство се покажува кога ќе се забележи дека при пропорционална корекција на дејството, грешката не се движи кон нула, со тек на време. Ако системот пројавува некоја грешка, тогаш контролниот систем со интеграција се прави со интеграција на грешката

што се појавува со текот на времето, а потоа нејзино множење (на таа сума) со засилувањето и собирање со моменталниот излезен сигнал на контролорот (слика 6.7). Меѓутоа, ако грешката трае подолг временски период и е позитивна или негативна, тогаш интегралниот контролор ќе ги сумира грешките (интегралот од нив) и новата вредност на сигналот во контролорот е даден со равенката:

$$p_t = p_0 + K_I \int_0^t e_p dt \quad (6.2.2).$$

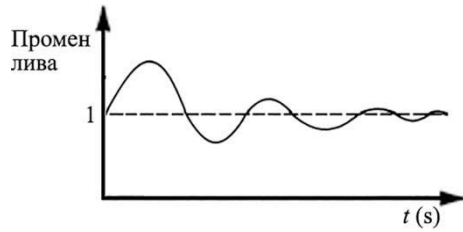
каде што p_0 е излезниот сигнал без грешка, e_p е грешката што се јавува и K_I е коефициент на засилување којшто се изразува како дел од контролиран сигнал во проценти, после одредено време на акумулација на грешката. Од математика е познато дека интеграл на некоја функција во одредени граници се добива површината која е зафатена помеѓу оските. Меѓутоа, функцијата е составена од една постојана компонента претставена со p_0 којшто е излезниот сигнал без грешка и променлива функција, т.е. грешка која се менува со тек на времето и треба да се интегрира (слика 6.7), а добиениот резултат да се помножи со K_I .

Во дадена ситуација може грешката на излезот на почетокот од процесот да биде нула, но грешката драстично да се промени, во текот на времето (слика 6.8). За таа цел, треба системот за контрола да изврши диференцијација на грешката од времето.

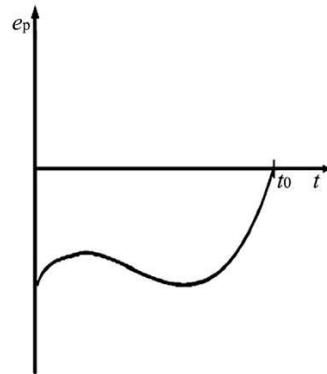
Дејството на контролорот одговара на грешката со која се менува грешката во единица на време, со цел на намалување на грешката, дадено со равенката:

$$p_t = K_D \frac{de_p}{dt} \quad (6.2.3).$$

каде што K_D е коефициент на засилување којшто дава сознание за колку проценти да се промени излезот на контролорот, за секој процент на промена на грешката во единица време. Контролорот за диференцијација се користи само ако има промена со тек на времето, но не и кога грешката е константна. Всушност, од математика се знае дека диференцијал од константа е нула, а за да се одреди максимумот или



Слика 6.7. Промена на температурата на водата во бојлер при затворен контролен систем со интеграција.



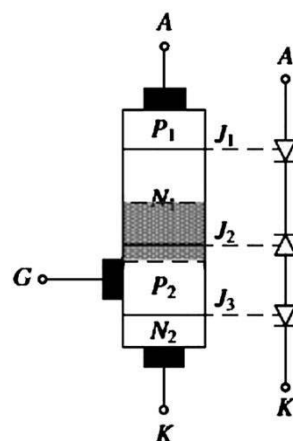
Слика 6.8. Промена на грешката при затворен контролен систем со диференцирање.

минимумот на функцијата, треба првиот извод да се прирамни на нула. Така, на пример, ако земеме дека излезниот сигнал од контролорот не содржи грешка, иако стапката на промена на грешката е 50 %. Кога грешката расте со позитивен наклон, излезниот сигнал се зголемува нагло, а кога грешката не се менува, излезниот напон се враќа на 50 %, што одговара на системска грешка на системот. Додека пак, кога грешката опаѓа, излезниот сигнал дисконтинуирано се намалува. Ако грешката е нула или е константа со текот на времето, тогаш излезот е нула. Ако грешката се менува со времето, овој режим на работа на контролорот придонесува промена на излезниот сигнал за секој процент на промена на грешката за одредено време, дадено во секунди. Современите контролори се композитни контролори, кои во себе содржат пропорционален контролор, контролор за интеграција и контролор за диференцијација, или уште се викаат ПИД (PID) контролори.

6.3. Тиристор и тријак

Во групата на регулирачки елементи спаѓаат тиристорот и тријакот, како прекинувачи на електрично коло. Тиристорот е четирислоен полупроводнички прекинувач кој содржи три p-n премини. Всушност, тиристорот е бистабилен прекинувач којшто не се оштетува при премин од регион со голем отпор кон регион со низок отпор и обратно. Тоа својство го имаат во широк дијапазон на контролирани струи и напони, од неколку милиампери до неколку илјади ампери, како и напони до 10.000 V.

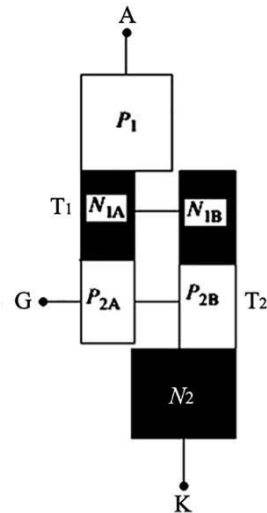
Тиристор е полупроводнички уред составен од четири слоја и три електроди (анода, катода и контролна електрода – порта). Потрошувачот е поврзан во електричниот круг анода – катода, а неговата контрола се врши преку портата (слика 6.9). Тиристор најчесто се користи во електрични кругови со наизменична струја (AC), како исправувач (спроведува само во една насока, како диода) со контролирана стапка на спроводливост, и е познат како силициум контролиран исправувач (SCR). Слоевите кај тиристорот се поставени наизменично, p-тип полупроводник, а после тоа n-тип полупроводник, притоа на првиот n-тип полупроводник е поставена катодата, додека пор-



Слика 6.9. Шематски приказ на тиристор.

тата е поставена на вториот слој од катодата. Слојот M_1 има мала концентрација на донори од 10^{14} до 10^{15} cm^{-3} , при што отпорот е многу голем. Првиот р-тип полупроводник (регион P_1) е емитер на анодата, додека емитер на катодата е првиот n-тип полупроводник (регион M_2), така што тиристорот се состои од три р-п премини.

За да се разбере работата на тиристорот, ќе земеме дека тој е составен од два транзистора, притоа регионот M_1 ќе се подели на два дела, на M_{1A} и на M_{1B} (слика 6.10). На сличен начин и регионот P_2 ќе се подели на два дела, на P_{2A} и на P_{2B} . Бидејќи двата транзистора се поврзани, при што постојат врски помеѓу M_{1A} и M_{1B} , како и P_{2A} и P_{2B} . Оттука, може да се види дека регионите P_1 , M_{1A} и P_{2A} се слоеви од PNP транзистор, а регионите M_{1B} , P_{2B} и M_2 се слоеви од NPN транзистор. Базата на транзисторот T_1 и колекторот на транзисторот T_2 се поврзани заедно, а базата на транзисторот T_2 и колекторот на транзисторот T_1 се поврзани заедно. Исто така, емитерот на транзисторот T_1 е анода на тиристорот, а портата на тиристорот е спојот на колекторот на транзисторот T_1 и базата на транзисторот T_2 . Додека пак, катода на тиристорот е емитерот на транзисторот T_2 .

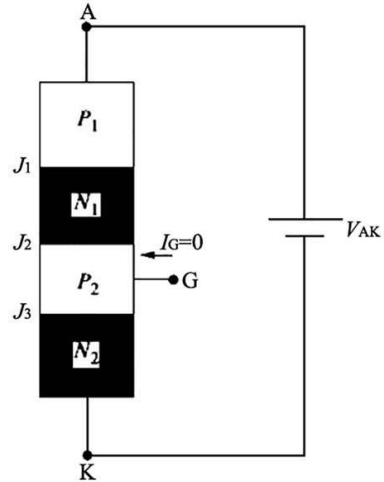


Слика 6.10. Конфигурација на тиристор.

При обратна (инверзна) поларизација на тиристорот, негативниот пол од изворот се сврзува за анодата на тиристорот, а позитивниот пол за катодата на тиристорот, при напон на портата нула. Јачината на струјата при инверзна поларизација на тиристорот е нула, затоа што р-п премините во близина на анодата и катодата се поларизирани во инверзна насока. Струја протекува низ тиристорот при многу високи напони на инверзна поларизација и ќе зависи од отпорот во надворешниот круг, при што доведува до негово пробивање.

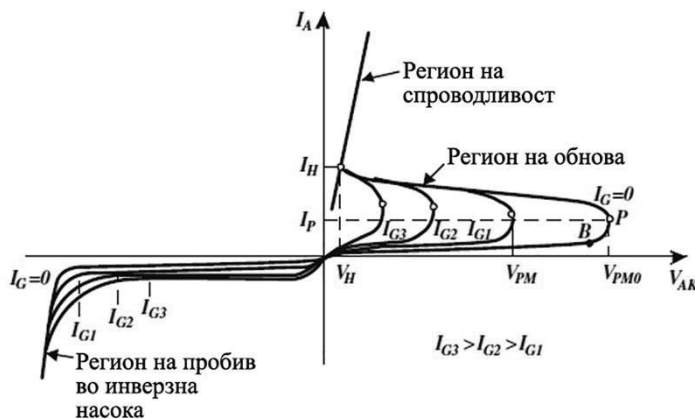
При мали напони на поларизација на тиристорот во пропусна насока, негативниот пол од изворот се сврзува за катодата на тиристорот, а позитивниот пол за анодата на тиристорот, при напон на портата нула. Кога напонот на портата е нула, следува дека напонот на колекторот на транзисторот T_1 и напонот на базата на транзисторот T_2 е нула. Ако напонот на базата на транзисторот T_2 е нула, следува дека струјата на базата на транзисторот T_2 е нула, притоа и струјата на колекторот на транзисторот T_2 е нула. Оттука, следува дека двата транзистори се во состојба на исклучени (OFF), бидејќи низ нив не тече струја (слика 6.11). Имено, при оваа состојба премините J_1 и J_3 се поларизирани во пропусна насока, а преминот J_2 е поларизиран во обратна насока. Со зголемување на напонот помеѓу анода и катода V_{AK}

во пропусна насока, така што при одредена вредност на напон познат како пробивен напон V_{FBO} , тече струја низ тиристорот. Всушност, на преминот J_2 се случува пробив за одреден напон V_{FBO} , при што тече струја низ транзисторите T_1 и T_2 и поминуваат во состојба на вклучување (ON), сè до струја на заситување. Меѓутоа, неочекувано струјата низ тиристорот I_A може да се зголеми до голема вредност и ќе зависи од вредноста на отпорот во надворешниот круг. Затоа, секогаш сервиски се поврзува отпорник помеѓу изворот на прав напон и тиристорот, со цел да не изгори тиристорот или да го оштети изворот на напон. Откако тиристорот ќе помине во спроводна состојба, напонот помеѓу катода и анода се намалува на мала вредност (слика 6.12) и одговара на вклучен прекинувач. Дури и струјата на портата I_G да биде нула, тиристорот (SCR) при зголемување на напонот ќе помине во спроводна состојба (ON) и одговара на вклучен прекинувач, со само мал пад на напон помеѓу анодата и катодата. Способноста на тиристорот (SCR) да спроведува струја дури и кога $I_G = 0$ се нарекува заклучување.



Слика 6.11. Конфигурација на тиристор, при негово поларизирање во пропусна насока.

Од друга страна, кога на портата ќе се донесе позитивен напон во однос на катодата, а тиристорот е поларизиран во пропусна насока, тогаш транзисторот T_2 поминува во спроводна насока, а струјата што тече, е струја на заситување. Во исто време и транзисторот T_1 поминува



Слика 6.12. Карактеристики на тиристор во пропусна и инверзна насока на поларизација.

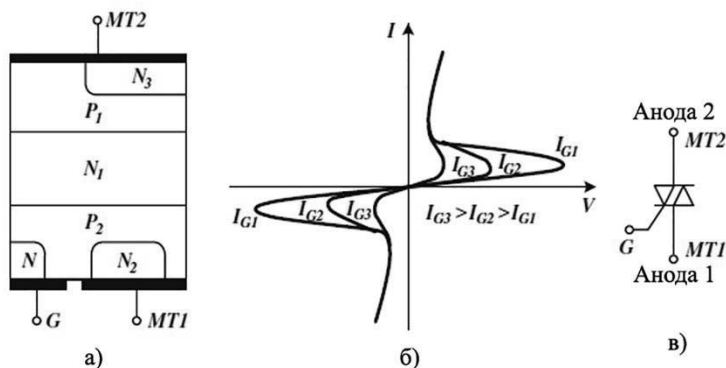
во спроводна состојба, со струја на заситување. Бидејќи транзисторите T_1 и T_2 поминуваат во состојба на заситување, тогаш тиристорот е во состојба вклучен (ON). Со намалување на струјата на портата, тиристорот не може повторно да се префрли во состојба исклучен (OFF). Оттука, се гледа дека портата ја губи контролата на тиристорот (SCR), откако тиристорот ќе помине во состојба на вклучен (ON) или состојба кога низ тиристорот ќе тече голема струја и ја има улогата на затворен прекинувач. Меѓутоа, ако струјата низ тиристорот е под некоја минимална вредност I_H , тогаш тиристорот од спроводлив станува неспроводлив и е во состојба исклучен (OFF).

Оттука, следува дека постојат два региона при што тиристорот е исклучен, при поларизација во пропусна и непропусна насока. Исто така, при поларизација на тиристорот во непропусна насока, тиристорот се пробива при висок напон V_R и се однесува како Зенер диода. При поларизација на тиристорот во пропусна насока и позитивен напон на портата во однос на катодата, тогаш максималната анодна струја ќе зависи од отпорот на потрошувачот, притоа тиристорот не се оштетува. Ако во тиристорот не протекува струја повеќе од пропишаната, тогаш тиристорот е способен за биде вклучен или исклучен прекинувач. Всушност, обично тиристорот може да биде контролор со две состојби, на вклучен и исклучен прекинувач.

6.4. Карактеристики на тријак и дијак

Тиристорот е контролор којшто се употребува за електрични кругови со права струја, бидејќи има несиметрични волт-амперски карактеристики во пропусна и непропусна насока. Меѓутоа, за да се има контрола во двете насоки на струјата, треба два тиристора да се сврзат антипаралелно, притоа едниот да биде во пропусна насока поларизиран, а другиот во инверзна насока поларизиран. Уредот којшто се добива со паралелно поврзување на тиристорите, се вика тријак (слика 6.13а). Во тој случај, наизменичната струја ќе може да тече низ тријакот, а ќе се контролира исклучиво од напонот на портата. Тријакот е прекинувач во двете насоки на струјата, без разлика дали анодата ќе биде на позитивниот или негативниот пол на изворот, а зависи од напонот на портата којшто може да биде позитивен или негативен, или да биде во форма на електрични импулси.

Тријакот спроведува струја во двете насоки, притоа анодата е означена како главна електрода 2 (MT2) или анода 2, додека катодата како главна електрода 1 (MT1) или анода 1. Двете електроди за портата се поврзани заедно, во една единствена електрода и е изведена кон



Слика 6.13. Тријак: а) шематски приказ, б) волт-амперски карактеристики и в) симбол за тријак.

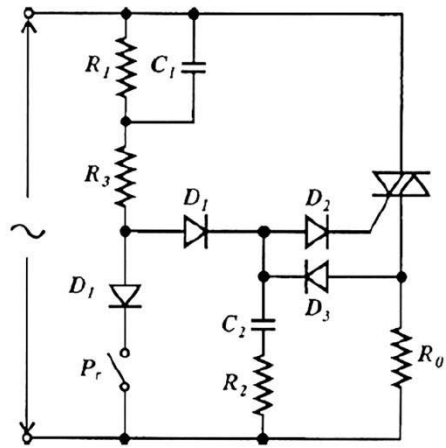
надвор (G). Електродата 1 (MT1) се зема како референтна електрода, во однос на која се одредува напонот на портата и напонот на електродата 2 (слика 6.13в). Тријакот е четирислоен уред со три електроди и служи како прекинувач во двете насоки на струјата. Во зависност од напонот помеѓу портата G и електродата 1 се менуваат волт-амперските карактеристики на тријакот, во двете насоки (слика 6.13б). Електродата на портата G остварува омски контакти со p-n полупроводниците, што овозможува активирање на тријакот, при позитивни и негативни напони или импулси, т.е. течење на струја низ тријакот. Од сликата 6.13 се гледа дека регионите $P_1N_1P_2N_2$ формираат еден тиристор (SCR), а регионите $P_2N_1P_1N_3$ го формираат вториот тиристор (SCR).

Во случај кога MT2 е на поголем напон во однос на MT1 и на портата се донесува позитивен напон (или импулс) во однос на електродата MT1, тогаш струјата тече низ тиристорот (SCR) – $P_1N_1P_2N_2$. Кога напонот на MT2 е помал (негативен) во однос на MT1 и се донесува негативен напон на портата, тогаш тиристорот спроведува струја (SCR) – $P_2N_1P_1N_3$ (слика 6.13а и б). Голем недостаток на тријакот е што спроведува струја при различни напони на портата, за време на секоја половина од периодата, што доведува до генерирање на виши хармоници.

Поради нелинеарните карактеристики на тријакот, активирањето на TRIAC за време на полуциклус може да предизвика нагли промени во струјата и појава на електрични осцилации (шумови) кои можат да се отстранат со филтри. Меѓутоа, примената на тријакот како прекинувач во кола каде потрошувачот има голема моќност, тогаш овие филтри можат да станат габаритни и скапи. За таа цел, електричните шумови се отстрануваат со дизајнирање на активирачко коло за вклучување на TRIAC.

Активирањето на тријакот треба да се случи при премин на напонот на портата низ вредност нула. Всушност напонот на портата

претходи на напонот на главните електроди, заради електричниот круг од отпорници и кондензатори, т.е. RC константата (слика 6.14). За време на позитивната полупериода на наизменичниот напон тече струја низ отпорите R_1 и R_3 , притоа преку диодите D_1 и D_2 напонот на портата на тријакот е позитивен. Од друга страна, на отпорникот R_1 ќе се јави пад на напонот којшто ќе доведе до полнење на кондензаторот C_1 . Затоа, мали напони се јавуваат на портата и при отворен прекинувач P_r . Активирањето на тријакот или течење на струја низ него ќе се случи при мал напон, преку празнење на кондензаторот C_1 . Додека пак, за време на негативната полупериода на наизменичната струја полнењето на кондензаторот C_2 се одвива преку диодата D_3 . После тоа, додека влезниот напон се намалува, диодата D_3 ќе биде поларизирана во непропусна насока и нема да тече струја низ неа, а кондензаторот C_2 ќе се испразни преку диодата D_2 која ќе биде поларизирана во пропусна насока. На тој начин, кондензаторот C_2 обезбедува струја на портата, при што тријакот останува во спроводна состојба и за време на негативната полупериода на наизменичната струја на долниот вод, дури и ако во меѓувреме прекинувачот P_r е вклучен. Оттука, следува дека тријакот ќе спроведува цел број циклуси. На тој начин,

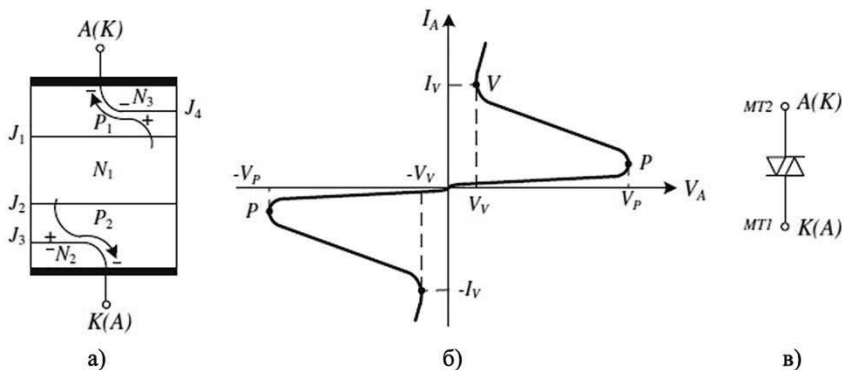


Слика 6.14. Активирање на тријак вклучувањето и исклучувањето на при нула премин на напонот. тријакот е можно за време на позитивните полупериоди на портата на тријакот.

Во денешно време се применува тријак во интегрирана техника, којшто се активира при поминување на напонот низ нула вредност. Со овие измени, нивната примена значително се поедноставува во контролните кола од тиристори (SCRs и TRIACs). Тријакот се користи за намалување на светлината од електричните светилки, електрична контрола на брзината на вентилаторот, контроли на електромотори и други контроли на мали апарати во домаќинствата што работат на наизменична струја.

Покрај тоа, постојат диодни тиристори или дијаки кои се регенеративни прекинувачи со две електроди. Пробивниот напон на дадена компонента е фиксен, и е определен со напон на пробив на главниот p-n премин, слично како кај тиристор со отворена порта. Диодните тиристори се четирислојни уреди и се делат на едностранни и билатерални. Уредот може да се вклучи (ON) или исклучи (OFF) со

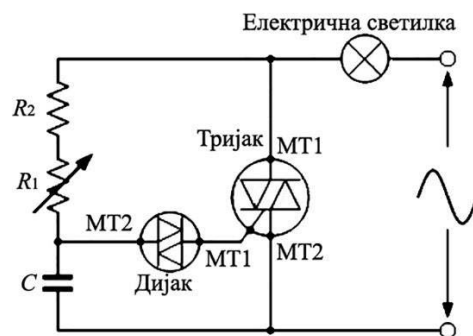
електричен сигнал или промена на поларитетот на напојување со струја. Диодите тиристори се лавински диоди кои се поврзани антипаралелно и спроведуваат струја при мали пробивни напони (V_{BO}). Дијакот е хомогено допингуван четирислоен уред (pnpn), којшто има електроди MT1 и MT2,



Слика 6.15. Дијак: а) шематски приказ, б) волт-амперски карактеристики и в) симбол за дијак.

и симетрична волт-амперска карактеристика (слика 6.15). Во случај кога напонот на неговите електроди е мал, низ уредот тече само инверзна струја која може да се занемари. Кога напонот на електродата MT2 е поголем (позитивен) во однос на MT1 и е доволно голем за да предизвика пробив, тогаш едната диода е вклучена (ON) (слика 6.156). Додека пак, кога поларитетот на напонот е обратен, тогаш другата диода ќе спроведува струја. Бидејќи волт-амперската карактеристика на прекинувачот на дијакот е иста во двете насоки на струјата, дијакот се користи за активирање на тријак.

Така, на пример, електричниот круг за контрола на светлината од електрична светилка е даден на слика 6.16. Прагот на палење се прилагодува со прилагодување на отпорникот R_1 . Кога влезниот напон (наизменичниот од градска мрежа) ќе го достигне пробивниот напон, тогаш низ дијакот тече струја и ја поларизира портата на тријакот во пропусна насока, а со тоа го активира тријакот.



Слика 6.16. Промена на интензитетот на светлината на електрична светилка со дијак и тријак.

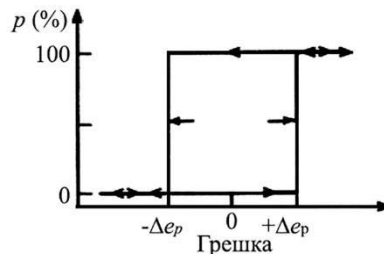
6.5. Автоматска регулација на температурата на вода во сад

Во оваа вежба треба да се изведе автоматска регулација на вода во сад, со затворен контролиран систем со две положби на контролорот (вклучен и исклучен). Овој режим на работа на контролорот е дисконтинуиран, едноставен и најевтин, а излезниот сигнал на процесот е даден со равенката:

$$p_t = \begin{cases} 0\%, & \text{за } e_p < 0 \\ 100\%, & \text{за } e_p > 0 \end{cases} \quad (6.4.1).$$

Оттука, следува дека измерената вредност е помала од зададената, при што контролорот се вклучува, а кога измерената вредност е повеќе од зададената вредност, тогаш контролорот се исклучува. Режимот за контрола со две положби на контролорот е најсоодветен за системи од големи размери, со релативно мала брзина на одвивање на процесот. Така, на пример, при греење на просторија со инвертор, тој се вклучува кога температурата ќе падне под зададената вредност и се исклучува кога температурата е над зададената вредност. Всушност, при системот за греење или климатизација, капацитетот на системот е многу голем во однос на волуменот на воздухот на просторијата, а вкупниот ефект на грејачот е релативно мал.

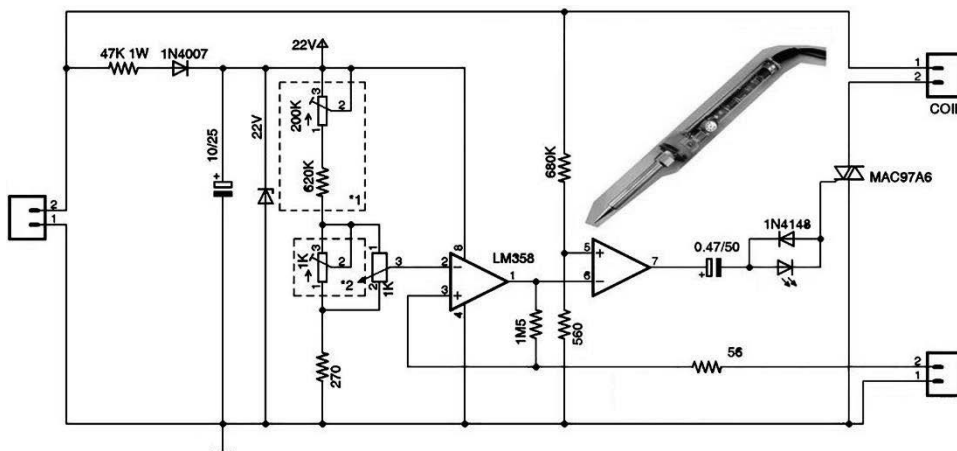
Грешката што се јавува кај контролорот со две позиции се зголемува, сосема малку над нула за вредност Δe_p , тогаш состојбата на излезниот сигнал не се менува. Додека, ако падне грешката под нула, за вредност Δe_p , тогаш грешката останува нула (слика 6.17). За грешка во опсег $2\Delta e_p$ не се случува промена на контролорот и се вика неутрална зона или диференцијална ширина. Во овој опсег излезниот сигнал останува на 100 %, притоа контролорот е исклучен затоа што грешката е нула. Всушност, тоа е интервалот кога излезниот сигнал го постигнува саканото ниво и контролорот не дава излезен сигнал. Од кривата се гледа дека неутрална зона доведува до постоење на непотребна хистереза во системот.



Слика 6.17. Хистерезис на контролорот при затворен контролен систем со две положби на контролорот (вклучен и исклучен).

Температурата е една од најважните величини кои треба да се контролираат, затоа што од неа зависат голем број други физички величини. Пример за контролор со две положби е применет во изработката на електронски леткум (слика 6.18). Контролата на температурата се врши со термистор, уред којшто го менува отпорот со

температурата. Во оваа шема термисторот има улога на сензор на температурата на леткумот. Како контролор се користат два операциски засилувачи како компаратори и тријак кој служи за вклучување на грејачот во леткумот. Во моментот кога ќе биде во спроводна состојба, ќе светне црвената лед диода. Потенциометарот од 1 кΩ служи за дотерување на напонот на компараторот, а со тоа и температурата на леткумот.

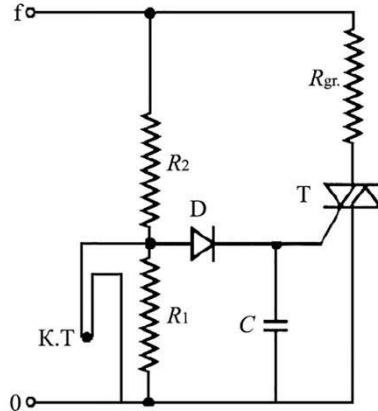


Слика 6.18. Електронска шема на леткум, со контролор со две положби.

Пред да се направи контролор во две положби со користење на тријак, треба да се одредат волт-амперските карактеристики на тријакот, притоа електродата MT1 е поврзана на нулата на градска мрежа, а како потрошувач ќе се користи лампа од 30 W која е поврзана сериски со електродата MT2 и со фазата од градска мрежа. Лампата ќе ја ограничи струјата што ќе тече низ тријакот и ќе може визуелно да се оцени кога тријакот е во спроводна состојба, а измерените вредности на волт-амперската карактеристика се запишуваат во табела. Во моментот кога лампата ќе засвети, тогаш тријакот е во спроводна состојба. За одредување на волт-амперските карактеристики на тријакот, на портата се носи позитивен прав напон и за секој напон се отчитува струјата. При зголемување на струјата, за одредена негова вредност ќе светне светилката, при што се забележува јачината на струјата. Потоа се продолжува со растењето на струјата, за неколку поголеми вредности на напонот на портата при што нема да се промени интензитетот на светлината. Истото се прави и при намалување на струјата, при што се забележува струјата, пред да се изгасне светилката.

Целта на оваа вежба е да се направи автоматска регулација на температурата на систем (вода во сад). Како сензорски елемент ќе се употреби контактен термометар кој се користи во лабораториските уреди (слика 6.19). Како контролор (регулирачки елемент) ќе се употреби тријак, а за работен елемент (уред за извршување) ќе биде

електричен грејач од 1,5 kW. Контактниот термометар е во исто време и контактен термички релеј и има две положби на затворен и отворен прекинувач. Термометарот е споен во електричен круг со отпорник и ќе го затвори кругот, при постигнување на задената температура. На тој начин, напонот на портата на тријакот е на напон нула (слика 6.19), што доведува тријакот да биде во неспроводна состојба. Оттука, следува дека со ширење на волуменот на живата се воспоставува контакт со електричниот круг, а тоа значи дека напонот на диодата и портата ќе биде нула. Од друга страна, наместо контактен термометар може да се направи контролор со термистор, со примена на дијак и тријак, слично на колото за регулација на интензитет на светлината, како на слика 6.16. Во тој случај треба да се одреди зависноста на отпорот од температурата.



Слика 6.19. Електронска шема на контролор со контактен термометар, за загревање на вода во сад.

Струјата што ќе тече низ портата на тријакот ќе зависи од отпорникот R_2 и отпорникот R_1 (слика 6.19). Од друга страна, напонот на контактниот термометар не треба да биде поголем од 10 V за да не се оштети истиот. Оттука, следува дека:

$$V = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2) \quad (6.4.2).$$

$$V_1 = V - IR_2 = V - \frac{V}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{220}{R_1 + R_2} R_1 = 10 \text{ V} \quad (6.4.3).$$

$$R_1 = \frac{10R_2}{210} = \frac{1}{21} R_2 \quad (6.4.4).$$

Во текот на мерењата на волт-амперските карактеристики се забележува дека при течење на струја од 16 mA низ портата на тријак ВТА16-600В, тријакот поминува во спроводна состојба. Од последната равенка следува дека може да се земе дека максималната струја што тече низ отпорникот R_2 , треба да биде 17 mA, бидејќи отпорот на отпорникот R_1 е 21 пати поголем. Отпорот на отпорникот R_2 е даден со равенката:

$$R_2 = \frac{220}{17 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 13 \text{ k}\Omega \quad (6.4.4).$$

Покрај тоа, струјата што тече низ отпорникот R_2 е 17 милиампери што ќе доведе до загревање на отпорникот. Затоа, моќноста на отпорникот R_2 треба да биде $P = V \cdot I = 220 \text{ V} \cdot 0.017 \text{ A} \approx 4 \text{ W}$, за да не прегори отпорникот. Печатеното електрично коло од слика 6.19 се прави со методот на литографија, со термална хартија. Имено, водовите од слика

6.19 се цртаат на лист хартија, се фотографираат со мобилен телефон и се пренесуваат на компјутер. Исто така, може водовите да се нацртаат на компјутер и да се испечатат на термална хартија со ласерски принтер. Потоа хартијата се залепува на каширан пертинакс со помош на ламинатор или пегла при температура од 160 °C. После тоа, се одлепува термалната хартија, а на бакарната плоча од каширан пертинакс остануваат водовите, од тонерот на ласерскиот принтер. Потоа се пристапува кон нагизување на бакарната плочка, методата е опишана во глава 4. Елементите од слика 6.19 се поставуваат на печатено електронско коло, а на тријакот се поставува тенка бакарна плочка за одведување на топлината за да се спречи прегревање на тријакот. За контрола на течење на струја низ грејачот се поврзува тињалица, паралелно на него. Во еден сад се става вода и поставува грејачот, а во непосредна близина на грејачот е контактниот термометар. Со вклучување на колото, засветува тињалицата, температурата на водата расте и во даден момент ќе се направи контакт на живата со електрода сврзана со нулата. Во тој момент, кога температурата ќе достигне 60 °C, се исклучува тријакот бидејќи напонот на портата е нула, а според тоа и струјата низ портата е нула. Иако, тријакот е исклучен, температурата на водата се зголемува и во даден момент ќе ја достигне максималната температура. После тоа, температурата опаѓа и во моментот кога ќе биде помала од 60 °C, повторно ќе се вклучи грејачот. Ако се земе во обзир дека моќноста на грејачот е 1,5 kW, а загубите на колото поради загревање на отпорникот R_2 се 4 W, што е занемарливо во однос на моќноста на грејачот.

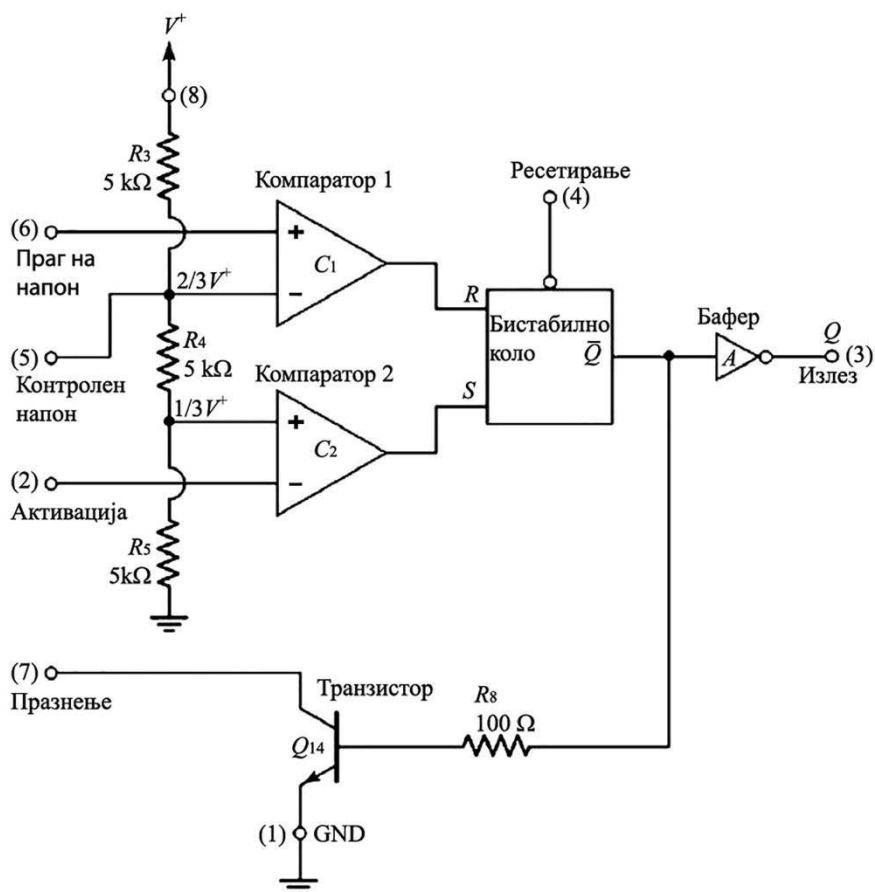
7. ПОСЕБНИ ЕЛЕКТРОНСКИ УРЕДИ

Одредени електронски уреди се неопходни во конструкција на електронските уреди. Во зависност од уредот, како што се генератори на функции, осцилоскопи, мултиметри, контролори или некој друг уред, тие обично содржат тајмери, уред за аналого-дигитална конверзија, напонски осцилатори, уред за активација на одредено коло и друго. Затоа, во оваа глава целта е да се проучат неколку посебни уреди кои се составен дел на модерните уреди, било да се аналогни или дигитални.

7.1. Тајмер (временско процесирање) 555

Тајмерот 555 е интегрално коло за прв пат е објавен од страна на корпорација за знаци во 1972 година, во биполарна технологија. Ова интегрално коло набрзина стана стандард за временски функции и осцилации. Во денешно време се произведуваат интегрални кола 555 во CMOS (комплементарен метал-оксид-полупроводник) технологија, и се користи за прецизно процесирање на времето, генерирање импулс, последователно процесирање на времето, генерирање на временско одложување, модулација со ширина на импулс, модулација на импулсна позиција и генерирање на линеарна рампа. Интегралното коло за временско процесирање 555 може да работи во нестабилен и во едностабилен режим, со временски импулси кои се движат од микросекунди до часови. Интегралното коло 555 може да го прилагоди работниот циклус според потребите на електронското коло. Во режим на осцилатор потребни се три или повеќе надворешни компоненти, во зависност од брановата форма на посакуваниот излезен напон, а работната фреквенција може да биде во опсег од 1 Hz до 500 kHz, со работни циклуси од 1 % до 99 %.

Блок дијаграм на интегралното коло 555 е даден на слика 7.1 и се состои од два компаратори, кои се раководени од *RS* бистабилно коло (флип-флоп), бафер (коло за инверзија) и транзистор што го испразнува надворешниот кондензатор за контрола на времето. Бафер е уред чијшто излезен напон зависи од влезниот напон, притоа влезниот отпор му е огромен, така што не може влезниот сигнал да влијае на излезот.



Слика 7.1. Електронска шема на интегралното коло на тајмер 555.

Додека RS бистабилното коло е дигитално коло кое има два влеза R и S . Кога напонот на влезот R има голема вредност, а напонот на влезот S мала вредност, тогаш излезниот напон \bar{Q} е голем. Од друга страна, кога напонот на влезот R има мала вредност и напонот на влезот S има висока вредност, тогаш напонот на излезот \bar{Q} има мала вредност. Додека пак, ако напоните на влезовите R и S имаат мала вредност, тогаш излезниот напон \bar{Q} останува во претходната состојба (табела 7.1).

S	R	Q	\bar{Q}	Состојба
0	0	Q	\bar{Q}	Нема промена
0	1	0	1	Ресетирање
1	0	1	0	Поставување во одредена состојба

Компараторот 1 е компаратор којшто го одредува прагот на напонот, притоа неговиот влез се споредува со внатрешен референтен напон, поставен

Табела 7.1. Поведение на бистабилното коло (флип-флоп) при различни влезни напони.

на $\left(\frac{2}{3}\right) \cdot V^+$ преку делителот на напон R_3 , R_4 и R_5 . Од сликата 7.1 се гледа

дека отпорите R_4 и R_5 се сериски поврзани, и претставуваат $2/3$ од целиот напон за напојување V^+ . Кога влезниот напон е поголем од референтната вредност на напонот, тогаш компараторот C_1 има голема вредност, со што се добива голема вредност на влезот R на бистабилното коло, а со тоа и голема вредност на излезниот напон \bar{Q} , од бистабилното коло. Голема вредност на излезниот напон од бистабилното коло ја поларизира базата на транзисторот позитивно, така што тој поминува во спроводна состојба. Тоа доведува до празнење на надворешниот кондензатор (не е прикажан на слика 7.1), а со тоа и го одредува времето за кое ќе трае импулсот. Исто така, во точката помеѓу отпорите R_3 и R_4 е поврзан контролниот напон, со извлекување на надворешен вод. Тоа обезбедува надворешна контрола на референтното ниво на напонот, доколку треба да се измени временскиот период. Кога не е во активна употреба, овој вод треба да се поврзе со заземјувањето преку кондензатор од 10 nF за да се намалат електричните шумови во колото.

Од друга страна, компараторот 2 таканаречен компаратор на активирањето, го споредува неговиот влезен напон за активирање на електричното коло со внатрешниот референтен напон којшто изнесува

$\left(\frac{1}{3}\right) \cdot V^+$, од напонскиот делител на напон, т.е. точката помеѓу отпорите

R_5 и R_4 . Кога вредноста на напонот за активација е под вредноста на вредноста на референтниот напон, тогаш излезниот напон на компараторот 2 се зголемува, што доведува до ресетирање на бистабилното коло (повторно враќање на бистабилното коло на почетокот). Во тој случај, излезниот напон \bar{Q} се намалува, така што напонот на базата на транзисторот станува нула и со тоа транзисторот поминува во неспроводна состојба и празнењето на кондензаторот се прекинува. Всушност, компараторот 2 се активира на предниот раб на негативниот импулс на неговиот влез.

Состојбата на излезот на интегралното коло 555 зависи од излезниот напон на \bar{Q} , на RS флип-флопот. Излезниот напон од бистабилното коло и транзисторот се поврзани преку баферот во пуш-пул врска и генерално е способен за снабдување со струја со јачина од 200 mA. Кога надворешен влезен напон за ресетирање на RS флип-флопот ги надминува сите други влезни напони, тогаш започнува нов циклус на времетраење на импулсот, со вклучување на транзисторот за празнење на кондензаторот. Меѓутоа, влезниот напон за ресетирање (враќање на почетната состојба) мора да биде помал од 0,4 V за да започне ресетирање, а кога не се користи активно, тогаш влезот за

ресетирање треба да биде поврзан со V^+ , за да се спречи лажно ресетирање.

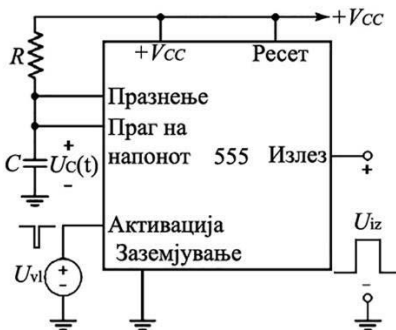
7.2. Моностабилен и астабилен мултивибратор

Моностабилен мултивибратор дава еден импулс и неговата работа зависи од полнењето на кондензатор, т.е струјата што тече за негово полнење која е одредена од надворешен отпорник. Вкупниот временски интервал го содржи и потребното време за полнење на кондензаторот (слика 7.2). При голем влезен напон на водот за активирањето на тајмерот, излезот на компараторот на активирањето е мал, излезниот напон на флип-флопот \bar{Q} е висок. Тоа доведува до спроводливост на транзисторот и празнење на кондензаторот C за одредено време, сè додека напонот не се намали на нула (напон на заземјувањето). Во тој случај, излезниот напон на колото 555 е мал, и е во состојба на мирување после еден импулс.

Додека пак, при примена на импулс чиј напон се намалува на влезот за активација, излезниот напон од компараторот поврзан со влезот за активирање има големи вредности, при вредности на напонот помали од $1/3 V^+$. Тоа доведува да напон од бистабилното коло \bar{Q} да има мали вредности, а тоа предизвикува излезниот напон од тајмерот 555 да има позитивна вредност, при што транзисторот станува неспроводен и празнењето на кондензаторот се прекинува. Излезниот напон на тајмерот 555 останува висок дури и при враќање на напонот на импулсот за активирање на почетната висока вредност, бидејќи влезниот напон на водот за ресетирање на флип-флопот е сè уште мал. За тоа време кондензаторот C се полни експоненцијално, до напонот на изворот V^+ , преку отпорникот R . Во тој случај, напонот на кондензаторот е даден со равенката:

$$V_C(t) = V^+ \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (7.2.1).$$

Од друга страна, кога $V_C(t) = (2/3) V^+$, излезниот напон на компараторот поврзан со праг на напонот има високи вредности, со што се ресетира флип-флопот. Исто така, излезниот напон од бистабилното коло \bar{Q} има



Слика 7.2. Моностабилен мултивибратор изработен со електричен круг на тајмер 555.

голема вредност, а излезниот напон на тајмерот 555 е на ниско ниво. Големата вредност на излезниот напон \bar{Q} на бистабилното коло прави базата на транзисторот да е на негативен напон, притоа транзисторот станува спроводлив и кондензаторот се празни до нула потенцијал. На тој начин колото се враќа во првобитната состојба. Ширината на излезниот импулс се одредува од равенката 7.2.1, при што $V_C(t) = (2/3)V^+$ и $t = T$, дадено со равенката:

$$\left(\frac{2}{3}\right)V^+ = V^+ \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (7.2.2),$$

$$\frac{1}{3} = e^{-\frac{t}{RC}} \quad (7.2.3).$$

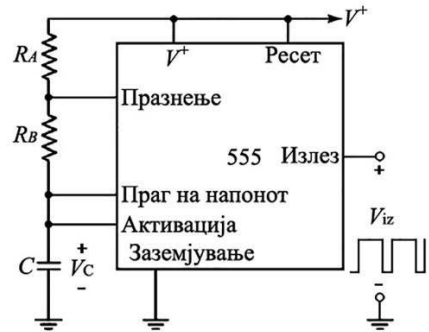
Оттука, за периодот на осцилации се добива:

$$T = RC \cdot \ln(3) = 1,1 \cdot RC \quad (7.2.4).$$

Фреквенцијата на излезниот импулс е функција од надворешната временска константа RC , не зависи од напонот на напојување V^+ и параметрите на внатрешното коло. Покрај тоа, импулсот за активирање на тајмерот треба да биде со пократко времетраење отколку периодот T на излезниот импулс. Големината на излезниот импулс е функција на V^+ , којшто служи за напојување на колата во тајмерот. За тајмер 555 изработен во биполарна технологија, амплитудата на излезниот импулс е 1,7 V под напонот на напојување V^+ . Во случај кога излезниот напон е голем и кондензаторот за мерење на времето се полни, друг импулсен влезен напон за активација нема да влијае на колото. Колото може да се ресетира во текот на овој период, со примена на мал влез на терминалот за ресетирање, тогаш излезниот напон ќе биде нула. Во оваа состојба на мирување тајмерот ќе остане сè додека не се примени друг импулс за активација.

Друг вид мултивибратор е астабилен (нестабилан) мултивибратор, каде што тајмерот 555 се поврзува како слика 7.3. Ваквиот мултивибратор е уште наречен тајмер коло или часовник. Водовите за прагот на напонот и влезниот напон за активација се поврзани заедно. Во стабилен режим, кондензаторот за време C се полни преку $R_A = R_B$ сè додека $V_C(t)$ не достигне $(2/3)V^+$. Во тој случај, излезниот напон на компараторот, на којшто е приклучен водот за праг на напонот, да има големи вредности, што доведува излезниот напон на флип-флопот \bar{Q} да има голема вредност. Тоа од друга страна доведува транзисторот да биде спроводлив, а кондензаторот C за време се празни, преку

отпорникот R_B и транзисторот. Напонот на краевите на кондензаторот C се намалува додека не достигне $(1/3)V^+$, во кој момент се вклучува компараторот на којшто е приклучен водот за активирање, притоа излезниот напон на бистабилното коло \bar{Q} има мала вредност. Тоа доведува до прекин на спроводливоста (се исклучува) на транзисторот, а кондензаторот за мерење на времето започнува да се полни. Кога напонот $V_C(t)$ на кондензаторот ќе го достигне прагот од $(2/3)V^+$, циклусот се повторува.



Слика 7.3. Астабилен мулти-вibrator изработен со електричен круг на тајмер 555.

При полнење на кондензаторот за време, во временски интервал $0 < t < T_C$, напонот на кондензаторот е даден со равенката:

$$V_C(t) = \frac{1}{3}V^+ + \frac{2}{3}V^+ \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_A}} \right) \quad (7.2.5),$$

каде што $\tau_A = (R_A + R_B) \cdot C$. Напонот на кондензаторот го достигнува нивото на прагот за време $t = T_C$, дадено со равенката:

$$V_C(T_C) = \frac{2}{3}V^+ = \frac{1}{3}V^+ + \frac{2}{3}V^+ + \frac{2}{3}V^+ \cdot \left(e^{-\frac{T_C}{\tau_A}} \right) = V^+ - \frac{2}{3}V^+ e^{-\frac{T_C}{\tau_A}} \quad (7.2.6),$$

$$\frac{2}{3}V^+ = V^+ - \frac{2}{3}V^+ \cdot \left(\frac{1}{e^{\frac{T_C}{\tau_A}}} \right) \quad (7.2.7),$$

$$\frac{1}{3}V^+ = \frac{2}{3}V^+ \frac{1}{e^{\frac{T_C}{\tau_A}}} \quad (7.2.8),$$

$$e^{\frac{T_C}{\tau_A}} = 2 \quad (7.2.9),$$

$$T_C = \tau_A \ln(2) = 0,693 \cdot (R_A + R_B) \cdot C \quad (7.2.10).$$

Додека пак, за време на празнење на кондензаторот за време $0 < t' < T_D$, напонот на кондензаторот е даден со равенката:

$$V_C(t') = \frac{2}{3}V^+ e^{-\frac{t'}{\tau_A}} \quad (7.2.11),$$

каде што $\tau_B = R_B \cdot C$, за време $t' = T_D$ напонот на кондензаторот паѓа на нивото на активација на тајмерот. Оттука, времето на празнење на кондензаторот е дадено со равенката:

$$\frac{1}{3}V^+ = \frac{2}{3}V^+ e^{-\frac{t}{\tau_A}} \quad (7.2.12),$$

$$1 = \frac{2}{e^{\frac{t}{\tau_A}}} \quad (7.2.13),$$

$$T_D = \tau_B \ln(2) = 0,693 \cdot R_B \cdot C \quad (7.2.14).$$

Оттука, периодот T на осцилации на астабилниот мултивибратор е збир на периодот T_C на полнење на кондензаторот и периодот T_D на празнењето на кондензаторот, а фреквенцијата на осцилација е дадена со равенката:

$$f = \frac{1}{T_C + T_D} = \frac{1}{0,693 \cdot (R_A + 2R_B) \cdot C} \quad (7.2.15).$$

Работниот циклус се дефинира како процент на време кога излезниот напон има голема вредност, за време на еден период на осцилација. Излезниот напон е голем за време T_C на полнењето на кондензаторот, и обратно за време T_D на празнење на кондензаторот, излезниот напон е мал. Работниот циклус е даден со равенката:

$$D = \frac{T_C}{T_C + T_D} \times 100\% = \frac{R_A + R_B}{R_A + 2R_B} \times 100\% \quad (7.2.16).$$

Од последната равенка се добива дека работниот циклус на колото е секогаш поголем од 50 проценти. Во случај кога, $R_A \ll R_B$, работниот циклус е приближно 50 проценти и работниот циклус е 100 проценти за $R_B \ll R_A$.

7.3. Осцилатор контролиран од напон (VCO)

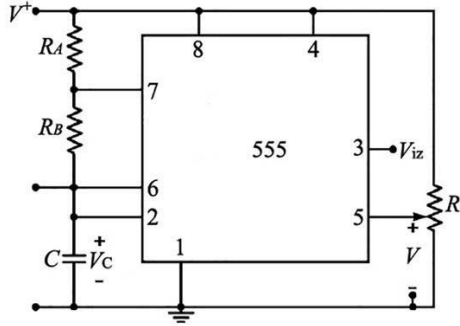
Посебна примена на осцилатор е осцилаторот контролиран од напон (VCO), каде што се применува влезен напон за поставување на фреквенцијата на осцилации на колото. Осцилатор контролиран од напон (VCO) е најупотребувано електрично коло за осцилатор, којшто дава излезен напон со променлива бранова форма. Овој осцилатор обезбедува периодичен сигнал, каде што фреквенцијата на периодичниот сигнал е поврзана со нивото на влезниот напон на контролен сигнал и е пропорционална на влезниот напон, којшто се донесува на колото (VCO).

Осцилатор контролиран од напон (VCO) е основен уред на многу електронски системи, како што се фазно контролирани повратни врски кои може да се најдат во компјутерски тврди дискови, мобилните телефони и други системи. Коефициентот на засилување на осцилаторот контролиран од напон (VCO) е однос на излезната фреквенција и влезниот напон во осцилаторот. Всушност, осцилаторот контролиран од напон (VCO) е интегрално коло, којшто се состои од засилувач со надворешно резонантно коло или целосно интегриран уред со прстенест осцилатор. Покрај тоа, осцилаторот контролиран од напон (VCO) може да има варицап диода, каде што капацитетот на запорниот слој на диодата се менува како функција на контролниот напон, со што се менува капацитетот на целото коло, при што се менува фреквенцијата на осцилаторот.

Осцилаторот контролиран од напон (VCO) е неопходен уред во речиси сите дигитални системи за комуникации. Имено, тој се користи како периферен осцилатор (LO) за генерирање на сигнали кои се користат од потсистемите на предавателите (базните станици) и приемникот, за промена на фреквенцијата нагоре или надолу, соодветно. Така, на пример, во мобилните телефони осцилаторот контролиран од напон (VCO) се користи за воспоставување на фреквенција, во рамките на еден или два фреквентни опсежи. Исто така, осцилаторот контролиран од напон (VCO) се користи за генератор (синтисајзер) на фреквенции во кола за мерење на времето. Од друга страна, високофреквентниот и радиофреквентниот осцилатор контролиран од напон (VCO) може да биде во интегрирана технологија, како LC осцилатори, како осцилатори за релаксација и прстенести осцилатори, се применуваат во радио-телевизиските приемници и уредите за безжична комуникација.

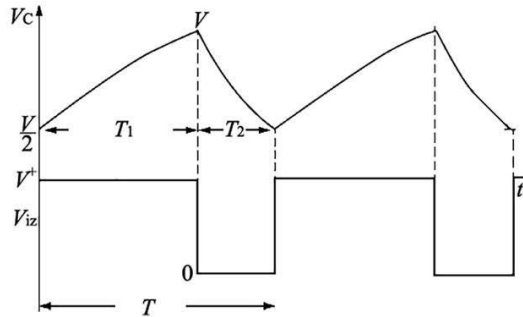
Од претходно видовме дека со извор на струја се полни кондензаторот во тајмерот 555, и со додатни елементи може да се направи струјата да е пропорционална на контролниот влезен напон. Астабилниот мултивибратор е генератор на квадратни импулси со одредена

фреквенција, чија вредност зависи од R_A , R_B и кондензаторот C , во колото. За да се промени фреквенцијата, треба вредностите на отпорите и капацитетот да се променат. Ако астабилниот мултивибратор изработен со тајмер 555 се модифицира, со цел да се промени фреквенцијата на осцилациите со промена на надворешниот напон, тогаш тој се вика осцилаторот контролиран од напон (VCO) или претворац на напон во фреквенција (слика 7.4).



Слика 7.4. Електрично коло на осцилатор контролиран од напон.

Напонот на водот 5 е V , којшто е поврзан со инвертирачкиот влез на компараторот C_1 од тајмерот 555, тогаш напонот на неинвертирачкиот влез на компараторот C_2 е $V/2$. Оттука, C се полни од $V/2$ до V за време на T_1 , а се празни од V до $V/2$ за време на T_2 (слика 7.5).



При полнење на кондензаторот за време на T_1 , напонот на кондензаторот е даден со равенката:

$$V_C(t) = V_f - (V_f - V_i) e^{-\frac{t}{\tau_c}} \quad (7.3.1),$$

$$\text{притоа } V_f = V^+ \text{ и } V_i = \frac{V}{2} \quad (7.3.2),$$

каде што V_f е напонот кога кондензаторот е наполнет и V_i е напон на кондензаторот на почетокот. Со замена во равенката 7.3.1. се добива:

$$V_C(t) = V^+ - \left(V^+ - \frac{V}{2} \right) e^{-\frac{t}{\tau_c}} \quad (7.3.3).$$

За време $t = T_1$ и $V_C = V$ се добива:

$$V = V^+ - \left(V^+ - \frac{V}{2} \right) e^{-\frac{T_1}{\tau_c}} \quad (7.3.4).$$

$$V^+ - V = \left(V^+ - \frac{V}{2} \right) e^{-\frac{T_1}{\tau_c}} \quad (7.3.5).$$

$$V^+ - V = \frac{2V^+ - V}{2} e^{-\frac{t}{\tau_C}} \quad (7.3.6).$$

$$e^{\frac{t}{\tau_C}} = \frac{2V^+ - V}{2(V^+ - V)} \quad (7.3.7).$$

$$T_1 = \tau_C \ln \frac{2V^+ - V}{2(V^+ - V)} = (R_A + R_B) \cdot C \ln \frac{2V^+ - V}{2(V^+ - V)} \quad (7.3.8).$$

Додека пак, времето T_2 ќе зависи од празнењето на кондензаторот, дадено со равенката:

$$V_C(t) = V_f - (V_f - V_i) e^{-\frac{t}{\tau_d}} \quad (7.3.9),$$

$$\text{притоа } V_f = 0 \text{ и } V_i = V \quad (7.3.10).$$

Со замена во равенката 7.3.9. се добива:

$$V_C(t) = 0 - (0 - V) e^{-\frac{t}{\tau_d}} \quad (7.3.11).$$

Оттука за време $t = T_2$ и $V_C = \frac{V}{2}$ се добива:

$$\frac{V}{2} = V e^{-\frac{T_2}{\tau_d}} \quad (7.3.12).$$

$$T_2 = 0,694 \cdot \tau_d = 0,694 \cdot R_B C \quad (7.3.13).$$

Вкупното време на полнење и празнење на кондензаторот е дадено со равенката:

$$T = T_1 + T_2 = (R_A + R_B) \cdot C \cdot \ln \frac{2V^+ - V}{2(V^+ - V)} + 0,694 R_B C \quad (7.3.14).$$

Додека фреквенцијата на осцилирање е дадена со равенката:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(R_A + R_B) \cdot C \cdot \ln \frac{2V^+ - V}{2(V^+ - V)} + 0,694 R_B C} \quad (7.3.15).$$

Фреквенцијата на осцилаторот зависи од вредноста на отпорите R_A и R_B , како и од капацитетот на кондензаторот C , кои можат да се земат за константи. Од друга страна, напонот V зависи од потенциометарот R којшто може да се менува со експоненционална функција, така што фреквенцијата ќе зависи линеарно од напонот V .

8. ОСНОВИ НА МЕРНИТЕ ИНСТРУМЕНТИ

Современите електронски уреди можат да бидат составени од аналогни и дигитални кола. Електронските кола, каде што влезната струја, излезната струја и напонот континуирано се менуваат, се основа за аналогната електроника. Додека, во дигиталната електроника, амплитудите на напонот се фиксирани на дефинирани нивоа, како што се 0 V или 5 V, кои се означуваат како „1“ и „0“, што претставуваат ознака за високо и ниско ниво. Во аналогните системи, конкретно во претвораците од дадени физички параметри во електрични сигнали кои се засилуваат и се носат до другите уреди. Така, на пример, електричните сигнали од сензорите се аналогни. За засилување и прилагодување на аналогниот сигнал користи операциски засилувач (op-amp), во многу уреди.

8.1. Аналогни уреди

Во аналогните уреди се користат аналогни сигнали, каде што со помош на операциски засилувачи се вршат различни операции:

- засилувачи за собирање на два различни сигнали за еднонасочна или наизменична струја,
- компаратори за споредување на сигнали со ниска вредност на напонот на еднонасочна струја и ниска фреквенција за наизменични напони кои можат да се добијат од претвораците на физичките параметри во електрични сигнали, електрични кола со мостови и референтни сигнали, при што може да доведе до грешка на сигналот,
- инструментални засилувачи обично се користат за засилување на наизменичните сигнали со ниско ниво на еднонасочна струја и ниска фреквенција (во опсегот на милivolти) од претвораците на физичките параметри во електрични сигнали. Овие сигнали може да имаат шум од редот на неколку волти,
- засилувачи за кондиционирање на сигналот се користат за линеаризирање на сигналите на трансдуцерот со употреба на логаритамски засилувачи и за упатување сигнали на одредено ниво на напон или струја. Така, на пример, ако излезниот сигнал од

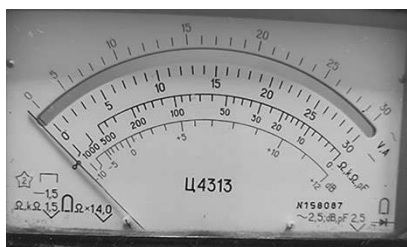
сензорот се движи од -10 mV до $+10\text{ mV}$, за усогласување на овој опсег со ADC со влезен опсег од 0 до 5V бара засилување од 250 и поместување на напонот од $+10\text{ mV}$ пред засилување. Двете функции може лесно да се реализираат со помош на оперативни засилувачи.

- засилувачи за усогласување на излезната импеданса од претворачите на физичките параметри во електрични сигнали со импедансата на следниот уред, и
- примена на операциски засилувачи за интегрирање и диференцирање за добивање на брановидни форми во кола со наизменична струја со ниска фреквенција, со цел менување на електричните сигнали.

При мерење на некоја физичка величина со аналогни инструменти можни се три вида грешки:

- груба грешка,
- систематска грешка и
- случајна грешка.

Грубите грешки се јавуваат поради погрешните отчитувања на инструментите или погрешно отчитување на подрачје на инструментот, погрешно поврзување на инструментот и погрешна равенка за пресметка на конечната вредност. Затоа, за да се направи груба грешка, треба да се направат најмалку две, три или повеќе отчитувања на мерната величина (слика 8.1).



а)



б)



в)



г)

Слика 8.1. Мерење на физичка величина: а) стрелката не е на положба нула, б) стрелката се наоѓа помеѓу два поделци од скалата, в) грешка на паралакса на отчитување и г) точно мерење на физичката величина.

Друг вид грешки се систематските грешки кои остануваат константни или се менуваат според одредено правило, при мерење на

дадената величина. Овие грешки може да се намалат со проценка или со соодветна корекција. Тие можат да бидат инструментална грешка и грешка на околината. Инструменталните грешки се својствени за механичките мерни инструменти. Затоа е потребна нивна калибрација, во случај кога систематската грешка може да даде резултат којшто има помала или поголема вредност на величината од неговата вистинска вредност. Додека пак, грешки кои произлегуваат од околината, можат да се менуваат со текот на времето, без некоја закономерност. Најчеста причина за нив е промената на температурата, затоа во упатството на инструментот е наведена темепературата на негова употреба.

Трет вид грешки се случајните грешки кои се со променлива големина и знак, без некоја закономерност. Тоа е очигледно при добивање на различни резултати при извршени повеќе мерења, на една иста величина. Но, со примена на теоријата на грешки, случајните грешки можат да се сведат на минимум.

Покрај тоа, во аналогните уреди како составни делови се сензорите, зголемување на амплитудата на сигналот (кондицирање), притоа сигналот треба да биде верен на сигналот добиен од сензорот. Сензорот не треба да користи енергија за мерење на дадена физичка величина, ниту да троши енергија од изворот на сигнал оти може да го промени сигналот. Сепак, може да се случи трошење на енергија на изворот на сигнал и појава на изобличување на сигналот. Промената на сигналот може да биде во намалување на неговата амплитуда, изобличување на брановата форма и фазно поместување. Овие промени на влезниот сигнал може да доведат до грешка која се вика грешка на отчитување на сигналот, која може да се должи на електрични и механички импеданси на аналогниот уред. Може грешката на отчитување да се должи и на погрешно приклучување на мерниот инструмент. Така, на пример, ако волтметар се приклучи сериски во електрично коло при мерење на напонот на краевите на потрошувач, тогаш ќе се промени струјата што тече во електричното коло затоа што волтметарот треба да има голем отпор.

Измерената величина со аналоген инструмент се прикажува на екран или вредност отчитана на скала со помош на стрелка, во реално време и непрекинато со тек на времето. Најчесто, аналогните инструменти се уреди за мерење на еднонасочна струја или напон во дадено електрично коло и се состојат од подвижна намотка сместена во постојано магнето поле. Додека пак, за мерење на наизменична струја или напон, треба истите да се претворат во права струја или напон и после тоа се носат на подвижната рака, која взаемнодејствува со надворешното магнетно поле. Аналогните мерни инструменти се класифицираат според големината на измерената величина и принципот на работа. Во основа се користат физички ефекти за мерење на

одредена физичка величина. За таа цел, се користат следните принципи на работа на аналогните инструменти:

1. взаемнодејство на магнетното поле на рамката со надворешното магнетно поле – магнетен ефект,
2. индукција на електрична струја при движење на намотка во магнетното поле – електромагнетниот ефект,
3. придвижување на рамката поради заемнодејство на полнежите на рамката и полнежите на статичното електрично поле – електростатски ефект и
4. појава на термоелектромоторна сила кај термопар или термостолб – термоелектричен ефект.

Подвижната рамка се отклонува од рамнотежната состојба поради појава на момент на сила, помеѓу рамката и надворешното поле. Аналогните инструменти според намената можат да бидат апсолутни и секундарни инструменти. Апсолутните инструменти ја даваат вредноста на величина што треба да се измери во однос на константите кои го карактеризираат инструментот, притоа не е потребна негова калибрација. Така, на пример, тангентниот галванометар ја дава вредноста на струјата што треба да тече низ намотката за да се јави нејзино отклонување со хоризонталната компонента на магнетното поле на Земјата. Од друга страна, секундарните аналогни инструменти се користат за мерење на вредноста на струјата, напонот или другата величина, со отчитување на отклонот на стрелката на инструментот, при претходна негова калибрација со споредување со калибриран инструмент или со апсолутен инструмент. Покрај тоа, аналогните секундарни инструменти се користат како:

1. индикаторски инструменти,
2. инструменти за снимање, и
3. интегрирачки инструменти.

Индикаторските инструменти се користат за мерење на големината на величината што се мери, во даден момент. Инструментите за снимање ја мерат величината континуирано во даден временски интервал. Обично, промените на величината што се мери, се запишуваат со перо (пенкало прикачено на подвижниот систем на инструментот) на лист хартија, што се движи нормално на перото. Меѓутоа, ако имаме две физички величини кои треба да се измерат истовремено, притоа едната величина зависи од другата, тогаш со континуирана промена на едната величина се добива крива на зависноста на другата величина, при одредени услови на мерењето. Додека пак, интегрирачките инструменти ги запишуваат вредностите на величините во одреден временски период. Збирот на тие вредности на дадена физичка величина е производ од времето и електричната величина, т.е. се врши интеграција на зависноста на физичката величина од времето. Типичен пример за

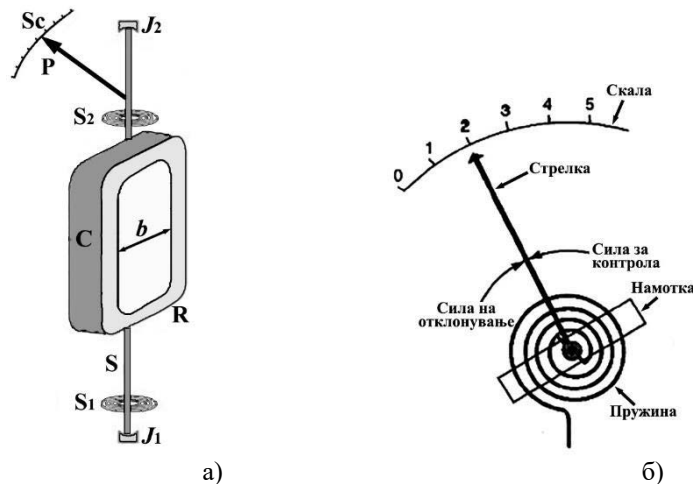
интегрирачки инструмент е електричното броило коешто ја дава потрошената електрична енергија (во киловат часови).

8.2. Аналоген инструмент со подвижна намотка во постојано магнетно поле

За конструкција на аналоген инструмент потребни се три типа моменти на сила, за работа на инструментите со стрелка:

- момент на сила на намотката, како резултат на заемно дејство на магнетното поле на намотката и надворешното магнетно поле (вртлив момент),
- контролен (вртлив момент), и
- момент на сила при придушување.

Во принцип, инструментот се состои од подвижна намотка која се движи во постојан магнет, притоа моментот на силата што дејствува на намотката зависи од струјата што тече низ неа. При течење на струја низ намотката (C) се создава магнетно поле во внатрешноста на намотката, кое взаемнодејствува со надворешното магнетно поле. Намотката има голем број навивки, електрично изолирани помеѓу себе и се поставени на правоаголна алуминиска рамка (R) (слика 8.2). Целиот



Слика 8.2. Подвижни делови на аналоген инструмент со подвижна намотка во постојано магнетно поле: а) конструкција на подвижната рамка и б) целиот систем на контрола на движењето на рамката.

подвижен систем е направен од материјал со мала тежина, со цел да се намали триењето на лежиштата. Јадрото на рамката служи за засилување на магнетното поле, со намалување на должината на воздушен зјај, а го прави магнетното поле радијално и униформно во

воздушниот зјај. Краевите на рамката завршуваат со осовина (S), која е прицврстена на две лежишта (J_1 и J_2) и на неа имаме прицврстено стрелка (P) од едната страна, а на двете страни се прицврстени еластични метални спирали (S_1 и S_2) кои служат за воспоставување на рамнотежа со моментот на сила. Вредноста на измерената величина се отчитува на скалата (Sc) која претходно е калибрирана (слика 8.3).

Моментот на силата кој предизвикува отклонување на инструментот зависи од магнетната индукција B (густина на магнетниот флукс во воздушниот зјај-Wb/m²), i -струјата што тече во намотката (A), l -ефективна должина намотката долж оската (m), b -ширина на рамката (m) и n -бројот на навивките во намотката. Силата која дејствува на едната страна од намотката е дадена со равенката:

$$F = B \cdot i \cdot l \cdot n \quad (8.2.1).$$

Моментот на силата на која дејствува на едната страна од намотката е дадена со равенката:

$$T = F \cdot \frac{b}{2} = B \cdot i \cdot l \cdot n \cdot \frac{b}{2} \quad (8.2.2).$$

Вкупниот момент на силата на која дејствува за ротација на намотката е даден со равенката:

$$T_d = 2T = B \cdot i \cdot l \cdot n \cdot b \quad (8.2.3).$$

Бидејќи се работи за постојан магнет, тогаш магнетната индукција B е константна величина. Покрај тоа, исто така, за дадена намотка, ефективна должина на намотката во насока на оската, ширина на серпентина и бројот на навивките се константи, дадени со равенката:

$$B \cdot l \cdot n \cdot b = k_1 \quad (8.2.4).$$

Оттука, вкупниот момент на силата на која дејствува за ротација на намотката е даден со равенката:

$$T_d = k_1 \cdot i \quad (8.2.5).$$

Меѓутоа, контролата на движењето на стрелката на скалата се обезбедува со бронзени пружини S_1 и S_2 во форма на спирала, прицврстени на секој крај од осовината S. Исто така, во одредени случаи овие пружини служат за течење на струјата во намотката. Контролниот момент на сила - T_c на пружините е пропорционален на аголот θ , за кој се заротирува намотката на рамката со јадро, даден со равенката:

$$T_c = k_s \cdot \theta \quad (8.2.6),$$

каде што k_s е константа на еластичност на пружината и θ е аголот на вртење на намотката. Во услови на рамнотежа, моментот на силата на



Слика 8.3. Конструкција на аналоген инструмент со подвижна намотка.

ротација на намотката е еднаков на контролниот момент на сила на пружините, дадено со равенките:

$$T_c = T_d \quad (8.2.7),$$

$$k_s \cdot \theta = k_1 \cdot i \quad (8.2.8),$$

$$\theta = \frac{k_1}{k_s} \cdot i = k \cdot i \quad (8.2.9).$$

Бидејќи, аголното отклонување на стрелката е пропорционално на струјата, тогаш скалата на инструментот треба да биде линеарна или рамномерно поделена (слика 8.3). Аналогниот инструмент со подвижна намотка е многу осетлив инструмент, при што струја во опсег од 1 μ A може да е доволно за целосно отклонување на подвижната намотка, т.е. стрелката. Затоа, овој инструмент се применува за мерење на права струја и напон. Осетливоста на инструментот е дадена со равенката:

$$S = \frac{R_m}{V_m} = \frac{1}{I_m} \quad (8.2.1),$$

каде што R_m е вкупниот отпор на подвижната намотка и приложениот напон V , а се изразува во единици Ω/V . Додека пак, I_m е потребната струја за отклонување на стрелката, до крајот на скалата.

Исто така, на алуминиумската рамка (F) со намотката се јавува и момент на сила на амортизација кога таа се движи во магнетното поле на постојаниот магнет, при што се индуцира напон што предизвикува течење на вртложна струја да тече во него. Оваа струја создава сопствено магнетно поле и според Законот на Ленц, се јавува сила која се спротивставува на движењето што го создава. Тоа придонесува за пригушување на движењето на стрелката и брзо отчитување на вредноста на величината. Исто така, отпорот на намотката се менува со температурата. За таа цел, се сврзува отпорник за корекција на отпорот во колото. Бидејќи неговиот отпор е помал од отпорот на намотката и има мала вредност на температурниот коефициент, тогаш отпорот во колото останува ист и зависи од струјата што тече низ намотката.

Предностите на аналогниот инструмент со подвижна намотка во постојано магнетно поле се:

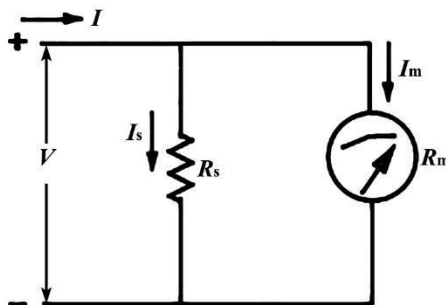
- голема осетливост на мала струја,
- сигурни мерења,
- линеарна скала до 270° ,
- ефикасно пригушување на движењето на стрелката,
- мала потрошувачка на енергија,
- нема хистерезис при мерењето, и
- прилагодување на инструментот на различни големини на измерените величини.

Додека пак, недостатоци на аналогниот инструмент со подвижна намотка во постојано магнетно поле се:

- инструментот може да служи за мерења, каде што тече директна струја. За да врши мерења при наизменична струја, потребни се дополнителни електронски кола,
- подвижниот систем е многу сложен и осетлив на надворешни влијанија, од кои лесно може да се оштети,
- намотката е многу тенка и може да се оштети при течење на голема струја,
- со тек на време може да дојде до промена на еластичноста на пружината, а со тоа и грешки при мерењето.

8.3. Аналоген електричен амперметар за права струја

Првиот амперметар што е направен е инструментот галванометар, којшто се состои од подвижна намотка која се движи во постојан магнет. Во почетокот тој бил инструмент за мерење на мали електрични струи, на прав напон. При течење на струја низ навивките на намотката се создава магнетното поле кое взаемнодејствува со надворешното магнетно поле. Како резултат на тоа се јавува момент на сила, која придонесува за ротација на намотката и стрелката која е прикачена на неа. Аголот за којшто се завртува стрелката, се балансира со моментот на сила на пружините, кој дејствува во обратна насока. Во зависност од течењето на струјата низ намотката ќе се менува аголот на отклонот на стрелката на скалата (слика 8.3). Од отпорот на навивките на намотката ќе зависи струјата што тече низ неа.



Слика 8.4. Проширување на мерното подрачје на аналоген амперметар, со помош на шунтирачки отпорник.

Амперметарот со подвижна намотка служи за мерење на мали струи, од ред на големина од μA до 1 mA . Меѓутоа, за да може да се измери поголема струја, треба да се поврзе надворешен отпорник, како отпорник за шунтирање, притоа дел од вкупната струја поминува низ навивките на подвижната намотка (слика 8.4). Бидејќи напонот на шунтирачкиот отпорник и амперметарот е ист, следува: 11

$$I_s = I - I_m \quad (8.3.1),$$

$$I_m R_m = I_s R_s \quad (8.3.2) \text{ и}$$

$$I_s = \frac{I_m R_m}{R_s} \quad (8.3.3).$$

Со замена во равенка 8.3.1 се добива:

$$\frac{I_m R_m}{R_s} = I - I_m \quad (8.3.4).$$

Од последната равенка следува дека струјата што се мери е дадена со равенката:

$$I = \frac{I_m R_m}{R_s} + I_m = I_m \left(\frac{R_m}{R_s} + 1 \right) \quad (8.3.5),$$

$$m_i = \frac{I}{I_m} = \left(\frac{R_m}{R_s} + 1 \right) \quad (8.3.6),$$

каде што односот на вкупната струја до измерената струја од страна на подвижната намотка се нарекува мултипликаторска моќност m на шунтирачкиот отпорник. Од последната равенка следува дека шунтирачкиот отпорникот треба да биде $R_s \leq R_m$.

Така, на пример, за мерење на струја од 5 А, а скалата мери струја од 1 mA при што отпорот на намотката е 10 Ω , тогаш треба да се стави шунтирачки отпор:

$$R_s = \frac{I_m R_m}{I - I_m} \quad (8.3.7),$$

$$R_s = \frac{I_m R_m}{I - I_m} = \frac{1 \text{ mA} \cdot 10}{5 \text{ A} - 0,001 \text{ A}} = 0,002 \Omega \quad (8.3.8).$$

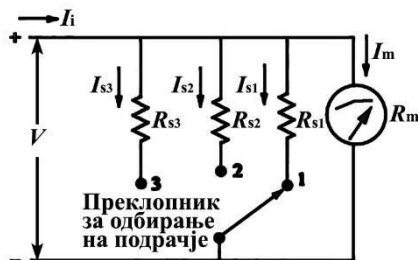
Во случај кога со амперметарот треба да се измерат различни струи при константна струја низ намотката и е во опсег на скалата, тогаш шунтирачките отпори ќе бидат различни, дадени со равенките:

$$R_{s1} = \frac{I_m R_m}{I_1 - I_m} \quad (8.3.9),$$

$$R_{s2} = \frac{I_m R_m}{I_2 - I_m} \quad (8.3.10), \text{ и}$$

$$R_{s3} = \frac{I_m R_m}{I_3 - I_m} \quad (8.3.11).$$

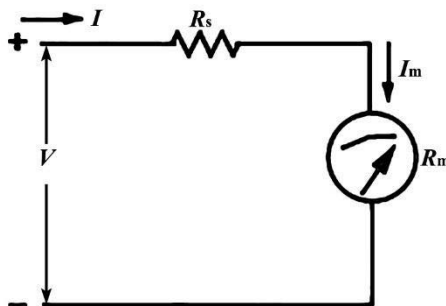
Амперметар со повеќе подрачја може да се дизајнира со избирање на шунтирачки отпори, во зависност од скала за отклонување на стрелката и примена на прекинувач (преклопник – слика 8.5).



Слика 8.5. Мерење на различни струји со амперметар, со помош на различни шунтирачки отпорници.

8.4. Аналоген електричен волтметар и омметар за права струја

Друга намена на инструментот со подвижна намотка која се движи во постојан магнет е за мерење на напон. Имено, за мерење на високи напони се сврзува отпорник со висок отпор во серија со инструментот, со цел да се ограничи струјата што тече во намотката. Вредноста на струјата што тече низ намотката не треба да ја надмине струјата при што стрелката се отклонува до крајот на скалата. Падот на напонот на сериски сврзаниот отпорник и падот на напонот на подвижната намотка е даден со равенката (слика 8.6):



Слика 8.6. Проширување на мерното подрачје на аналоген волтметар, со сериско сврзување на отпорник.

$$V = I_m R_s + I_m R_m = I_m (R_s + R_m) \quad (8.4.1).$$

Во овој случај, факторот на мултипликација на напонот е односот на измерениот напон со сериско врзување на отпорникот R_s без него, даден е со равенката:

$$m_v = \frac{V}{I_m R_m} = 1 + \frac{R_s}{R_m} \quad (8.4.2).$$

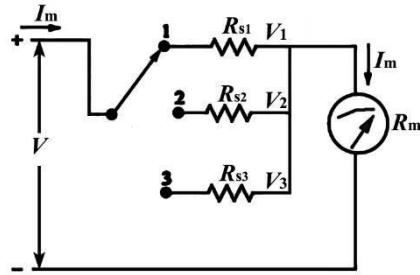
Од последната равенка следува дека серискиот отпорник треба да биде $R_s \geq R_m$.

Така, на пример, струјата што тече низ подвижната намотка е $I_m = 1 \text{ mA}$, а отпорот на намотката е 10Ω , притоа за мерење на напон од 10 V треба да се сврзе сериски отпорник, даден со равенката:

$$R_s = \frac{V}{I_m} - R_m = \left(\frac{10 \text{ V}}{0,001 \text{ A}} - 10 \text{ k}\Omega \right) = 10 \text{ k}\Omega \quad (8.4.3).$$

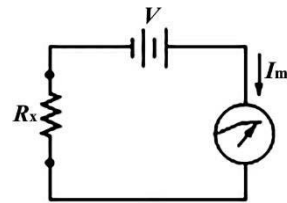
Меѓутоа, волтметарот треба да биде способен да мери различни напони. Затоа со ротациониот прекинувач или преклопник се избира потребниот сериски отпор, за отклонот на стрелката да биде во посакуваното мерно подрачје (слика 8.7).

Од друга страна, амперметарот може да користи за мерење на отпор. За таа цел, се сврзува сериски извор на прав напон со амперметарот и отпорникот, чија вредност на отпорот треба да се измери (слика 8.8). Во зависност од отпорот ќе зависи јачината на струјата што ќе тече низ подвижната намотка, а со тоа и отклонот на стрелката во однос на скалата. Со мерење на струјата што тече низ отпорникот и напонот на батеријата се калибрира скалата, при различни вредности на отпорот.

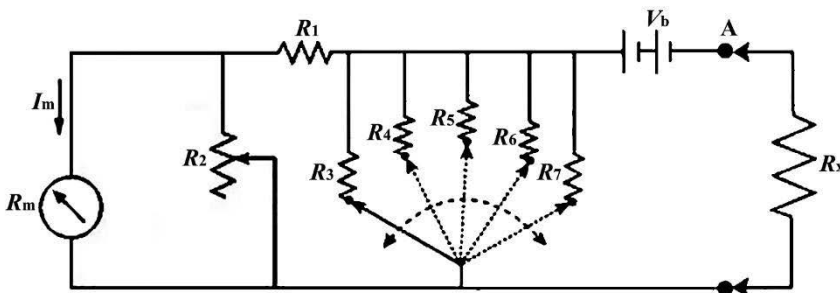


Слика 8.7. Мерење на различни напони со волтметар, со помош на различни сериски сврзани отпорници.

За повеќето практични цели, неопходно е да се користи еден омметар за мерење на широк опсег на вредности на отпорот. Употребата на единствена скала за такви мерења ќе доведе одредени прилагодување на скалата според мерното подрачје на отпорот и соодветни грешки при мерењето. За таа цел, се користат омметри со повеќе подрачја, како на слика 8.9. Со помош на дополнителните отпори на шунтирање R_3, R_4, R_5, R_6, R_7 се избира работното подрачје за мерење на непознатиот отпор R_x , за измерената вредност да биде во



Слика 8.8. Мерење на отпорот со омметар.



Слика 8.9. Мерење на непознат отпор, со избирање на работното подрачје.

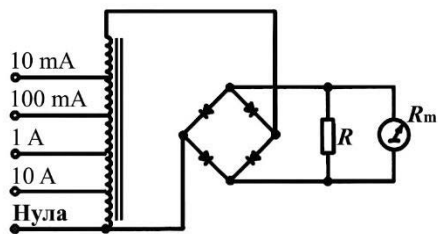
опсег на скалата. Имено, со вртење на преклопникот се избира работното подрачје.

8.5. Дополнителни уреди за мерење на наизменична струја и аналоген електричен мултиметер

За мерење на различни електрични величини се користи мултиметар, којшто е мерен инструмент за мерење на напон, струја и отпор. За таа цел, обично се користи аналогниот инструмент со подвижна намотка во постојано магнетно поле, каде што скалата е линеарна и има голема осетливост. Осетливоста на инструментот е таква што отклонот на стрелката е максимален при течење на струја од $50 \mu\text{A}$. За мерење на струја се користат шунтирачки отпорници, а за мерење на напон се користат сериско поврзани отпори со подвижната намотка.

Додека пак, ако тече наизменична струја низ намотката, тогаш отклонувањето на намотката, па со тоа и на стрелката, во постојанот магнетно поле зависи од моменталната вредност на применетата струја и ако фреквенцијата на струјата е поголема од вредноста одредена од механичките својства на движењето на намотката, таа ќе биде неподвижна или ќе осцилира околу нулата. Така, за мерење на величините кои ја карактеризираат наизменичната струја, неопходно е таа да се претвори во права струја, така што движењето на намотката да биде во една насока. За таа цел, се користи исправувач во вид на Грецов спој, за да има струјата бранова форма поблиску до правата струја. Карактеристика на исправувачот е дека го менува отпорот во зависност од течењето на струјата. На тој начин, инструментот ќе ја покажува средната вредност на правата струја, иако треба да ја покажува максималната вредност на напонот. Меѓутоа, со калибрација на скалата се добива вредноста на наизменичниот синусен напон да е од врв до врв (позитивни и негативни вредности). Додека за други бранови форми на сигналот можни се грешки во отчитувањето на вистинската вредност.

За користење на амперметар со повеќе подрачја не може да се направи само со употреба на отпори за шунтирање, при што истата линеарна скала да се користи за наизменична (а.с.) струја и права (d.c.) струја. Затоа се користи колото дадено на слика 8.10, каде што со помош на струен трансформатор се

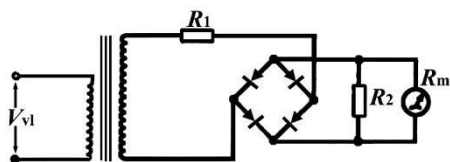


Слика 8.10. Амперметар за наизменична струја.

овозможува отчитување на наизменичната струја во различни подрачја, за да биде нејзината вредност во рамките на карактеристиките на исправувачот.

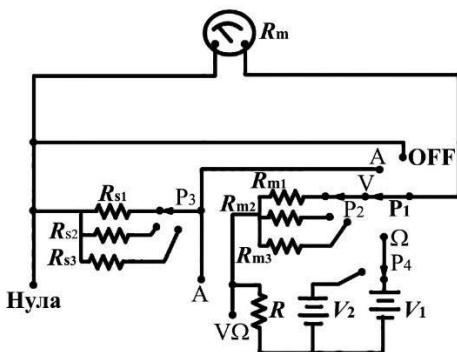
Од друга страна, мерењето на различни наизменични напони не е едноставно, поради нелинеарноста на карактеристиката на исправувачот. За таа цел, се користи трансформатор за зголемување на напонот, за да неговата вредност биде помала од 10 V, а отклонот на стрелката да биде во максималната вредност на скалата (слика 8.11). Меѓутоа, и овде се користи сериски отпор кој ќе направи пад на напонот и ќе ја ограничи струјата што тече низ подвижната намотка.

Оттука, може да се конструира мултиметар којшто ќе мери струја, напон и отпор, како за права струја, така и за наизменична струја, со тоа што се додаваат уреди за таа намена.



Слика 8.11. Амперметар за наизменична струја со трансформатор.

Имено, со помош на преклопникот се избира работното подрачје и електричната величина што ќе се мери (слика 8.12), било за мерење на наизменичен или еднонасочен напон и струи и отпор. Во зависност од позицијата на преклопникот P_1 се користи за избор на величината што ќе се мери, струја (A), напон (V) или отпор (Ω). Ако преклопникот P_1 е во позиција V, тогаш со помош на преклопникот P_3 кој било од отпорите за шунтирање R_{s1} , R_{s2} или R_{s3} се избира за соодветна струја. Ако преклопникот P_1 е во позиција V, тогаш со помош на преклопникот P_2



Слика 8.12. Мултиметар за права струја.

кој било од сериски сврзаните отпорници R_{m1} , R_{m2} или R_{m3} се избира за мерење на соодветен напон, притоа отклонот на стрелката може да биде максимален. Додека пак, ако преклопникот P_1 е во позиција Ω , тогаш со помош на преклопникот P_4 се избира батеријата V_1 или V_2 , за мерење на непознат отпор.

8.6. Електронски аналогни уреди за мерење на прав напон и струја

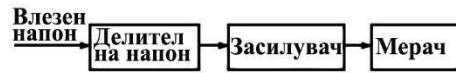
Електронските инструменти се уреди направени во 20-тиот век, во коишто се применуваат елементи од електрични уреди, како што е Винстонов мост. Научниот и технолошкиот напредок на зависат од способноста на уредите да измерат одредена величина, да направат пресметка со однапред зададени функции и да најдат одредена закономерност од резултатите. Така, на пример, протокот на гас може да измери со механички уреди, потоа врз база на измерениот напон со помош на електронски волтметар ќе се менува протокот на гас или протокот на гас ќе се врши со автоматска регулација, со повеќе повратни врски.

Затоа, електронските инструменти се карактеризираат со голема осетливост, голема брзина на мерења во единица време, брзо отчитување на резултатите, нивно складирање во датотеки и контрола на измерената електрична величина.

Електронските инструменти може да бидат: индикаторски инструменти, инструменти за снимање на мерената величина и контролни инструменти. Индикаторските инструменти ја даваат моменталната вредност на измерената величина што се мери. Отчитувањето на инструментот, како што се амперметарот и волтметарот, се врши од отклонот на стрелката на скалата или во бројки, кај дигиталните инструменти. Инструменти за снимање вршат графички запис на промените на величината што се мери, во одреден временски период. Голем дел од овие инструменти се електромеханички уреди, користат хартија за запис на податоците и перо со мастило. Електронските инструменти за снимање можат да бидат од нулти тип, врз база на споредба со дадена вредност, и галванометарски инструменти кои даваат отклон при мерење на дадена величина. Додека пак, контролни инструменти се користат за контрола на одредени индустриски процеси, со помош на мерење на величините и корекција на нивната вредност со автоматска регулација.

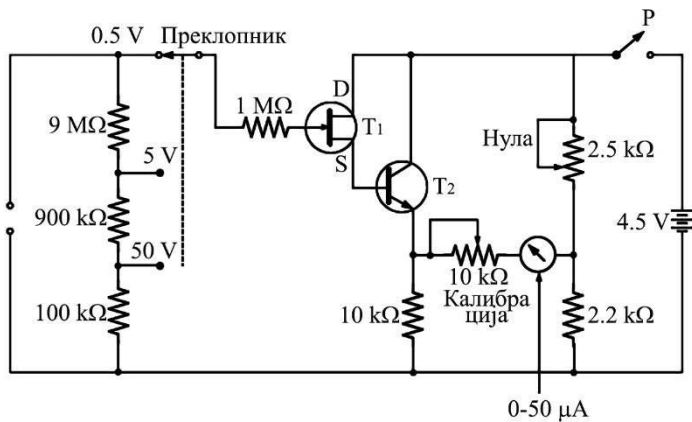
Електронските волтметри според намената можат да бидат за мерење на прав и наизменичен напон. Електронскиот волтметар треба да има делител на напон, т.е. електронско коло за намалување на вредноста на напонот, ако тој е многу висок, за да биде прилагоден на засилувачот. Додека пак, засилувачот треба да го зголеми сигналот, а со тоа да се зголеми осетливоста и точноста на волтметарот. Како составен уред на волтметарот е електронско коло на исправувач и филтер, ако волтметарот се користи за мерење на прав напон, со помош на отклонот на стрелката на скалата. Блок шема на електронски волтметар за прав (DC) напон е дадена на слика 8.13.

Делителот на напон може да биде електронско коло на сериски поврзани отпорници, за менување на вредноста на влезниот напон. Од друга страна ако вредноста на напонот е мала, тогаш тој се зголемува со



Слика 8.13. Блок шема на електронски волтметар за прав (DC) напон.

засилувач и потоа се носи на мерачот. Меѓутоа, мерачот може да биде подвижна намотка во постојано магнетно поле, претходно калибриран во однос на напонот што треба да се измери. Додека засилувач може да биде директно споен засилувач или засилувач на напон од инвертор. Најчесто се користи директно споен засилувач со FET транзистор, како на слика 8.14. Влезниот прав (DC) напон се носи на краевите на делител на напон, со цел намалување на вредноста на напонот. Потоа влезниот напон се носи на влезот на засилувачот од MOSFET транзистор, а поради големиот влезен отпор на транзисторот тоа нема да влијае на влезниот напон. Засилениот напон се носи на влезот на биполарен транзистор MOSFET транзистор (T_1), којшто е во дарлингтов спој со транзисторот T_2 . Транзисторот T_1 е во спој на заеднички колектор притоа засилувањето е

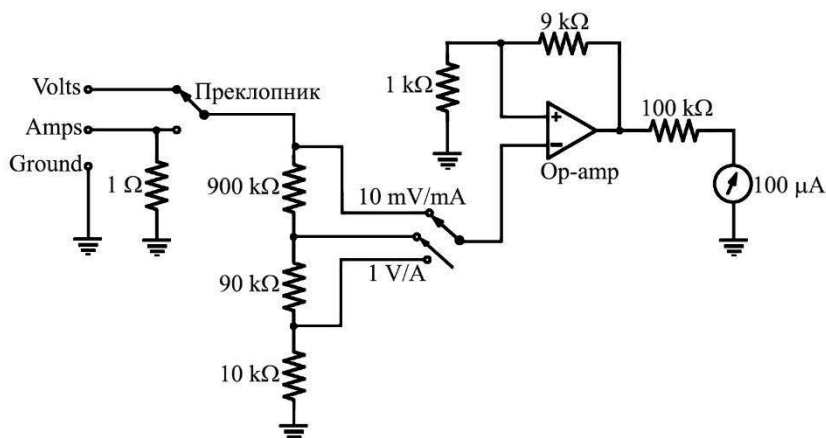


Слика 8.14. Електронска шема на електронски волтметар за прав (DC) напон.

помало од единица, но има големо засилување на струјата. Влезот на мерачот е споен со транзисторот T_2 помош на потенциометарот од $10\text{ k}\Omega$. Нултата положба на мерачот може да се направи со помош на потенциометарот од $2,5\text{ k}\Omega$, и овозможува инструментот да се користи за мерење на милivolти. Покрај тоа, случајните високи напони не го оштетуваат инструментот поради употребата на делител на напонот и способноста на засилувачот да засилува до одредена вредност на напонот, а со тоа ја ограничува максималната струја низ мерачот. Влезната импеданса на инструментот е $10\text{ M}\Omega$, а потребната моќност за

отклонување на стрелката при напон од 0,5 V е $0,025 \mu\text{W}$, без користење на засилувач. Меѓутоа, засилувачот ја зголемува осетливоста на инструментот за 100 пати.

Електронските уреди се способни за мерење на прав напон и струја. На слика 8.15 е дадено електронското коло на инструмент што мери напон и струја. За таа цел, влезниот напон се засилува со операциски засилувач, притоа осетливоста на инструментот ќе зависи од засилувањето. Отклонот на стрелката се очитува на милиамперметарот, притоа потребната струја за максимален отклон е од ист ред на големина. Меѓутоа, за мерење на права (DC) струја од наноампери, операцискиот засилувач треба да има засилување од 10^6 . Затоа, за

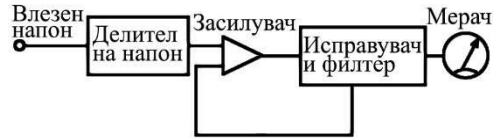


Слика 8.15. Електронска шема на електронски волтметар и амперметар за прав (DC) напон.

мерење на права струја и напон, влезниот напон или струја, треба директно да се сврзе со операцискиот засилувач, преку делител на напон или шунтирачко сврзување на отпорници. Бидејќи, инструментот мери права струја и напон, влезниот сигнал не се пренесува преку кондензаторот, туку директно се сврзува за инвертирачкиот влез на операцискиот засилувач (Op-amp) којшто има големо засилување. Меѓутоа, тоа ќе влијае на поместување на струјата, што ќе доведе до поместување на нулатата вредност на величината што се мери со инструментот. Затоа се користат тримери (потенциометри) кои се наоѓаат на предната страна на инструментот за намалување на грешките поради поместување на нулата, поради промена на на струјата. Во краен случај се применува инструментален засилувач за надминување на овие проблеми.

8.7. Електронски аналогни уреди за мерење на наизменичен напон и струја

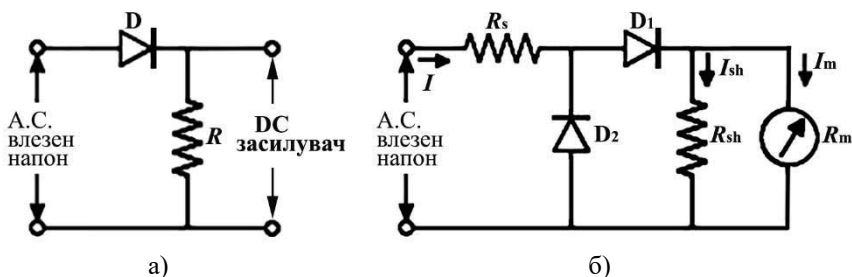
Електронскиот волтметар за наизменична струја (ас) има сличности со електронскиот волтметар на прав напон. Имено, за намалување на напонот се користи делител на напонот, за избирање на соодветно подрачје на мерење на напонот. Додека пак, засилувачот ја обезбедува потребната вредност на напонот која ќе биде мерлива, потребната осетливост и голема вредност на влезниот импеданс. Блок шемата на електронскиот волтметар за наизменична струја е даден на слика 8.16. Покрај тоа, воспоставена е негативна повратна врска за одржување на стабилност и точно мерење на наизменичниот напон. За добивање на Слика 8.16. Блок шема на електронски отклон на мерачот се користи волтметар за мерење на наизменичен исправувач и филтер за претворба (ас) напон. на наизменичниот напон во прав напон.



Покрај тоа, за мерење на наизменичен напон (ас) со електронски волтметар се користи исправувач во електронското коло. На тој начин, аналогните волтметри за наизменична струја се користат за мерење на вредноста на напонот од пик до пик за многу бранови форми на напонот, кои се среќаваат во електрониката. Во зависност од вредноста која можат да ја мерат, тие можат да бидат:

1. волтметар за мерење на наизменичен напон со исправувач,
2. волтметар за мерење на средната вредност на наизменичниот напон
3. волтметар за мерење на максималната вредност (пик или врв) на наизменичен напон, и
4. волтметар за мерење на наизменичен напон од пик до пик, при користење на исправена струја.

Волтметар за мерење на средната вредност на наизменичниот напон и волтметар за мерење на пикот на наизменичен напон можат да мерат само синусни напони. Така, на пример, волтметарот за мерење на средната вредност на наизменичниот (ас) напон е волтметар со полубранов исправувач, каде што една диода е сериски сврзана со отпорник (слика 8.17а). Овој инструмент ја дава просечната вредност на напонот, за време на позитивната полупериода на напонот или негативната полупериода на напонот, во зависност од начинот на поврзување на диодата D . Според сликата, низ диодата ќе тече струја само за време на позитивната полупериода на влезниот наизменичен (ас) напон, а правиот напон се добива на краевите на отпорникот R .



Слика 8.17. Волтметар за мерење на наизменичен напон со исправувач: со една диода и б) со две диоди.

Вредноста на еднонасочен напон се засилува со засилувач и се отчитува на мерачот.

Високата фреквенција на пулсирачкиот напон и инертноста на подвижната намотка калем, стрелката ќе покажува постојано отклонување, кое ќе биде еднакво на просечната вредност на струјата. На тој начин, наизменичниот напон ќе се изрази преку негова просечна вредност (rms – квадратен корен од средната вредност на квадратите на напоните). Со калибрација на скалата, за дадена фреквенција на напонот може напонот да се изразува преку неговата максимална вредност.

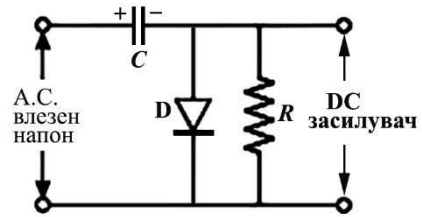
Од друга страна, волтметар за мерење на наизменичен напон со исправувач, со две диоди D_1 и D_2 , даден е на слика 8.17б. За време на позитивна полупериода на наизменичниот напон диодата D_1 ќе спроведува струја, затоа што е поларизирана во пропусна насока, а отклонувањето на стрелката која е прицврстена за подвижната рамака е пропорционално на просечната вредност на струјата за полупериодата. Додека пак, за време на негативната полупериода на наизменичниот напон диодата D_2 ќе спроведува струја, а диодата D_1 ќе биде исклучена. Во овој случај, отклонувањето на стрелката е во иста насока бидејќи не се менува насоката на течење на струјата, што ќе доведе до пулсирачка права (dc) струја, а мерачот ќе ја покажува просечната вредност на напонот.

Друг начин на мерење на наизменичен напон е мерење на неговата максимална вредност, т.е. се користат волтметри кои ја мерат максималната вредност на наизменичниот напон. За таа цел, за време на позитивната полупериода на наизменичниот напон струјата тече низ диодата D , притоа кондензаторот C се полни до вредност на напонот V_m , а стрелката на мерниот систем ја покажува максималната вредност на напонот. Сериски со диодата е сврзана диода, при што вредноста на отпорникот R е поголема од отпорот на диодата кога таа е поларизирана во пропусна насока, но е помал од отпорот на диодата кога таа е поларизирана во непропусна насока. За негативната полупериода на наизменичниот напон, струјата не тече низ диодата, а кондензаторот се празни низ отпорникот R (слика 8.18). Овие волтметри се детектори на

максималниот напон и се користат за мерење сигнали до 40 GHz со примена на коаксијални кабли и сонда со кондензатор.

Покрај тоа, за мерење на наизменичниот напон, од пик до пик се применува електронското коло дадено

на слика 8.19. Во случај кога диодата D_1 е поларизирана во пропусна насока, тоа ќе доведе до полнење на кондензаторот C_1 до напон V_m . Додека пак, за време на негативната полупериода диодата D_1 нема да тече струја, но кондензаторот C_1 ќе се празни низ диодата D_2 и ќе предизвика полнење на кондензаторот C_2 . Меѓутоа, за време на

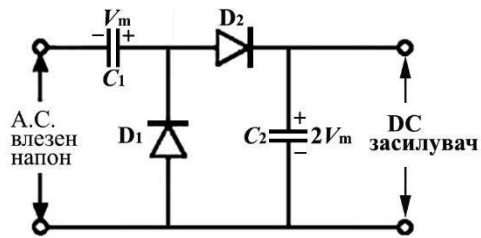


Слика 8.18. Волтметар за мерење на максималната вредност на наизменичен напон.

негативната полупериода на наизменичната струја кондензаторот C_2 се наелектризира до напон $2V_m$. Овој прав напон се носи директно на мерачот, но обично се засилува со засилувач на прав напон, при што напонот на мерачот ќе биде двапати поголем од максималната вредност на напонот, односно напонот на мерачот ќе биде од пик до пик (од врв до врв) на наизменичниот напон. Волтметрите кои мерат напон од пик до пик, обично не се користат за мерење на вредноста на синусидни напони, туку за комплексни напони, кои се применуваат во системи за комуникација.

Со инструментите за мерење на наизменичен напон може да мери струјата, со сврзување на сериски отпорник пред волтметарот. Тоа ќе ја ограничи струјата и ќе се јави пад

на напонот на отпорникот, а отклонот на стрелката треба да се калибрира во единиците за мерење на струјата, милиампери или ампери. Исто така, може да се користи трансформатор, при што струјата во секундарната намотка ќе биде обратнопропорционална од трансформаторскиот број.



Слика 8.19. Волтметар за мерење на наизменичен напон од пик до пик.

8.8. Дигитални волтметри

Во аналогните инструменти за мерење на напон, струја и отпор се применуваат електронски кола, како што се електронски засилувачи, но системот за покажување на бројната вредност е аналоген, се отчитува од отклонот на стрелката на скалата. Додека пак, дигиталните инструменти може да содржат микропроцесор за да бидат компатибилни со компјутерите. Во последно време, дигиталните инструменти мерат напон, струја, капацитет на кондензатори и отпор, при што можат да се поврзат со компјутер и да се обработат резултатите во соодветен софтвер и се нарекуваат дигитални мултиметри (DMM). Со тек на времето, точноста на овие инструменти може се зголеми, а може и бројот на обработените податоци да се зголеми, со што се незаменливи во научните и образовните установи. Спецификации на инструментите и вредностите кои можат да ги мерат се следните:

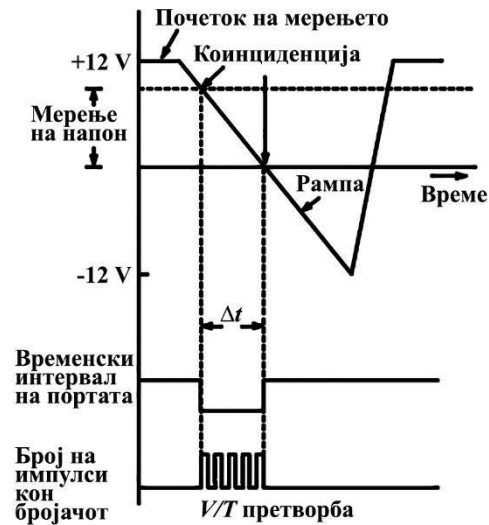
1. мерење на влезен напон во опсег од ± 1 до ± 1000 V, со автоматски избор на опсег и индикатор за преоптоварување, кога инструментот е надвор од мерното подрачје,
2. апсолутна точност од $\pm 0,005$ %,
3. стабилност на работа $-0,002$ % за 24 часа,
4. долгорочно: $0,008$ % за 6 месеци,
5. резолуција од $1 \mu\text{V}$ за влезен напон од 1 V,
6. влезна импеданс од $R = 10 \text{ M}\Omega$ при $C = 40 \text{ pF}$ и
7. излезен сигнал компатибилен со компјутер, печатач или рекордер.

Дигиталните волтметри можат да бидат:

- дигитален волтметар (DVM) со рампа,
- дигитален волтметар (DVM) со интегрирање,
- континуирано урамнотежен дигитален волтметар (DVM) и
- дигитален волтметар (DVM) со последователно приближна вредност.

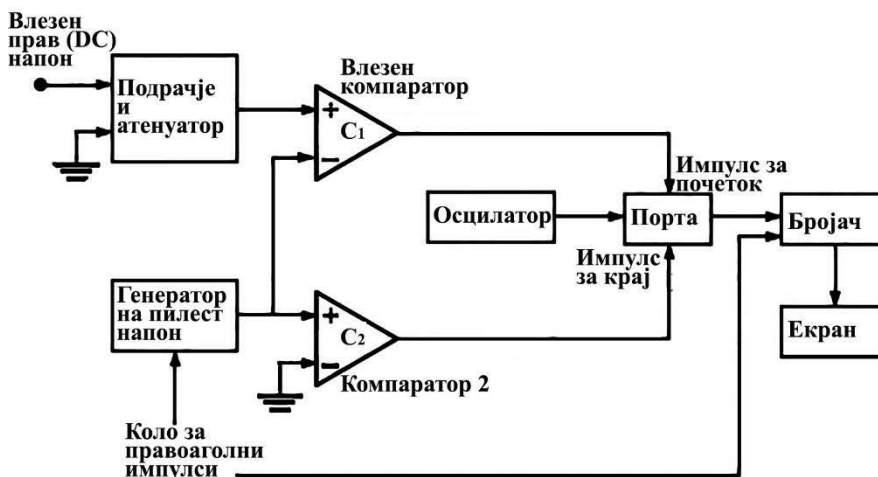
Напонот кај дигиталниот волтметар (DVM) со рампа се претвора во време, а бројот на периодите се мери со електронски бројач на даден временски интервал, а броењето се прикажува како број на цифри на дигиталниот екран. На екранот отчитаното време се изразува како напон. Времето потребно за да се зголеми (скокне) линеарниот напон од 0 V до нивото на влезниот напон или да се намали на нивото на влезниот напон до нула, се мери со електронски бројач. На тој начин, временскиот интервал е пропорционален на напонот што треба да се мери (слика 8.20). За почетокот на мерењето, се активира пилест (рампа) напон којшто може да биде позитивен или негативен. На слика 8.20 е прикажан негативен пилест напон, којшто при намалување на неговиот напон вредноста на пилестиот напон континуирано се споредува со непознатиот влезен напон. Во моментот кога пилестиот напон ќе се изедначи со непознатиот напон што треба да се мери, влезниот

компаратор генерира пулс за отворање на портата. Меѓутоа, напонот на рампата продолжува да се намалува со текот на времето, сè до моментот кога напонот ќе достигне вредност од 0 V. Во овој момент, вториот компаратор генерира излезен импулс за затворање на портата (слика 8.21). Временскиот интервал за којшто портата се отвора и затвора е Δt , при што осцилаторот генерира импулси на кои им е дозволено да поминат низ портата. Вкупниот број на импулсите се брои од страна на бројачот и се прикажува на екранот, во декадниот систем на броење. Бројот на импулсите даден на екранот е измерената



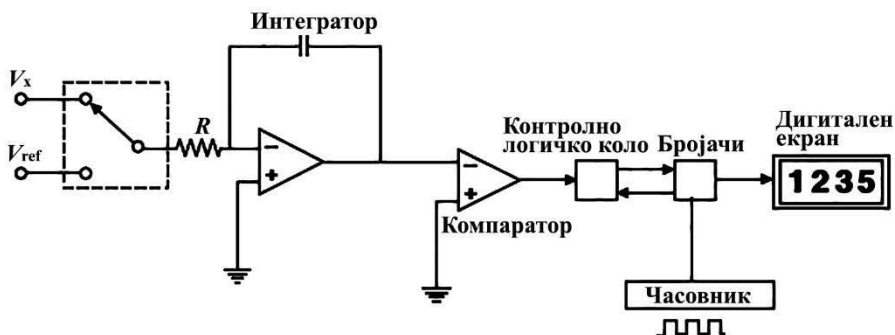
Слика 8.20. Дигиталниот волтметар (DVM) со рампа.

вредност на влезниот напон. Најпрво влезниот напон на еднонасочна струја што треба да се мери, се носи во електронското коло за подрачје и намалување на напонот (атенуатор). При голема вредност на напонот, истиот се намалува и обратно, ако има мала вредност, се засилува. Електронското коло за правоаголни импулси го одредува наклонот на пилестиот напон и периодот на мерење или времетраењето на мерниот циклус, којшто е во опсег од неколку циклуси/секунда до 1000



Слика 8.21. Блок шема на дигиталниот волтметар (DVM) со рампа.

циклуси/секунда. Исто така, ова коло обезбедува иницијативен импулс за генерација на пилест напон и враќање на екранот на нула вредност. Друг вид дигитален волтметар е интегрирачки волтметар со двоен наклон. Развојот на интегралните кола, доведе до потрошувачката на електрична енергија на дигиталните волтметри да се намали, а цената е споредлива со аналогни инструменти. Така, на пример, дигиталниот волтметар со двоен наклон се состои од: операциски засилувач (Op-Amp) кој се користи како интегратор, компаратор на навоите на напонот, основен часовник (за генерирање временски импулси), збир на децимални бројачи и блок од логички кола (слика 8.22). При влез на



Слика 8.22. Блок шема на дигиталниот интегрирачки волтметар со двоен наклон.

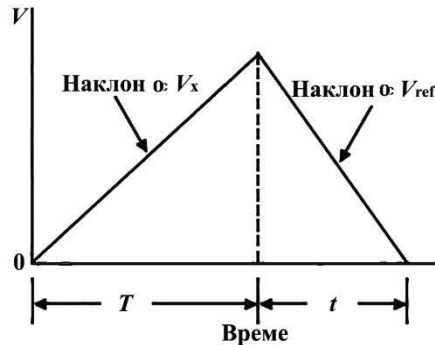
непознат напон V_x се доведува преку прекинувачот S до интеграторот за одреден временски период T , којшто се одредува со броење на фреквенциите на часовникот, во децималните бројачи. За време на периодот T , кондензаторот C се полни со чекор пропорционален на влезниот напон V_x . На крајот на временскиот интервал T , прекинувачот S се поместува на референтниот напон V_{ref} , којшто е со спротивен поларитет. Кондензаторот почнува да се празни, притоа напонот линеарно се намалува. За време на празнењето на кондензаторот, т.е. вториот период се одвива при познат референтен напон (V_{ref}) и се забележува времето t . Времето t се одредува со броење временски импулси од часовникот сè додека напонот на кондензаторот не ја достигне својата референтна вредност (слика 8.23). Од сличноста на триаголници на слика 8.23 следува:

$$\frac{V_x}{T} = \frac{V_{ref}}{t} \quad \Rightarrow \quad V_x = T \cdot \frac{V_{ref}}{t} \quad (8.8.1).$$

Вредноста на интервалот t е пропорционална на влезниот напон V_x и се прикажува како измерен напон. Со користење на соодветни електронски кола за кондиционирање на сигналите може да измери струја, отпор и наизменичниот напон со овој инструмент. Ако земеме дека временскиот период на осцилаторот на часовникот е T , а дигиталниот бројач ги броел импулсите n_1 и n_2 , соодветно за време на периодите t_1 и t_2 , следува:

$$V_x = V_{\text{ref}} \cdot \frac{n_2 T}{n_1 T} \Rightarrow V_x = V_{\text{ref}} \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad (8.8.2).$$

Овој дигитален волтметар (DVM) се користи во системи за обработка на податоци или системи за евиденција на податоци, притоа голем број аналогни влезни сигнали последователно се скенираат од електронскиот систем. Вредноста на овие сигнали се претвора во еквивалентна дигитална вредност, со помош на аналогно-дигитален (A/D) претворајќи го во конверторот во дигиталниот волтметар. Потоа дигиталната вредност се пренесува на печатач, заедно со информациите за влезните сигнали. Исто така, може голем број влезни сигнали автоматски да се скенираат или обработуваат и нивните вредности да се испечатат или да се зачуваат во соодветни датотеки на компјутер.



Слика 8.23. Наклон на пилообразниот напон кај дигиталниот интегрирачки волтметар.

9. ЕКРАНИ НА ИНСТРУМЕНТИТЕ

За прикажување на измерената величина на даден инструмент треба да има екран. Кај аналогните инструменти со подвижна намотка во постојано магнетно поле, вредноста на величината се гледа од положбата на стрелката на дадена скала. Всушност, отчитувањето на вредноста на величината може да се види од положбата на стрелката на скалата на одреден инструмент, без разлика дали измерената величина е со електрични, електронски кола. Од друга страна, во дигиталните инструменти отчитувањето на вредноста на величината е на екран, во форма на бројки од декадниот систем. Овие бројки на екранот кај дигиталните инструменти може да се видат како резултат на светењето на LED диоди, примена на течни кристали за екран или на екран со катодна цевка. Во поново време, контролата на работата на инструментот и отчитувањето на вредноста на величината се одвива со екрани на допир.

9.1. Екрани од вакуумски уреди

Мерењата на одредена физичка величина се прикажуваат на екран. Во почетокот било користено аналогно прикажување на величината, од положбата на стрелката на скалата. Меѓутоа, обично екранот на овие инструменти се состои од повеќе скали, за различни измерени величини, при што може да настане забуна или погрешно отчитување на величината. Додека пак, дигиталното прикажување на измерената величина е на екран, со користење на светилки, светлечки диоди и екрани со течни кристали, со позадинско светло. Општо земено, овие уреди работат на ниски напони и користат мали струи. Затоа, екраните на инструментите биле посебни уреди во инструментот, со цел точно да ја покажува одредената физичка величина, за дадено мерно подрачје.

Во плазма екраните се користи стаклена цевка која е исполнета со гас неон, со мали примеси на аргон, криптон или жива, со цел подобрување на електричното празнење помеѓу анода и катода. При напон од 180 V помеѓу анодата и катодата гасот се јонизира, при што во

близина на катодата се случува рекомбинација на носителите на полнеж, со емисија на портокалово-жолта светлина. Откако ќе се случи јонизацијата на гасот, за одржување на јонизацијата напонот може да се намали на 100 V.

Во дигиталните инструменти, вредноста на измерената величина се изразува со децимални броеви. За таа цел, се користат екрани за дигитални уреди при што измерената величина може да биде континуирана, но со помош на аналого-дигитални претвораи се добива во форма на децимална бројка. Бројот по цифрата ќе зависи од вредноста на измерената физичка величина.

Со помош на една цифра се прикажуваат децималните броеви од 0 до 9. Додека пак, местото на децимална точка помеѓу цифрите се избира и активира во зависност од мерното подрачје и точноста на инструментот. Во поново време некои инструменти можат автоматски да го изберат мерното подрачје. На влезот на екранот се донесува сигнал (код), којшто го одредува бројот на цифрите што треба да се прикаже на екранот.

Цифрите на дигиталните екрани можат да бидат прикажани во една рамнина, т.е. сите цифри за отчитување на дадена физичка величина се во иста рамнина. Покрај тоа, цифрите на дигиталните екрани можат да бидат прикажани не во една рамна површина, туку во повеќе рамнини или закривена форма на екранот. Цифрите во рамните екрани може да бидат во форма на сегменти кои светат, осветлена матрица со точки, екран со позадинско светло и екран од сегменти кои се осветлени поради електрично празнење низ гас. Додека, екраните кои не се во една рамнина, се обично вакуумски цевки исполнети со гас при што се јавува празнење помеѓу анода – катода и екрани кои користат ленти за осветлување.

Пред 40 години се направени првите дигитални екрани, со појава на бројки и букви при празнење на гас. За таа цел, во тоа време била направена нумеричката индикаторска цевка со празнење низ гас, т.н. цевка на Никси (Nixie). Вакуумска цевка на Никси се користи во нумеричките екрани и екраните за сигнализација. Внатрешноста на стаклената цевка се состои од анода во форма на мрежеста жица и 10 посебни жичени катоде, во форма нумеричките бројки од 0 до 9 (слика 9.1). Цевката е исполнета со гас под низок притисок, обично неон со примеси на жива или аргон. При напон помеѓу една од катодите и анодата се јавува празнење низ гас во близина на катодата со портокалова боја. За да се јави



Слика 9.1. Никси индикаторска

празнење низ гас околу катодата, треба напонот помеѓу катодата и анодата да биде поголем од 220 волти, а струјата е од редот од 1 до 5 mA. Со воспоставување на празнењето низ гас во близина на катодата, напонот потребен за одржување на плазмата помеѓу катода и анода се намалува за 30 волти. Бидејќи, за празнење низ гасот не треба загревање на катодата, затоа цевката е наречена цевка со ладна катода. Главно, примената на Некси цевките е прикажување на броеви во уредите за мерење и бројачи. Покрај тоа, тие се користеле во лифтовите, калкулаторите, патоказните знаци и многу други уреди. Никси цевките повеќе не се применуваат, поради потребата за голем напон за напојување, големата потрошувачка на енергија која е потребна за преворање на дигиталните сигнали во аналогни.

Друг вид екрани се екрани каде што бројките или буквите се добиваат од светлината која ја емитираат вжештени жици, во внатрешноста на вакуумска цевка. Овие екрани може да имаат различна боја и големина на бројките (слика 9.2). Меѓутоа, може да се случи прегорување на една од жичките, а со тоа и неточно отчитување на вредноста на величината. Обично, овие екрани се седумсегментни цифрени екрани во вакуумска цевка, кои се компатибилни со TTL електронски кола. Исто така, овие екрани се карактеризираат со голем интензитет на светлината, потребно поголемо време за отчитување на вредноста на величината и компатибилност со интегралните кола.



Слика 9.2. Цифра добиена од вжештување на жички, во вакуумска лампа.

Други уреди се вакуумски флуоресцентни екрани (VFD, слика 9.3), коишто служат за прикажување на нумерички бројки и букви во разни инструменти. Овие екрани емитираат светлина со голем интензитет и со висок контраст, елементите на екранот може да бидат со различни бои. Овие екрани се составени од седумсегментни цифри, повеќесегментни од буквено-нумерички знаци, како и да бидат матрица со точки за прикажување на различни буквено-нумерички знаци и симболи. Карактеристики на флуоресцентните екрани е нивно напојување со напон од 30 V притоа тече струја од 1 mA, а може да се користат за отчитување на сигнали со нивно мултиплексирање. Помеѓу анодата и катодата се поставува мрежеста метална електрода, којашто е на негативен напон и ќе го регулира протокот на електроните. Всушност, катодата се загрева и емитира

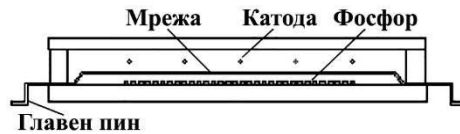


Слика 9.3. Вакуумски флуоресцентен екран.

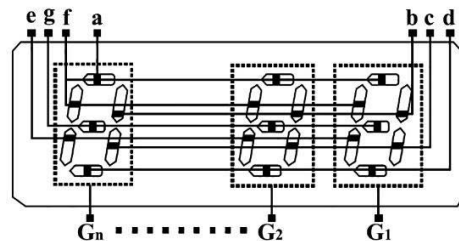
електрони кои под дејство на силно електрично поле се забрзуваат и паѓаат на анодата, која е покриена со фосфоресцентен материјал (слика 9.4).

Во случај кога металната мрежа се напојува со негативен напон, таа ги одбива електроните и спречува да паднат на анодата. Анодите се направени од спроводлива јагленова електрода која е обложена со фосфор, во форма на сегмент

или точка, за прикажување на поединечни знаци. Анодата се напојува со позитивен напон, при што се создава силно електрично поле што доведува до забрзување на електроните, кои ја поминуваат мрежата. Под дејство на електричното поле електроните добиваат енергија која е доволна за побудување на фосфорот којшто е во вид на тенок филм врз анодата, а електроните се враќаат во основната состојба со емисија на светлина, т.е. светење на анодите. На тој начин, сегментот емитува светлина кога електроните взаемнодејствуваат со тенкиот фосфорен филм наталожен врз анодите, т.е. може светлината да се емитува од седумсегментна цифра (слика 9.5). Додека пак, кога анодите се напојуваат со негативен напон, тие ги одбиваат електроните од нивната фосфорна обвивка и затоа остануваат неосветлени. Анодите се поврзуваат со надворешните водови директно или преку сребрени алуминиумски ленти за интегралното коло. Бојата на екраните е слабо зелена, со висина на цифрата до 15 mm. Работниот напон на анодите на вакуумски флуоресцентни екрани (VFD) може да биде 12 V прав напон (DC), што доведува до значителен број електроди.

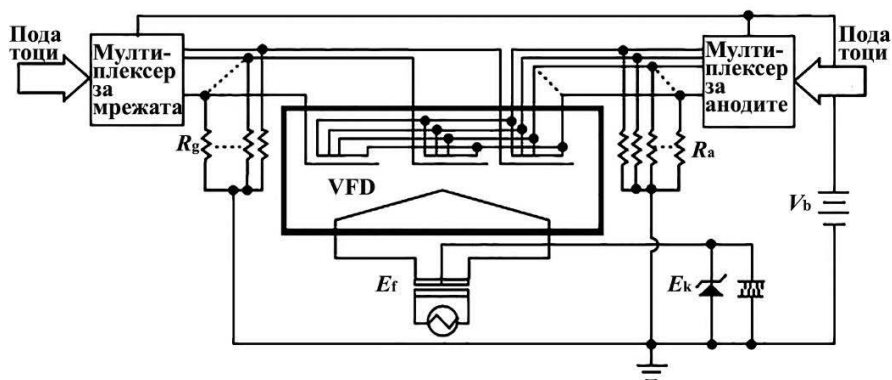


Слика 9.4. Приказ на вакуумски флуоресцентен екран.



Слика 9.5. Внатрешна поврзаност на седумцифрениот сегмент со пиновите.

За да се намали бројот на анодите – електроди на вакуумски флуоресцентни екрани (VFD) се користи методот на мултиплексирање (слика 9.6), при што соодветните анодни сегменти се поврзани со линија за податоци. Соодветните анодни сегменти се поврзани обично со посебна мрежа, при што мултиплексерот ги насочува влезните податоци. Секоја цифра има своја посебна мрежа така што дифузијата на електрони од катодите, и се контролира од напонот на мрежата којшто зависи од временскиот циклус на мултиплексирање. Од работниот напон ќе зависи осветленоста на сегментот, а од работниот циклус ќе се дефинира светењето на одреден сегмент (слика 9.6). Фреквенцијата на освежување на сегментите е помеѓу 75 Hz и 200 Hz.



Слика 9.6. Мултиплексирање на мрежите и анодите кај вакуумски флуоресцентни екрани (VFD).

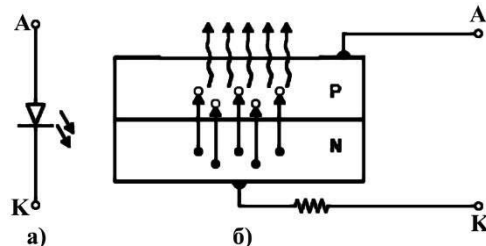
Во пракса се користат шеми со шест водови и осум водови, за намалување на работниот напон преку проширен работен циклус. За намалување на работниот напон се користи методот на двојно скенирање со две анодни магистрала кои се управувани од посебни интегрални кола.

Осветлувањето на вакуумски флуоресцентни екрани (VFD) зависи пропорционално од напонот помеѓу анодата/мрежа и применетиот работен циклус. Тоа е во опсег од 500 cd/m^2 до 4.000 cd/m^2 за мултиплексирани дисплеи, при траење на импулсот од $30 \mu\text{s}$ до $1 \mu\text{s}$, респективно. За да се одржи рамномерно осветлување, се дотерува работниот циклус за контрола на осветленоста на вакуумски флуоресцентни екрани, наместо напонот помеѓу анода/мрежа. Деградацијата на вакуумски флуоресцентни екрани настанува поради оштетување на слојот од фосфор од страна на електроните, која се намалува со намалување на напонот помеѓу анодата/мрежа.

Исто така, за екран на вакуумски уред може да се смета екранот на осцилоскоп со катодната цевка, но овде нема да го разгледуваме.

9.2. Дизајн на екран со лед диоди

Екраните на инструментите можат да бидат направени и од полупроводнички уреди. Така, на пример, екраните можат да бидат направени од диоди кои светкаат (LED – light emitting diode), кога тие ќе се поларизираат во пропусна насока. Износот на емитираната светлина е пропорционална на струјата што тече низ диодата. Ефикасноста на светлечките диоди (LEDs) е околу 10 %, а кај органските светлечки диоди (OLED) ефикасноста е 90 %. Луминисценцијата на светлечките диоди е пропорционална со струјата што тече кога диодата е поларизирана во пропусна насока, во широк опсег на спектарот. Во симболот на лед диодата во електричните кругови влегуваат две стрелки кои ја претставуваат емитираната светлина и принципот на работа се дадени на слика 9.7. Лед диодата се состои слој од р-тип полупроводник којшто се наталожува врз n-тип полупроводник, а помеѓу нив се создава n-p премин. Врз слоевите се поставуваат метални електроди, електродата која се поврзува за позитивниот пол на изворот се вика анодна, додека електродата која се поврзува за негативниот пол на изворот се вика катода. На тој начин, диодата е поларизирана во пропусна насока, што доведува до намалување на ширината на запрониот слој (n-p премин) и инјекција на електроните од n-тип полупроводник во р-тип полупроводник. Електроните се малцински носители на полнеж во р-тип полупроводник и се рекомбинираат со шуплините во валентната зона на р-тип полупроводник, при што се емитира светлина од диодата.

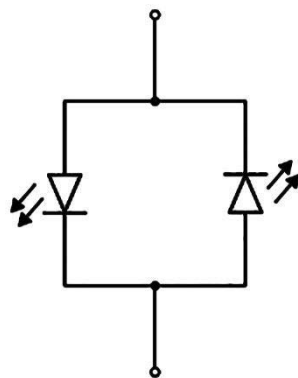


Лед диодите емитираат светлина во различни бои, како што се црвена, зелена, жолта, сина, портокалова, во зависност од структурата на диодата. Така, на пример, галиум арсенид фосфид произведува или црвена или жолта светлина, галиум фосфид емитира црвено или зелено светло и галиум нитрит дава сина светлина. Покрај тоа, постојат лед диоди кои емитираат две бои, како резултат на два n-p премини кои се поврзани паралелно, во пропусна и непропусна насока при што анодата на едната диода е поврзана со катодата на другата диода. При поларизација на диодата со два n-p премини емитираат црвена боја во една насока на струјата и емитираат зелена боја во друга насока (слика 9.8).

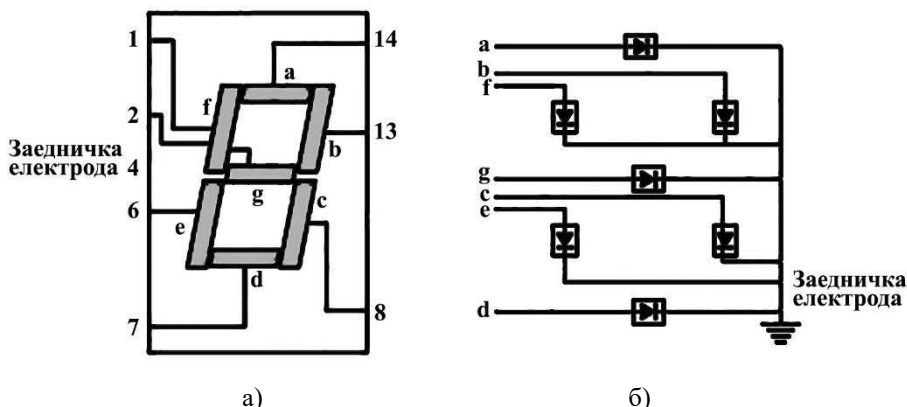
Работниот напон на лед диодата е од 1,5 V до 2,5 V, времето на траење им е околу 10000 h, со време на реакција од 1 ns. Примената на лед диодите е во 7-сегментни, 16-сегментни и матричните екрани. Ваквите дисплеи се користат за означување на алфанумерички знаци и симболи во различни уреди, како што се калкулатори, дигитални инструменти за мерења на различни физички величини и електронски d.c. напојувања итн.

Во екраните кои содржат со 7 сегменти, лед диодите се 9-пински, и се поставени така што да служат за покажување на арапски броеви од 0 до 9. За да се види бројката на екран којшто содржи седум сегменти, неопходно е секоја цифра да се претстави во бинарна кодирана форма (BCD). Во зависност од комбинацијата на сегменти (отсечки) од а до г е вклучен на напон, сите цифри може да се претстават со соодветна читливост (слика 9.9). Додека пак, кај некои екрани бројките ги покажуваат со лед диоди во вид на осветлени точки. Сите 7 лед диоди може да имаат или свои аноди како заедничка електрода – катода (слика 9.9). За работа на екран со цифра со 7 сегменти и со заедничка катода, треба да се примени соодветен напон на секоја од анодите во однос на заедничката катода, за да свети одредена лед диода.

Претставувањето на бројките од 0 до 9 на екран со седум сегментни лед диоди зависи од комбинација на сегментите од а до г кои

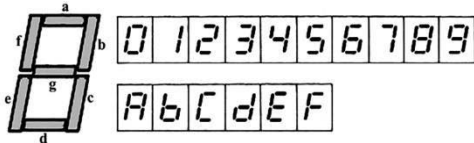


Слика 9.8. Поларизација на ЛЕД диодата со два n-p премини.



Слика 9.9. Екран со седумсегментна цифра од лед диоди: а) изглед на цифрата со лед диоди и б) шематски приказ на цифрата со лед диоди.

се вклучени (слика 9.10). За таа цел, за покажување на одредена цифра потребно е да има уред, т.н. бинарен кодиран декодер којшто ќе изврши претворба на дигиталните сигнали во одредена цифра (табела 9.1). Од табела 9.1 се гледа дека за прикажување на бројката „0“ треба напонот на сегментот g да биде нула. Бинарните кодирани декодери (BCD) за седумсегментни цифри се всушност интегрирани кола, а некои од нив имаат излезни извори на струја, при што не се потребни надворешни отпорници за ограничување на струјата. Во некои екрани броевите од 10 до 15 не се користат за нумерички прикажување, а наместо нив се прикажуваат буквите од А до F (слика 9.10).



Слика 9.10. Екран со седумсегментна цифра, во хексадецимално прикажување.

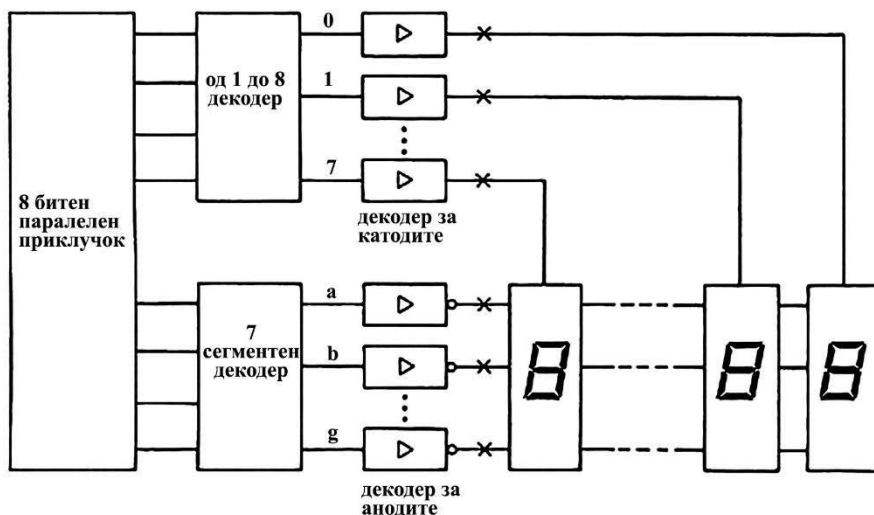
Меѓутоа, екраните со лед диоди служат за прикажување на податоци со повеќе цифри. За да се минимизира бројот на потребните декодери и линии, при користење на екран со повеќе знаци (бројки и букви), згодно е овие знаци да се поврзат заедно како матрица, со користење на мултиплексер за нивно временско разграничување (слика 9.11). За таа цел, екраните со осум знаци кои се изразуваат со седумсегментни лед диоди треба сегментите да се поврзани преку паралелна порта. За одредување на бројот на знаците (цифри или букви) на екранот служи декодерот на катодите, а декодерот на сегментите

Број Z	Влез во BCD				Излез на сегментите						
	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰	a	b	c	d	e	f	g
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
7	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
10	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
11	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1
12	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0
13	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1
14	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1

Табела 9.1. Табела на вистинитост за BCD седумсегментен декодер, во хексадецимално прикажување.

го одредува бројот и видот на сегментите кои ќе светат. Затоа, потребни се 15 водови, коишто може да бидат рамен кабел за да се управува со приказ од 8 знаци и 7 сегменти. Покрај тоа, една 8-битна паралелна врска се остварува со одреден микропроцесор којшто претходно е програмиран со соодветен софтвер.

Мултиплексирање на податоците се овозможува со инсталирање на софтвер на микропроцесорот. Позицијата на бројката се одредува од четири бита, а видот на знакот се одредува од BCD код со користење на



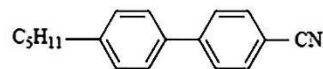
Слика 9.11. Поврзување на екран со 8 знаци и со седум сегменти, на паралелна порта (приклучок).

другите четири бита. Со цел да не се забележи треперење на екранот, треба циклусот на прикажување да се изврши најмалку 100 пати во секунда. Исто така, при процесуирање на влезни податоци на паралелната порта, може податоците на екранот да се зачуваат (складираат) во мемориската единица (шифт регистер).

9.3. Примена на течните кристали во екрани

Екраните со течни кристали (LCD) се екрани кои содржат течен кристал, како соединение што е суштествено за нивно функционирање. Течниот кристал е органска супстанција, каде што ориентацијата на кристалите се менува со електрично поле и се однесува како изолатор. Покрај тоа, перформансите на екранот, како што се интензитетот на светлината, времето на одговор и аголот на гледање, ќе зависат од конфигурацијата на екранот со течен кристал. Течниот кристал (LC) поседува физички својства кои се помеѓу тврдо тело и изотропна течност. Според агрегатната состојба, тие се слични на течности, при што покажуваат својства на тврдо тело, бидејќи молекулите се ориентирани во дадена насока. Постојат три типа течни кристали: термотропни, полимерни и лиотропни. Најмногу се проучувани термотропните течни кристали, поради нивната голема примена. Имено, течните кристали во комбинација со тенкослојните транзистори со ефект на поле се користат во матричните екрани. Полимерните течни кристали се применуваат во различни електронски уреди како оптички филмови и материјали со голема тврдост. Додека пак, лиотропните (холестерични) течни кристали се значајни поради својството на рефлексција на светлината, од нивните молекули.

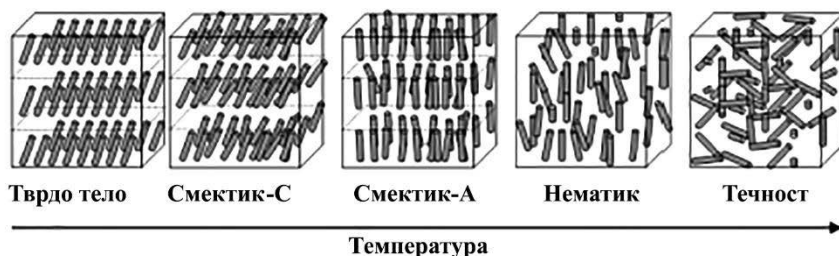
Течните кристали се составени од издолжени органски молекули во форма на прачка или во форма на диск, и претставуваат мезофази помеѓу кристалните цврсти материјали и течностите. Неколку течни кристали (LC) – соединенија покажуваат мезофаза на собна температура (23 °C). Така, на пример, структурата на соединението 4'-пентил-4-цијанобифенил (5CB) е дадена на слика 9.12. Меѓутоа, за примена на течните нематски кристали во широк температурен интервал (од -40 °C до 90 °C), обично се користат еутектички легури. За да бидат задоволени барањата за нивна примена во одреден температурен опсег и другите електро-оптички својства, смесата се состои од 10 до 15 компоненти. Од друга страна, големината на молекулите е неколку нанометри (nm), притоа односот помеѓу должината и дијаметарот на молекулите во форма на прачка или односот помеѓу дијаметарот и дебелината на молекулите слични во форма на диск е најмалку 5 пати поголем. Бидејќи молекулите не се сферни, тие се карактеризираат со насока на ориентација и позиција во течниот кристал.



Слика 9.12. Хемиска формула на 4'-пентил-4-цијанобифенил (5CB).

Постојат три видови течни кристали: термотропни, полимерни и лиотропни. Термотропните течни кристали се соединенија кои ја менуваат фазата со додавање на топлина. Имено, при одредена

температура кристалот се топи и ја одредува првата фаза, при што кристалната структура се топи и се добива матна анизотропна течност. Со зголемување на температурата (T_c) соединението поминува во нова фаза, притоа течниот кристал поминува во изотропна просирна течност. Додека пак, со намалување на температурата материјалот поминува во фазата смектик – А, каде што молекулите се ориентирани во дадена насока и се сместени во даден слој, којшто се вика домен и ја карактеризира смектичната течна фаза (слика 9.13). Вискозноста на течниот кристал кога е во фаза смектик – А е голема и наликува на „маст“. Со натамошно намалување на температурата материјалот се трансформира во фазата смектична – С, насоката на молекулите не е нормална на слојот, туку е наведната. А со понатамошно намалување на температурата, т.е. при ниска температура, материјалот поминува во тврдо тело. Во тој случај, ориентацијата на молекулите е во даден правец и се сместени во даден слој, со бесконечен вискозитет при што молекулите повеќе не се подвижни.



Слика 9.13. Шематски приказ на фазите на термотропните течни кристали, каде што молекулите се во форма на прачки.

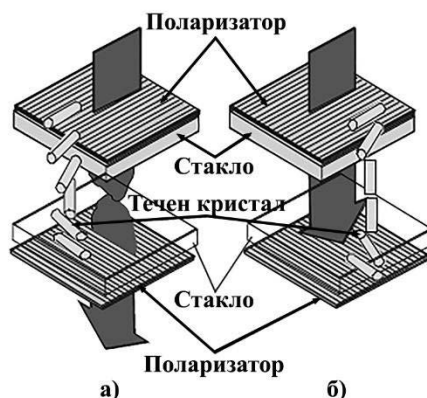
За одреден температурен интервал на течниот кристал, постои нематска фаза на кристалот каде што молекули на течни кристали ја задржуваат вертикалната ориентација, без да постојат домени. Течните кристали со нематска кристална фаза поседуваат мал коефициент на вискозност, што овозможува да се зголеми осетливоста на молекулите на надворешно електрично поле. За да дојдат до израз електрооптичките својства на течниот кристал, врз подлогите се наталожува тенок филм од транспарентен спроводен филм. Покрај тоа, молекулите на течниот кристал треба да бидат претходно ориентирани во дадена насока, форма на тенок филм (80 – 100 nm), дадена насока на два супстрата, како што се стакло или пластика. Течниот кристал е сместен помеѓу две ИТО електроди, врз кои е наталожено тенок (80 nm) филм од полиимид, со цел да се добие однапред ориентиран слој на течниот кристал со дебелина од 30 nm. Тоа се прави со цел за полесна и побрза ориентација на другите молекули од течниот кристал во просторот помеѓу електродите, при постоење на електрично поле. За таа цел,

ориентацијата на молекулите на течниот кристал се прави со нанесување на тенок филм од механички ламиниран полиимид (PI), полиимид (PI) нагизан со јонски сноп и тенок филм од SiO_x добиен со испарување. Во уредите со големи димензии на екранот најчесто се користи полиимид (PI), заради едноставноста на нанесување. Додека пак, во проекционите апарати сликата се добива на екран (платно или луминисцентен екран) којшто е со огромни димензии (за реклами, итн). За таа цел, светлината минува низ течниот кристал којшто користи тенок филм од SiO_x , бидејќи може да издржи осветлување со голем интензитет од светилка со голема моќност, т.е. голема температура.

Друг вид течен кристал е холестеричниот течен кристал, каде што молекулите се подредени паралелно со долгата оска во дадена рамнина, во одредени слоеви, но ориентацијата на молекулите во даден слој се разликува од ориентацијата на молекулите во секој слој, така што молекулите во последователните слоеви кумулативно формираат спирала. Холестеричните течни кристали се во форма на спирала, која наликува на насоката на движење на завртка напред. Ротацијата на холестеричната спирала ротира во рамнината на линеарно поларизираната упадна светлина, при што интензитетот на светлината не се менува, што доведува до голем интензитет на светлината. На тој начин, холестеричниот течен кристал ја рефлектира светлината со одредена бранова должина, без употреба на филтри за боја и поларизатори, при Брегова рефлексива во рамките на видливиот дел на спектарот на светлината. Поради природната оптичка активност на холестеричните течни кристали, екраните направени со холестерички течен кристал се светли, со голема вредност на контрастот, т.е. односот помеѓу светло кон темно на екранот. Соодносот на контрастот на холестерички течен кристал без поларизатор е 30 : 1 што е несоодветен за екрани со висока класа. На тој начин, холестеричниот течен кристал може да се користи за прикажување на електронски книги, рекламни екрани и електрохромни прозорци. Покрај тоа, за оптичката активност на холестеричниот течен кристал не му треба електрично поле за да биде со бела боја, при што се заштедува електрична енергија.

За екрани со мала големина, како што се на инструменти и компјутери, се користи 90° свиткан течен кристал, каде што квалитетот на сликата не зависи многу од аголот на гледање. Од друга страна, екранот со свиткан нематски (TN) кристал со дебелина од околу $2 \mu\text{m}$ се користи за екрани на проектори и екран за виртуелна реалност. Свиткан нематски (TN) кристал се применува за вртење на рамнината на поларизација од 90° во многу екрани со мала големина и за компјутери, при што аголот на гледање не зависи многу од насоката на гледање (слика 9.14). Од сликата следува дека екраните со свиткан нематски кристал имаат бела боја кога не е приклучен напон на електродите и се

обојува црно кога ќе се приклучи напон. Во случај кога не е приклучен напон на електродите и при упадна светлина од горната страна на течниот кристал, таа поминува низ поларизатор притоа се дефинира рамнината на поларизација на светлината. Меѓутоа, течниот кристал придонесува за ротација на светлината за 90° на неговата долна страна, притоа рамнината на поларизација на светлината е паралелна со оптичката оска на долниот поларизатор (анализатор), притоа течниот кристал се обојува бело. Додека пак, при вклучување на напон на краевите на електродите (5 V) во коишто е сместен течниот кристал, тогаш доаѓа до ротација на рамнината на поларизација на светлината. Тоа придонесува рамнината на поларизација на светлината на поларизаторот и анализаторот да се нормални помеѓу себе, притоа светлината се апсорбира од анализаторот, и уредот се обојува со црна боја (темно). Всушност течниот кристал под дејство на напон придонесува рамнината на поларизација на светлината да го менува аголот во него. За таа цел, постои праг на напонот при што молекулите на течниот нематски кристал се ориентираат долж електричното поле (слика 9.146), а уредот се обојува со црна боја. Тоа придонесува обојувањето на течниот кристал со црна боја да се јави на релативно низок напон. Ако аголот на вртење на молекулите во течниот кристал е помал од 90° , тогаш за да се добие црна боја, ќе треба да се зголеми работниот напон. Додека пак, во случај на додавање на примеси (допинг) на нематски течен кристал со холестеричен течен кристал при што аголот на вртење на рамнината на поларизација на светлината е поголем од 90° , тогаш ќелијата се нарекува супер извиткан нематски кристал.



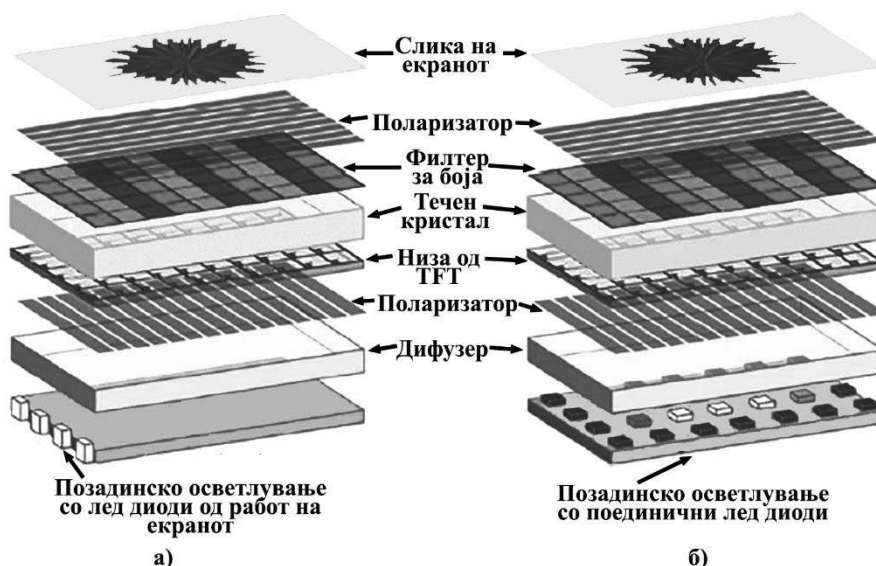
Слика 9.14. Шематски приказ на 90° нематски течни кристали и конфигурацијата на поларизаторот при: а) $V = 0$ и б) $V \gg V_{th}$.

9.4. Екран со течни кристали

Во зависност од механизмот на осветлување на течниот кристал постојат три типа екрани со течни кристали (LCD): трансмисион, рефлектирачки и трансфлективни (комбинација од првите два). Во уредите кои се со трансмисионен екран со течен кристал се користи позадинско осветлување за осветлување, што доведува до голема осветленост и висок сооднос на контрастот. Во некои од трансмисионите екрани со течен кристал не се користат филмови за компензација на фаза, притоа аголот на гледање е ограничен и одговара за лаптоп компјутери, итн. Покрај тоа, трансмисионите екрани со течен кристал се користат за проектори. За позадинско осветлување се користат флуоресцентни ламби со висока моќност или низи од диоди што емитуваат светлина (LED). Трансмисионите екрани на дневно светло имаат слаба осветеност и контрастност. Од друга страна, рефлектирачките екрани со течен кристал може да бидат екрани со директно гледање и екрани за проектори. Обично во рефлектирачките екрани со директно гледање не треба позадинско осветлување, при што енергијата за негово напојување е мала. Рефлектирачки екрани со директно гледање се направени од холестеричен течен кристал (Ch-LCD) и бистабилен нематски течен кристал. Холестеричниот течен кристал (Ch-LCD) има структура во форма на спирала структура, притоа ја рефлектира светлината со одредена боја и за конструкција на екранот не требаат филтри за боја или поларизатори. Тоа овозможува рефлексивната за одреден опсег на видливиот дел на светлината да зависи од должината на одот на спиралата на холестеричниот течен кристал и високата вредност на индексот на рефракција на употребениот течен кристал. Најголем недостаток на рефлектирачкиот екран е слабата осветленост и контрастност на екранот при собна светлина, бидејќи за рефлектирачки екран не треба позадинско осветлување, што ја намалува неговата тежина, а уредот е со мала дебелина ($<200 \mu\text{m}$). Меѓутоа, рефлектирачки екран во темна просторија е сосема нечитлив. Затоа, како решение е трансфлективниот екран со течен кристал кој ги комбинира карактеристиките на трансмисиониот екран и рефлектирачки екран. Во темен амбиент позадинското осветлување се вклучува и екранот работи како трансмисионен екран, а во осветлен амбиент позадинското осветлување се исклучува и работи само во рефлектирачки режим.

Трансмисиониот екран е екран што не емитува светлина, туку тој претставува дводимензионален модулатор на светлина, со позадинско осветлување. Оттука, екранот со течен кристал се состои од позадинско осветлување, модулатор на светлина и слој за контрола на светлината. Позадинското осветлување е извор на бела светлина, притоа

интензитетот на светлината треба да биде ист во сите точки на екранот, пред таа да падне на првиот полааризатор. Познати се два вида конфигурации на позадинско осветлување, како што е осветлување од работ на екранот и директно осветлување (слика 9.15). Во екраните со осветлени рабови, цела низа од лед (LED) диоди се распоредени на



Слика 9.15. Шематски приказ на екран со течен кристал и конфигурација на одредени елементи при позадинско осветлување: а) со лед диоди распоредени на едниот раб на екранот и б) рамномерен распоред на поединични лед диоди.

работ на панелот на екранот. По пат на рефлексija, светлината поминува низ течниот кристал и другите елементи, за да од другата страна на екранот да биде видлива сликата која се креира од точките (пикселите) кои можат да бидат осветлени или темни. Додека пак, кај екранот со директно осветлување, позадинско осветлување се должи на илјадници зони за осветлување добиени од мали (мини) лед (LED) диоди, секоја со големина од околу 100 μm , во зависност од потребната осветленост. Осветленоста на секоја зона е споредливо со органски лед (LED) диоди и се контролира независно, притоа може да постигне сооднос на контраст при светло и темно, којшто е од ред на големина од $10^6 : 1$. Додека пак, модулаторот на светлината дозволува дел од светлината од позадинското осветлување да помине низ оптички уреди, за да се добие монохроматска слика на предната страна. Ако сакаме сликата да биде во боја, треба екранот да поседува слој за контрола на светлината, којшто се состои од низа филтри за боја при што монохроматската слика ќе ја претворат во слика во боја и ќе ја контролира рефлексijата на светлината, од околината.

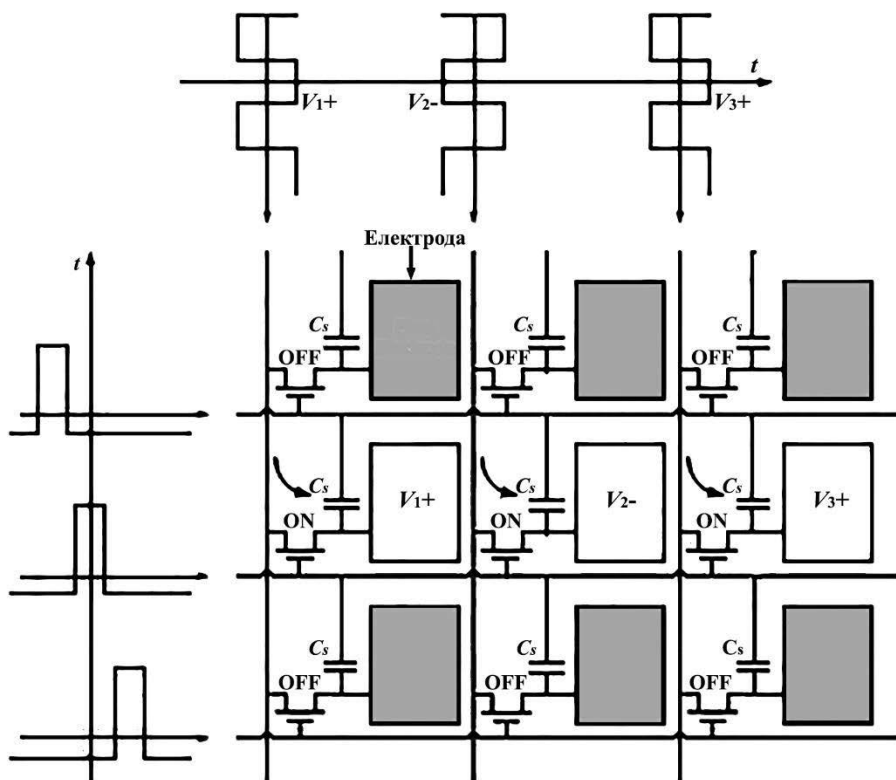
Модулаторот на светлина го сочинуваат: првиот поларизатор на светлината (во форма на филм или супстрат) после позадинското осветлување, супстрат со низа електроди формирани на него, слој од течен кристал, втор супстрат со комплементарни електроди и втор поларизатор на светлината (во форма на филм или супстрат). Модулаторот на светлина дозволува дел од светлината од позадинското осветлување да помине низ секој елемент на екранот, во согласност со влезниот сигнал кој ја дава сликата (видеосигналот).

Светлината од позадинското осветлување паѓа на дифузер (матово стакло или друг материјал), со цел да добие хомогено позадинско осветлување. За да се добие голем сооднос на контрастот, кај екраните со течен кристал потребно е светлината да биде линеарно поларизирана. За таа цел, се користат два поларизатори во форма на лист, за екрани со директно гледање на сликата и со големи димензии (слика 9.15). На првата стаклена плоча, од нејзината долна страна или од другата страна на спроводливата транспарентна електрода (ITO) е поставена низа од транзисторите со ефект на поле и во форма на тенки филмови (TFT). Овие транзистори (TFT) служат за прекинувачи, со кои се контролира активноста на секоја точка од екранот, притоа сликата која се гледа на екранот е составена од огромен број обоени точки (пиксели). За екран со течен кристал со резолуција 4K2K (3840 × 2160 × RGB) има околу 24 милиони обоени точки (пиксели), притоа RGB е обоеноста на секоја точка која зависи од филтерот за боја. Обично транзисторите (TFT) се осетливи на светлина, затоа мора да бидат заштитени со непросирна маска од позадинското. Течниот кристал (LC) во форма на тенок слој е помеѓу двете спроводливи транспарентни електроди (ITO), врз кои е наталожено тенок филм од полиимид со дебелина од 80 nm или тенок фото-ориентиран филм од 30 nm. Растојанието помеѓу двете спроводливи транспарентни електроди (ITO), врз кои е наталожено тенок филм од полиимид на трансмисионите екрани со течен кристал е од 3 μm до 4 μm .

Помеѓу парот електроди се создава електрично поле кое зависи од видеосигналот на сликата и со него се контролира ориентацијата на молекулите во слојот од течен кристал (слика 9.15). Со менување на ориентацијата на молекулите се променува и рамнината на поларизацијата на влезната, што доведува некои точки да се со одреден интензитет на светлината, а други точки се со црна боја.

Во модерните екрани со течен кристал (LCD) со активна матрица, во основа подлогата претставува електрода. Напонот на оваа електрода се менува во однос на електродата на втората подлога, притоа електричното поле во течниот кристал ќе зависи од него. Покрај тоа, ориентацијата на молекулите во слојот од течен кристал ќе зависи од јачината на даденото електричното поле.

Структурата дадена на слика 9.16. претставува електричното коло кое е формирано од транспарентен спроводник, како што е индиум калај оксид (ITO). Ако немаме напон, течниот кристал ја врти рамнината на поларизираната светлина, при што може да биде паралелна или нормална на вториот поларизатор, притоа точката (пикселот) може да биде осветлена или темна. Со доведување на напон се менува електрично поле во одреден TFT транзистор, придружен на дадена



Слика 9.16. Шематски приказ на дел од подлогата во екранот со течен кристал (LCD) со активна матрица, каде што ON е вклучен, а OFF исклучен транзистор и C_s е кондензатор.

точка, а ориентацијата на течниот кристал се менува. Тоа доведува рамнината на поларизираната светлина да остане непроменета, а светлината поминува низ точките (пикселите). Светлината поминува низ оваа електрода бидејќи е транспарентна, додека водовите за напонскиот сигнал (за податоци), водовите за напојување на TFT-транзисторите обично се направени од метал. Така што, во овој дел од модулаторот на светлината не се врши трансмисија на светлина. Меѓутоа, површината на овие елементи од модулаторот е со минималните димензии во однос на електродите, и обично нивната минимална големина е иста, без оглед на резолуцијата на екранот со течен кристал (LCD), големината на елементите што емитуваат светлина се намалува, т.е. површината на

транспарентната електрода исто така се намалува. Всушност, со зголемување на резолуцијата на течен кристал (LCD), сложеноста на производството

генерално се зголемува и енергетската ефикасност на добиениот екран се намалува. За екрани со големи димензии и со директно гледање, се применува TFT транзисторот од a-Si поради едноставниот процес на производство и пониската цена во однос TFT транзисторот од поликристалниот силициум (p-Si). Од друга страна, подвижноста на електроните на p-Si е поголема во однос на a-Si, така што нејзината големината на точките (пикселите) е помала, а неговата резолуција е поголема.

Перформансите на екранот, како што се светлина што поминува низ екранот, времето на одговор и аголот на гледање зависат од течниот кристал (LC) и конфигурација на другите елементи на екранот. Од друга страна, физичките параметри на екраните во форма на рамен панел зависат од големината на екранот, односот на страните, неговата резолуција и видот на точките (пикселите). Големината на екранот се одредува според должината на дијагоналата, во единици од инчи. На пример, екран од 15 инчи (1 инч = 2,54 cm) одговара на дијагоналата на гледање на екранот е 38,1 cm. Покрај тоа, екранот може да биде во форма на квадрат, правоаголник или портрет.

Обично кај рамните екрани (FPD) сликата се должи на мноштво од правоаголни точки (пиксели), притоа квалитетот на сликата ќе зависи од бројот на пиксели на екранот. Така, на пример, видео графичката низа на точки (VGA) означува екран со ширина од 640 пиксели и 480 во висина, при однос на екранот од 4 : 3. Двојното зголемување на бројот на пиксели во колоните и редовите доведува до 4 × резолуција, а се означува со 4K2K. Така, на пример, екран од 5,5 инчи и со однос на страните од 16 : 9 и резолуција од полна висока дефиниција (1920 × 1080 – FHD), при што големината на точките треба да биде околу 63 μm, а густината на точките (пикселите) на екранот треба да биде околу 401 точки на еден инч (ppi). Користењето точки (пиксели) овозможува различна осветленост на истите. Околу секоја точка (пиксел) постои неактивна област зафатена од меѓуелектродни површини, така што се дефинира „фактор на полнење“ како однос на активната површина на точките на екранот и целата големина на екранот. Меѓутоа, за да се обезбеди соодветна боја на точката (пикселот), се користи филтер за боја, со помош на комбинација на основните бои. За појава на која било боја потребни се најмалку три основни бои.

Затоа, секоја точка (пиксел) во боја е составена од три точки (пиксел за црвена, зелена и сина боја – RGB). Така, секоја точка (пиксел) од екранот со течен кристал (LCD) е поделена на потпиксели, кои се порамнети со точката за црвена, зелена, сина боја, а во поново време и

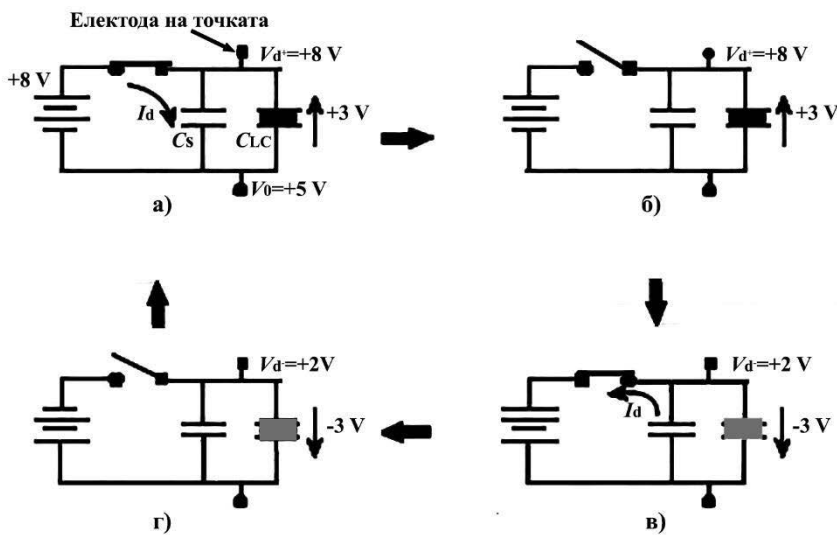
точката за бела светлина, сите поставени во соодветна низа. Всушност, точките за црвена, зелена и сина боја во филтерот за боја се способни да вршат трансмисија на светлината со одредена боја, а ги апсорбираат сите други бои. Човечкото око ја перципира светлината со одредена боја, бидејќи тоа не може да ги разликува другите точки (пиксели) поради нивната мала големина. Од друга страна, различните интензитети на основните бои од секоја точка се перципираат како една точка со одредена боја. На тој начин, филтерот за боја ја дава посакуваната боја на точката, поради различните интензитети на светлината од потточките. Така, на пример, ако обоената точка има големина од $63 \mu\text{m} \times 63 \mu\text{m}$, тогаш димензијата на секој потточка ќе биде $21 \mu\text{m} \times 63 \mu\text{m}$. Во некои екрани со течен кристал се добиваат различни бои со филтрирање на несаканите бои од белото позадинско осветлување. Така, на пример, со воведувањето на белата потточка, ефикасноста на екранот се згледува. Всушност, во екраните со течен кристал треба густината на точките да е толку голема при што човечкото око не може да ги разликува поединечните точки. Тоа доведува до многу висока резолуција на точките, т.е. густината на точките да биде поголема од густината на фоторецепторите во мрежницата, кога сликата се проектира на мрежницата на окото. Така, на пример, за да биде исполнето наведеното, треба густината на точките да биде 300 на инч (300 ppi), растојание на јасно гледање од 30 cm.

9.5. Техника на адресирање на екран со течни кристали

За работа на екраните со течен кристал (LCD) се применуваат техниките на управување со активна матрица и со пасивна матрица (PM). Во почетокот екраните со течен кристал се користеле како монохроматски екрани на инструментите, калкулатори и дигитални часовници. Во денешно време, нивната примена е во различни инструменти, осцилоскопи, електрокардиографи, калкулатори, мобилни телефони, автомобилите, итн. Под адресирање на екранот се подразбира претворба на информациите што обично се во вид на секвенцијални напонски импулси за да се вклучат или исклучат елементите на екранот (сегменти или точки). За таа цел, постојат три главни методи за пренос на информациите на рамен екран: адресирање со активна матрица, директно адресирање и пасивно-матрично адресирање. Во зависност од видот на екранот ќе се примени соодветна техника за пренос на информациите со нивно адресирање кон соодветен елемент. Во зависност од информацијата ќе се промени бојата на

елементот на екранот и на тој начин отчитувањето на податоците е олеснето.

Квалитетот на екранот со течен кристал (LCD) со активна матрица зависи од изолацијата на секоја точка (пиксел) од екранот, притоа посебен уред го контролира полнењето на кондензаторот и го одржува капацитетот и напонот до посакуваното ниво на сива боја, сè додека не се промени нивото на напонот од линијата на податоци. Со примената на соодветен позитивен импулсен напон од одредена магистрала (вод) на портите, тоа доведува до вклучување на сите TFT транзистори. Исто така, кондензаторите C_C (капацитет на течниот кристал) и C_S се полнат на ниво на напон што се обезбедува преку магистралата за импулси (податоци) (слика 9.16 и слика 9.17).



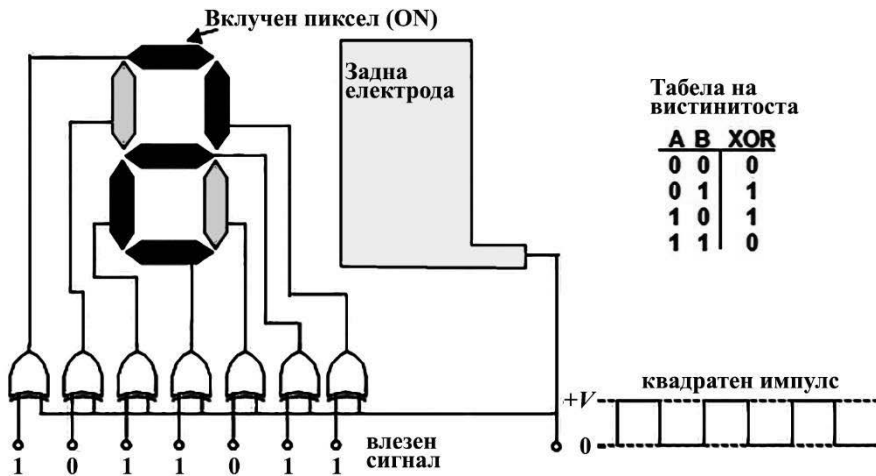
Слика 9.17. Шематски приказ ги илустрира принципите на работа на TFT транзисторот.

Од друга страна, напонот на електродата се контролира со напонот којшто постои на кондензаторот. Овој кондензатор се наелектризира, со течење на струја низ транзистор со тенок филм (TFT), којшто се напојува преку водот за податоци, во форма на напонски сигнал и се складира во кондензаторот, за секоја точка (пиксел). Кондензаторите кои се во дадена линија, се полнат до напон којшто ќе зависи напонскиот сигнал, преку низата од TFT-транзисторите за даден ред во екранот. Од друга страна, напонот на секој кондензатор во даден ред и колона ќе зависи од напонот на даден вод којшто се пренесува преку TFT-транзисторите. Тоа дозволува напонот на кондензаторот да го одржува напонот на електродата, сè додека не се промени напонот на даден вод.

Во случај кога екранот со течен кристал (LCD) со активна матрица се напојува со константен прав напон (DC), тој би предизвикал електрохемиска деградација на органските молекули во течниот кристал (LCD). Затоа, треба да се менува поларитетот на напонот после секој правоаголен импулс. Обично, напонот на портата на TFT транзисторот е 20V за негово вклучување, а напон од -5V за исклучување на TFT транзисторот. За таа цел, се користи a-Si TFT транзистор при што односот на струјата на вклучување/исклучување што тече низ транзисторот е од ред на големина од 10^6 (слика 9.17). Ако земеме дека ITO електродата е приклучена на прав напон од +5V. За дадена точката од екранот (пикселот) да биде обоена со сива боја, правоаголен напон од магистралата треба да е +8V. При овие услови, портата на транзисторот е на позитивен напон, така што TFT транзисторот е вклучен и струјата тече низ него и предизвикува полнење на кондензаторот C_s . Од друга страна, електродата – увор на TFT транзисторот е на ист напон како магистралата за податоци, бидејќи падот на напонот помеѓу извор и увор е минимален, т.е. $V_d = +8V$ (слика 9.16). Од друга страна, уворот на TFT транзисторот е поврзан со долната електрода на точката (пикселот), тогаш напонот низ ќелијата на течниот кристал (LCD) е +3V (слика 9.17а, за $t = 27$ ms). Ако напонот на портата падне на нула или е под прагот, тогаш не тече струја низ TFT транзисторот (слика 9.17б), за време на временски импулс од 16,7 ms (при фреквенција од 60 Hz на слики). Во овој период, кондензаторот којшто бил наполнет го задржува електрицитетот, така што напонот на точката (пикселот) останува на +3V. Меѓутоа, наполнетиот кондензатор ќе предизвика течење на струјата во обратна насока, така што во тој временски интервал напонот на магистралата за податоци се намалува на +2V. Тоа ќе предизвикува течење на струја во обратна насока (слика 9.17в, за $t = 27$ ms) низ ќелијата на течниот кристал (LCD), бидејќи напонот на горната електрода е помал од напонот на долната електрода на ќелијата на течниот кристал и предизвикува балансирање на насоката на молекулите на течниот кристал. Всушност, TFT транзисторот е во спроводна состојба притоа напонот на ќелијата на течниот кристал е обратен и изнесува -3V. Во следниот временски интервал TFT транзисторот е исклучен притоа кондензаторот останува наполнет, а напонот на ќелијата на течниот кристал (LCD) останува на -3V (слика 9.17г, за $t = 16,7$ ms).

За друг начин за управување на екраните со течен кристал (LCD) се применува техниката со пасивна матрица (PM). Во почетокот, се применувала техниката на пасивна матрица (PM) за алфанумерички прикази со седумсегментни електроди и директно адресирање (познат како статичко управување). Во случај на екран од седум сегменти, на две стаклени плочки се нанесуваат ITO (индиум калај окси)

транспарентни електроди, а помеѓу нив се поставува течен кристал (LC) и на крајот става лепило по рабовите на двете стакла, за да остане внатре течниот кристал. Секој сегмент од екранот се формира од двете стаклени плочи со ITO електроди и течниот кристал внатре во тој простор (слика 9.18), а формата ќе зависи од положбата на сегментот во екранот. Меѓутоа, може задната електрода да биде заедничка за сите сегменти, а во исто време и спроводна. Додека пак, електродите од другата стаклена плоча се извлекуваат во форма на водови. Пресекот на

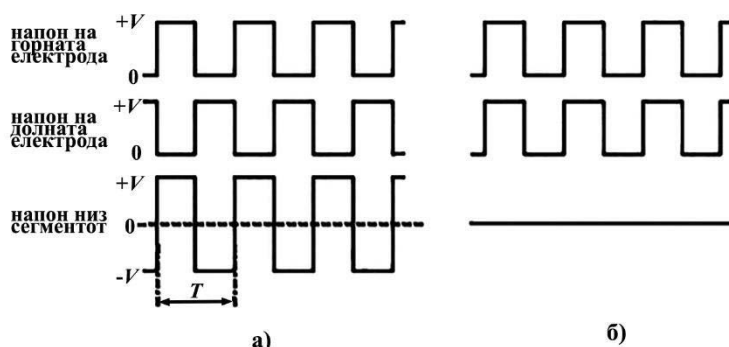


Слика 9.18. Шематски приказ на управување на едноставно коло на LCD екран со седум сегменти.

горните електроди и долните електроди формира еден сегмент, притоа на екран со n сегменти ќе му требаат $n+1$ врски и n управувачи, за електрично насочување на сигналите. Едноставно коло за управување на екран со седум сегменти и со течен кристал (LCD) е дадено на слика 9.18. За функционирање на сегментите се користи логичко коло XOR со повеќе порти (чија табела за вистинитост е прикажана на истата слика) за да се добие потребниот напон на дадениот сегмент, според влезниот сигнал и такт-сигналот. Во случај, кога екранот се користи за прикажување на бројки, можно е добивање на голем контраст на сликата. Меѓутоа, за екрани кои содржат голем број бројки, а со тоа и зголемен број сегменти, потребно е да се зголеми број на водовите. Тоа ќе доведе до сложени пристапи за адресирање и високата цена на екранот. Затоа се користи мултиплексер, за олеснување на управувањето на адресирањето на сегментите.

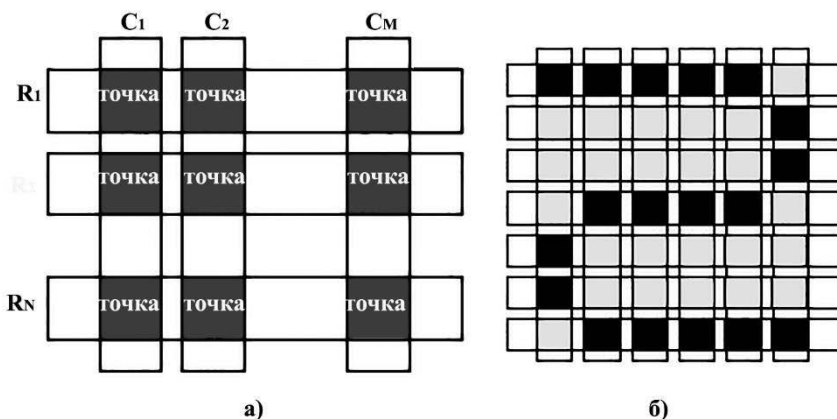
Со цел да се избегне јонизација на молекулите на течниот кристал, напојувањето на сегментот треба да биде квадратен импулс на задната електрода и со 50 % работен циклус. Фреквенцијата на освежување треба да биде ниска за да се намали потрошувачката на

енергија, но доволна за да се избегне треперење на сегментот. Исто така, на горната електрода се применува квадратен напон со исти карактеристики. Оттука, напонот низ сегментот (слика 9.19а) е разликата помеѓу напоните што се применуваат на електродите на горната и задната електрода, при одредена фаза на напоните на електродите. Ако напонот е поголем од V_{SAT} , тогаш сегментот е во состојба вклучен, и обично овој напон низ сегментите кои се во состојба вклучено (ON) треба да биде околу три пати поголем од прагот напон за даден сегмент (V_{TH}). Од друга страна, сегментот се исклучува кога напоните на горната електрода и задната електрода се во фаза (слика 9.19б).



Слика 9.19. Бранови форми при пасивно матрично адресирање: (а) сегментот е вклучен и (б) сегментот е исклучен.

Покрај тоа, во пасивна матрични екрани сегментите се заменуваат со точки (пиксели), кои се распоредени во матрица со електроди поставени во одреден ред и колона (слика 9.20). Екранот со течен кристал (LCD) и со пасивна матрица се состои од два стаклени



Слика 9.20. Екран со течен кристал (LCD) со пасивна матрица: (а) шематски приказ на точките кои составени од електроди во редови R_N и колони C_M и (б) прикажување на број.

супстрати, врз кои е наталожено ITO електроди, по целата површина на точката. Електродите на едната плочка се распоредени во N редови, а електродите на другата плочка се распоредени во M колони, притоа се создава матрица со $N \times M$ адресирани пресеци во форма точки (пиксели). На тој начин, се намалува вкупниот број на водови од $N \times M + 1$ (кога пикселите се адресираат поединечно) на $N + M$.

За управување на адресирањето на податоците се користат интегрираните кола, т.н. драйвери кои се сместени на периферијата на екранот, дозволувајќи на колоните и на редовите приклучување на импулси на напон, за да се обојат одредени точки (пиксели). Затоа, на секој крај од магистралните линии се спојуваат на одреден ред и колона. Во зависност од временската распределба на импулсите по редовите и колоните се вклучува или исклучува одредена точка од екранот. Овие редови и колони се поврзани со интегралното коло, односно со драјверот којшто е одговорен за сликата на екранот. Затоа, во поново време постои интегрално коло одговорно за видеосигналот на екранот. Всушност, секој ред (што ја претставува заедничката електрода) секвенцијално се скенира со избран пулс за одреден временски период T , при што секој импулс е со времетраење T/N . Податоците за сликата во форма на напони (наречени колони, сигнали или видео) се применуваат паралелно за сите колони. Исто така, како кај директното адресирање каде што точката од екранот е состојба вклучена под услов поврзаните сигнали за редови и колони да се спротивни по фаза. Фреквенцијата на скенирање на редовите и колоните ($1/T$) треба да биде помеѓу 60 и 90 Hz и обично се избегнува фреквенцијата на мрежата од 50 Hz, поради можноста за треперење на екранот. За време на $1/N$ од рамката, постои електрично поле што ги ориентира LC молекулите, но за останатото време молекулите на течниот кристал се релаксираат и се враќаат во првобитна ориентација.

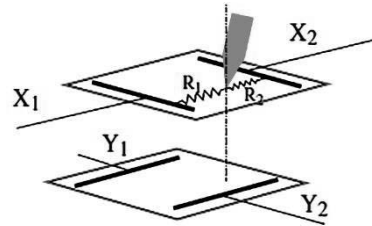
9.6. Контрола на рамните екрани со допир

Луѓето комуницираат со околината со помош на петте сетила: вид, слух, вкус, мирис и допир. Во последно време рамните екрани во различни инструменти, опрема, мобилните телефони, телевизорот и лаптоп компјутерите се контролираат со помош на допир. Очигледно дека ваквиот начин на контрола ја зголемува брзината на обработка на информации и ја упростува работата со уредите кои имаат рамен екран. Затоа, екранот треба да биде оптички транспарентен, за да имаме контрола на извршените дејствија. Допирот се овозможува со човечкиот прст, а резолуцијата е сосема доволна за типични примени. Рамниот екран за реагира на допир на прстот (или кој било друг предмет), треба во него да биде вграден сензор за допир на целата површина на екранот. Во зависност од начинот на кој се остварува контрола на екранот, тие можат да бидат отпорни, капацитативни и оптички.

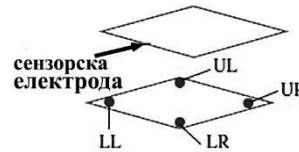
Екранот којшто реагира на промена на отпорот при допир се состои од два спроводни слоја кои се на блиско растојание. При допир на екранот, горниот спроводник се деформира и се воспоставува контакт со долниот спроводник, притоа вредноста на отпорот се менува според положбата на допир (контакт). Обично горната спроводна електрода е полиетилен терефталат (PET) или полиимид (PI) кои треба да биде еластични и се во форма на фолија, кои при деформација се остварува контакт помеѓу горната и долната електрода. Различните контактни точки ќе доведат до различни промени на отпорот којшто се детектира. Долната електрода треба да биде цврста и неподвижна, во спротивно тоа ќе доведе до виткањето на целиот екран и детекција на лажни контакти. Друг начин на контрола на екранот со помош на 4 жици, каде што две паралелни електроди се поставени на горниот супстрат и обезбедуваат електрично поле во правец на x -оската. Од друга страна, електродите на долниот супстрат обезбедуваат електрично поле во правец на y -оската. Осетливоста на горниот супстрат на допир, при разликата во напонот на двете електроди ($X_1 = 5V$ и $X_2 = 0V$) на горната подлога (што обично се нарекува сигнал за скенирање). Во зависност од положбата на прстот или пенкало кое го допира екранот, може да ја детектира позицијата на допирна точка долж x -оската, според равенката за отпорот $R_{ef} = R_2/(R_1 + R_2)$. Исто така, во дадена допирна точка на горната плоча го одредува и отпорот на долната плоча, во случај кога горната плоча е форма на спроводна фолија. На тој начин се добиваат и информации за положбата на допирот во правец на y -оската (слика 9.21). Во отпорниот екран на допир, отчитувањето на напонот зависи на вредностите на отпорот во насоките x -оската и y -оската. Бидејќи положбата на допир се одредува од отпорот којшто се очитува од четирите жици, овој екран уште се вика екран на допир со 4 жици.

Обично, на горната електрода се нанесува тенок филм од ИТО (индиум калај оксид). За да е спроводен и транспарентен тенкиот филм од ИТО, треба термички да се третира на 300 °C што доведува до деградација на полиетилен терефталат (PET) или полиимид (PI). Затоа, треба ИТО тенки филмови да не се загреваат, но притоа површинскиот отпор е многу голем. Меѓутоа, со помош на електричната шема на 5 жици направен е отпорен екран на допир (слика 9.22). Во овој случај горната електрода е цврста и електрода за отчитување на отпорот (сензор). Со поставување на електроди во аглите на долната плоча UR (горно десно) и LR (долно десно) на напон од 5V. Додека пак, електродите на долната плоча UL (горно лево) и LL (долно лево) на напон од 0V, положбата по x-оската во точката на допир се добива од потенцијалот на сензорната електрода. Во исто време положбата по y-оската во точката на допир се добива од потенцијалот на сензорната електрода.

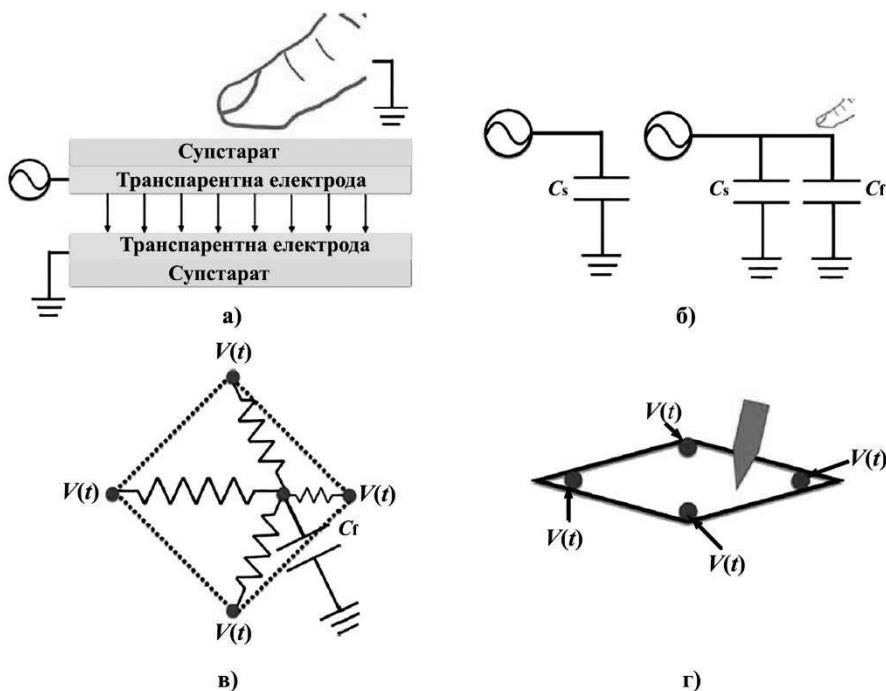
Друг вид контрола на екранот е со менување на капацитетот при допир, притоа не е потребна механичка деформација на горната транспарентна електрода. За таа цел, на горната просирна електрода се донесува сигнал на наизменична струја (AC), притоа се формира паралелна плоча на кондензатор, со заземјена референтна електрода (слика 9.23). Во отсуство на допир, вредноста на капацитетот C_s е точно одредена. Меѓутоа, со допирање на надворешната површина на екранот со прст, капацитетот на кондензаторот се менува, бидејќи човечкото тело обезбедува дополнителна патека за заземјување. Кога прстот ја допира надворешната површина на кондензаторот, човечкото тело обезбедува дополнителна патека до земјата, означена како C_f . Од сликата се гледа дека вредноста на капацитетот се зголемува, поради паралелно поврзување на кондензаторите ($C = C_s + C_f$). Во овој случај, капацитетот се мери помеѓу сензорската електрода и заземјувањето. Секоја од електродите во четирите агли се напојува со наизменичен сигнал и се проследува до електродата која е поврзана со кондензаторот. Положбата на допир се добива со анализа на потенцијалите генерирани од оваа RC мрежа. Капацитативните сензори



Слика 9.21. Структура на електродите и принцип на работа од 4-жичен отпорен екран.



Слика 9.22. Структура на електродите на едната плоча и принцип на работа од 4-жичен отпорен екран.



Слика 9.23. Шематски приказ на капацитивен екран: а) структура на капацитивен екран на допир, (б) принцип на работа на површински капацитивен сензор, (в) шематски дијаграм на допрена точка на капацитивната табла на допир и (г) неговото еквивалентно коло.

лесно детектираат допир со прст, но кај предмети кои се изолатори не се детектира допир.

Функцијата на повеќе допири може да се добие во капацитивната горна плоча, составена од два слоја просирен спроводник кои се подредени во нормални ленти, а се одделени со изолаторски слој. Секоја точка од екранот долж x -оската и y -оската може да се смета како мал екран на допир со мала капацитивност. Со приклучување на напонски импулси на x -електродите последователно и поврзување на сите y -електроди во заедничка сензорска електрода, положбата на допир по x -оската во одредени точки може да се идентификува од вредностите на капацитетот. Додека, положбата на допир по y -оската се одредува со користење на x -оската како сензорска електрода, и последователно скенирање.

Друг начин за позиционирање на виртуелни објекти и контрола на екран е со помош на оптичкото сензорирање. Во таков систем, еден или повеќе емитери на светлина (во инфрацрвениот регион) се примаат од низа на детектори. При допирање на екранот, дел од светлината се блокира или се рефлектира, а со тоа се детектира соодветната положба на прстот. Ваквите оптички сензори овозможуваат не само детекција на

Атанас Танушевски: Дизајн на електронски уреди

допир во 2D домен, туку и во висина, т.е. 3D комуникација. На тој начин, кога корисникот гледа на екранот, со помош на камера машината истовремено го гледа и одговара на потребите на корисникот.

Литература

1. Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications, W.G. Hurley and W.H. Wölfle, John Wiley & Sons Ltd., 2013,
2. Handbook of Transformer Design and Applications 2nd Edition; William Flanagan, McGraw Hill, 1993,
3. Transformer and Inductor Design Handbook - 4th Edition, Colonel Wm. T. McLyman, Taylor & Francis, 2011,
4. Transformer and Inductor Design Handbook - Third Edition, Colonel Wm. T. McLyman, Marcel Dekker, Inc., 2004,
5. Апарати и инструменти, Милчо Ристов, Митре Митрески, Природно-математички факултет во Скопје, 1996,
6. Electronic Instrumentation 2nd Edition, P.P.L. Regtien, VSSD, 2005,
7. Electronic Devices And Circuits, K. Venkata Rao and K. Rama Sudha, McGraw Hill Education (India) Pvt Ltd., 2015,
8. Fundamentals of Electronic Devices and Circuits, G. S. Tomar and Ashish Bagwari, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020,
9. Basic Electronics, Debashis De, Kamakhya Prasad Ghatak, Pearson Education, 2010,
10. Electronics, Principles and Applications, Ninth edition, Charles A. Schuler, McGraw-Hill Education, 2019,
11. Electronic Circuits II For Anna University, B. Visvesvara Rao, K. Bhaskara Rama Murthy, P. Chalam Raju Pantulu, K. Raja Rajeswari, Pearson Education India, 2012,
12. Basic Electronics Engineering: Including Laboratory Manual, Satya Sai Srikant, Prakash Kumar Chaturvedi, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020,
13. Renewable Energy Systems Advanced Conversion Technologies and Applications, Fang Lin Luo, Ye Hong, Taylor & Francis Group, 2013,
14. Essential DC/DC Converters, Fang Lin Luo, Hong Ye, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006,
15. Power Electronics, Daniel W. Hart, Tata McGraw-Hill, 2011,
16. Solar powered high voltage energization for vehicular exhaust cleaning: A step towards possible retrofitting in vehicles, B.S. Rajanikanth, Sankarsan Mohapatro, L. Umanand, Fuel Processing Technology 90 (2009) 343–352,

17. Principles and Elements of Power Electronics Devices, Drivers, Applications, and Passive Components, Barry W. Williams, Barry W Williams, 2006,
18. Power Electronics Circuits Devices and Applications, Muhammad H. Rashid, Pearson Education Limited, 2014,
19. Acoustics: Sound Fields, Transducers and Vibration; Leo Beranek, Tim Mellow, Elsevier Inc., 2019,
20. Piezo-Electric Electro-Acoustic Transducers (Microtechnology and MEMS) - Kindle edition, Valeriy Sharapov, Zhanna Sotula, Larisa Kunickaya, Springer International Publishing Switzerland, 2014,
21. Standard Handbook of Audio and Radio Engineering, Jerry C. Whitaker, Blair K. Benson, McGraw Hill Professional, 2001,
22. Active and Passive Vibration Control of Structures, Peter Hagedorn, Gottfried Spelsberg-Korspeter, 2014,
23. Acoustics and Audio Technology - Third Edition, Mendel Kleiner, J. Ross Publishing, 2012,
24. The Electronics Handbook - 2nd Edition, Jerry C. Whitaker, Taylor & Francis Group, 2005,
25. Electricity and Magnetism - 3rd Edition, Edward M. Purcell, David J. Morin, Cambridge University Press, 2013,
26. Construction of a Proton Magnetometer, W. D. S. Ruhunusiri and M. K. Jayananda, Proceedings of the Technical Sessions, 24 (2008) 78-85,
27. High Sensitivity Magnetometers, Asaf Grosz, Michael J. Haji-Sheikh, Subhas C. Mukhopadhyay, Springer International Publishing, 2017,
28. Measurement and Instrumentation: Theory and Application, Chapter 20 – Rotational Motion Transducers, A. Morris, R. Langari, Elsevier Inc., 2012,
29. Measurement and Instrumentation: Theory and Application - Second Edition, Alan S. Morris, Reza Langari, Elsevier Inc., 2016,
30. Industrial Automated Systems: Instrumentation and Motion Control, Terry Bartelt, Delmar Cengage Learning, 2011,
31. Electrical Machines, Slobodan N. Vukosavic, Springer Science+Business Media, 2013,
32. Electroacoustics - 1st Edition, Mendel Kleiner, Taylor & Francis Group, 2013,
33. Биофизика, Атанас Танушевски, Алма-Скопје, 2014,
34. Studying noise measurement and analysis, Agoston Katalin, Procedia Manufacturing 22, 533–538, 2018,
35. Electrostatic graphene loudspeaker, Qin Zhou and A. Zettl, Applied Physics Letters 102, 2013,
36. Loudspeaker Handbook - 1st edition, John M. Eargle, Springer-Science+Business Media, 1997,

37. Piezoelectric Sensors and Actuators Fundamentals and Applications, Stefan Johann Rupitsch, Springer-Verlag GmbH Germany, 2019,
38. Acoustics for Engineers: Troy Lectures 2nd ed. 2009 Edition, Jens Blauert and Ning Xiang, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009,
39. Study of Real-time Measurement for Thickness of Coating Film Based on Quartz Crystal Oscillator, Xia Ma, Gaofa He, Jianbing Ren, Applied Mechanics and Materials Vol 421, 2013,
40. Quartz Crystal Microbalance, Yuji Teramura and Madoka Takai, Chapter 83 Compendium of Surface and Interface Analysis, 2018,
41. Mass-sensitive, Chapter 7 Biosensors for the Detection of Waterborne Pathogens, Waterborne Pathogens: Detection Methods and Applications Helen Bridle, Marc Desmulliez, Elsevier, 2014,
42. A Novel Voltage Controlled High Frequency Crystal Oscillator Circuits, Ulrich L. Rohde, Ajay K. Poddar, 9th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable, and Broadcasting Services, 2009,
43. Handbook of Force Transducers: Principles and Components, Dan Mihai Stefanescu, Springer, 2011,
44. Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications, Chapter 12 Acoustic Sensors, Jacob Fraden, Springer, 2004,
45. Nanomaterials for Green Energy Micro and Nano Technologies, Chapter 4 - Energy Harvesting Using Droplet, Ankur Goswami, Prosenjit Sen, 2018,
46. Dielectric Phenomena in Solids 1st Edition, Chapter 5 Electrets, Kwan Chi Kao, Academic Press, 2004,
47. Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications Fifth Edition, Chapter 13 Microphones, Jacob Fraden, Springer, 2016,
48. Handbook of Radioactivity Analysis (Second Edition), Chapter 2 Gas ionization detectors, Karl Buchtela, Elsevier, 2003,
49. Fundamentals of Layout Design for Electronic Circuits, Jens Lienig, Juergen Scheible, Springer, 2020,
50. An Analog Electronics Companion Basic Circuit Design for Engineers and Scientists, Scott Hamilton, Cambridge University Press, 2003,
51. Electronic Circuits Handbook for Design and Application - 2nd edition, Ulrich Tietze, Christoph Schenk, Eberhard Gamm, Springer, 2008,
52. Electronic Circuits: Analysis and Design -3rd edition, Donald A. Neamen, McGraw Hill Education, 2006,
53. Modern Control Systems -12th Edition, Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, Pearson, 2010,
54. Process Control Instrumentation Technology -8th Edition, Curtis D. Johnson, Pearson Education Limited, 2014,
55. Principles of Fermentation Technology - 3rd Edition, Chapter 8 Instrumentation and control, Peter Stanbury, Allan Whitaker, Stephen J. Hall, 2016,

56. Principles of Process Control - Third Edition, Dipak Patranabis, Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2012,
57. Power Electronics: Converters and Regulators - Third Edition, Chapter 3 Regenerative Switches, Branko L. Dokić, Branko Blanuša, Springer International Publishing Switzerland, 2015,
58. Introduction to Instrumentation, Sensors, and Process Control, Chapter 16 Process Control, William C. Dunn, Artech House Inc., 2006,
59. Electrical and Electronics Measurements and Instrumentation, Prithwiraj Purkait, Budhaditya Biswas, Santanu Das, Chiranjib Koley, McGraw Hill Education (India) Private Limited., 2013,
60. Electronic instrumentation - Second edition, P.P.L. Regtien, VSSD, 2005,
61. An Introduction to Electrical Instrumentation and Measurement Systems - Second Edition, B.A. Gregory, Macmillan Education Ltd., 1981,
62. Electronic Measurements and Instrumentation, R. S. Sedha, S Chand & Company Pvt. Ltd., 2008,
63. Electronic Measurements and Instrumentation, K. Lal Kishore, Dorling Kindersley (India) Pvt. Ltd., 2010,
64. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement - 2nd Edition, Edited By John G. Webster, Halit Eren, Taylor & Francis Group, LLC, 2014,
65. Instrumentation Reference Book Fourth Edition, Edited by Walt Boyes, Elsevier Inc, 2010
66. A Course in Electrical and Electronic Measurements and Instrumentation, A.K. Sawhney, Puneet Sawhney, DHANPAT RAI & Co. (Pvt.) Ltd., (2012)
67. Electronic Measurement and Instrumentation, R.S. Sedha, S. Chand & Company Pvt. Ltd, 2008
68. Handbook of Visual Display Technology Second Edition, Janglin Chen, Wayne Cranton, Mark Fihn. Springer International Publishing Switzerland, 2016
69. Fundamentals of Liquid Crystal Devices, D.-K. Yang and S.-T. Wu, John Wiley & Sons, Ltd., 2006
70. Introduction to Flat Panel Displays Second Edition, Jiun-Haw Lee, I-Chun Cheng, Hong Hua, Shin-TsonWu, JohnWiley & Sons Ltd, 2020
71. Liquid Crystal Displays Fundamental Physics and Technology, Robert H. Chen, John Wiley & Sons, Inc., 2011
72. Introduction to Flat Panel Displays Second Edition, Jiun-Haw Lee, David N. Liu, Shin-TsonWu, JohnWiley & Sons Ltd, 2008
73. Color in Electronic Display Systems Advantages of Multi-primary Displays, Michael E. Miller, Springer Nature Switzerland AG, 2019
74. Electronic devices and circuits, S. Salivahanan, N. Suresh Kumar, Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2012

75. Liquid Crystal Display Drivers Techniques and Circuits, David J.R. Cristaldi, Salvatore Pennisi and Francesco Pulvirenti, c Springer Science+Business Media B.V., 2009

