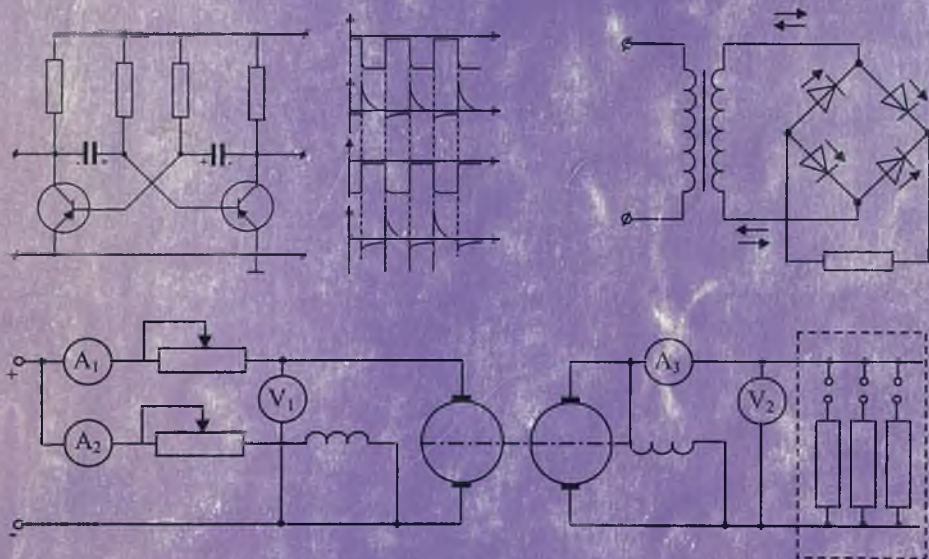


РЪКОВОДСТВО ЗА ЛАБОРАТОРНИ УПРАЖНЕНИЯ ПО ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ЕЛЕКТРОНИКА



• НОВИ ЗНАНИЯ •

В. Модур

доц. д-р Асен Гадавелов
гл. ас. Антон Андонов
ст. ас. Валери Годоров

доц. д-р Андрей Мирев
гл. ас. Емилия Евлогиева
ас. Румен Бъчварски

РЪКОВОДСТВО

за лабораторни упражнения по

ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ЕЛЕКТРОНИКА

Под редакцията на доц. д-р А. Гадавелов

Издателство •НОВИ ЗНАНИЯ•
СОФИЯ, 2000

ПРЕДГОВОР

Ръководството за лабораторни упражнения по електротехника и електроника е предназначено за студентите от Химокотехнологичен и Металургичен Университет, както и за студентите от Технологичен Колеж – София.

Необходимостта от настоящата нова редакция на ръководството се наложи поради значителна промяна в учебната програма, а издаването му поради изчерпване на предното издание.

Всяка лабораторна работа се предхожда от кратки теоретични бележки, които поясняват основни конструктивни особености, принцип на действие, област на приложение и др. съществени черти на изследваното устройство, метод или схема. След това се дават указания за реда на провеждане на измерванията и обработка на опитните данни. Накрая, за да се активизира самоподготовката на студентите са формулирани контролни въпроси, които служат като база за предварителна проверка на знанията преди започване на упражнението. В приложение са поместени примерни протоколи за всяка разглеждана тема, които могат да бъдат използвани за директно отчитане на извършената работа от студента.

Изказвам благодарност на всички колеги взели участие като съавтори в настоящото ръководство със своите идеи и отразен натрупан преподавателски опит.

Ръкописът на ръководството беше рецензиран от доц. д.т.н. Никола Шойлев, на когото изказвам сърдечна благодарност.

София, Март, 2000 г.

А. Гадавелов

СЪДЪРЖАНИЕ

Предговор	3
Правила по техническа безопасност в електротехническата лаборатория - Е. Евлогиева	7
Измерване в електротехниката и електрониката – Методи, уреди и точност на измерванията - Е. Евлогиева	8
ЛР№ 1. Измерване на съпротивления с волтметър и амперметър, с омметър и мегаометър /логимер/ - А. Андонов	15
ЛР№ 2. Компенсационен метод за измерване на постоянни напрежения и пропорционални на тях величини - В. Тодоров	23
ЛР№ 3. Изследване на последователна RC верига при променлив ток - В.Тодоров	29
ЛР№ 4. Измерване на активна мощност с електродинамични ватметри - Е. Евлогиева	35
ЛР№ 5. Изследване на еднофазен индукционен електромер за активна енергия - А. Андонов	43
ЛР№ 6. Изследване на двигател за постоянен ток с паралелно възбуждане - А. Мирев	48
ЛР№ 7. Изследване на еднофазен трансформатор - В. Тодоров	53
ЛР№ 8. Изследване на трифазен асинхронен двигател с ротор съединен на късо - А. Мирев	58
ЛР№ 9. Подобряване фактора на мощността на електрозахранващите линии - А. Андонов	62
ЛР№ 10. Изследване действието на токоизправителни схеми и изглаждащи филтри - А. Гадавелов	70
ЛР№ 11. Изследване действието на управляеми токоизправителни схеми - А. Мирев	79
ЛР№ 12. Многостъпален нискочестотен усилвател -получаване и изследване на амплитудно-честотната характеристика - А. Гадавелов	85
ЛР№ 13. Изследване действието на импулсни схеми - транзисторен мултивибратор, диференцираща верига и транзисторен тригер - Р. Бъчварски	91
ЛР№ 14. Операционен усилвател: Изследване на основните характеристики и разучаване на някои приложения - А. Гадавелов	97
ЛР№ 15. Изследване на логически елементи и схеми - А. Гадавелов, Р. Бъчварски	105
Приложение: Лабораторни протоколи	113
Литература	175

ПРАВИЛА ПО ТЕХНИЧЕСКА БЕЗОПАСНОСТ

В електротехническата лаборатория обикновено се работи с напрежения: еднофазни - 220V, трифазни - 380/220V и постоянни регулируеми до 250V, при които съществува опасност за живота на човека. За да не настъпи злополука или повреждане на скъпи измервателни уреди, необходимо е изключително внимание и дисциплина. Строго да се спазват следните правила за техническа безопасност.

– Прекъсвачите на главното електрозахранващо табло на лабораторията се включват само от ръководителя на упражнението, а в случай на авария или злополука могат да бъдат изключени и от студенти.

– Студентите трябва да са предварително запознати от ръководителя на упражнението с начина на включване и изключване на необходимите захранващи напрежения към работните места.

– На свързаните по време на упражнението електрически вериги се подава напрежение само с разрешение на ръководителя на упражнението и в негово присъствие. Включването трябва да стане след като включващия се убеди, че никой не работи по схемата и не е в допир с тоководещи или въртящи се части. Да не се допуска никаква тоководеща част (кабелна обувка, неизолиран проводник и др.) да контактува до метален корпус на машина, автотрансформатор, реостат, уред или друго съоръжение. Свързващите проводници не трябва да са опънати, а свободно да лежат. Не трябва да пречат на отчитането на електроизмервателните уреди и на работата със спомагателните апарати. Всички проводници трябва да са здраво свързани към съответните съединителни клеми.

– Студент, който включва електрическата верига, предупреждава гласно: “Внимание, включвам !”

– Когато е необходимо да се коригира някоя връзка в схемата, да се смени измервателен уред или друг елемент, най-напред се изключва напрежението. Студентът, който изключва напрежението се уверява от включените електроизмервателни уреди и светещи сигнални лампи, че захранващото напрежение е изключено и съобщава гласно: “Напрежението е изключено!”

– Повторно веригата може да се включи под напрежение по установения по горе ред.

– След приключване на измерванията, захранващото напрежение се изключва.

– Веригата, по която в момента не се работи задължително се изключва от напрежение.

– Забранено е допирането до открити тоководещи части и до въртящи се части на машините.

– Забранено е използването на съединителни проводници и елементи с видимо повредена изолация.

– Забранено е сваляне на предупредителни табели и на защитни прегради на въртящи се части на машините.

– Когато напрежението се регулира посредством автотрансформатор или потенциометър, независимо, че подаденото напрежение е с малка стойност не е безопасно, поради галваничната връзка между първичната страна и изхода на товара. Възможно е да възникне допирно напрежение на мрежата. Ето защо задължително е

величина е свързана в известно съотношение. Типичен такъв случай е определянето на съпротивление по закона на Ом чрез измерване на тока и напрежението ($R=U/I$).

Най-широко приложение в електроизмервателната техника има непосредствения метод, защото е най-прост и изисква най-малко време, но точността на измерване при него е по-малка.

На базата на двата преки метода за измерване и електроизмервателните уреди се разделят на две групи - уреди за непосредствена оценка и уреди за сравняване.

Уредите за непосредствена оценка дават направо числената стойност на измерваната величина. За тази цел те са снабдени с показващо устройство (подвижна стрелка или светлинно петно), което се движи над предварително разграфена посредством сравнителния метод скала.

При уредите за сравняване (мостове, компенсатори) стойността на измерваната величина се определя чрез непосредственото ѝ сравняване с мерките. От своя страна методът на сравнение се подразделя на нулев метод, при който измерваната величина се уравнивява с известна величина от същия род и диференциален метод, при който се измерва непосредствено разликата между измерваната и известната величина.

Скала на измервателния уред се нарича поредица от деления върху дадена повърхност, над (по) която се движи показваща стрелка (светлинно петно).

Номинален брой скални деления (θ_n) за всяка скала се определя от цифровото означение, което съответствува на последното скално деление (най-голямото).

По характера на разположението на деленията скалите биват равномерни и неравномерни. Скалата е равномерна, когато на равни ъгли или линейни отклонения са нанесени скални деления, съответстващи на еднакво изменение на измерваната величина.

Равномерните скали са работни по цялата си дължина, а неравномерните имат неработна част, която обхваща първите около 25% от общата дължина на скалата. Неработната част или е неразграфена, или е отбелязано с точка или с цифра началното работно деление, след което могат да се правят измервания.

Обхват на един измервателен уред се нарича съвкупността от стойности на измерваната величина, които уредът може да измери. Например за амперметър $0 \div 5A$, за волтметър $0 \div 300V$.

Номинален обхват на уреда се нарича максималната електрическа величина, която уредът може да измери (стойността, която се отчита от скалата за последното означено деление). За амперметрите номиналният обхват се отбелязва с I_n , а за волтметрите - с U_n . При ватметрите се дават поотделно номиналните обхвати на токовата намотка (I_{nw}) и на напрежителната намотка (U_{nw}), като от тях се определя номиналният обхват на ватметъра от равенството $P_n = U_{nw} \cdot I_{nw}$. Номиналните обхвати не трябва да се превишават, за да не се повредят уредите.

Номинална константа (k_n) на измервателния уред се нарича стойността на измерваната величина, която отговаря на едно скално деление при номиналният обхват. Това е числото, с което трябва да се умножат отчетените деления, за да се получи съответната стойност на измерваната величина. Номиналната константа се определя като отношение на номиналният обхват на уреда към номинален брой скални деления. За волтметър, амперметър и ватметър номиналните константи се определят съответно по следните изрази:

изключването на захранването при работа по схемата, а не само намаляване на напрежението.

– При работа с индуктивни бобини и кондензатори е възможно да възникнат пренапрежения, които са опасни за живота независимо от напрежението на захранващия източник.

– При възникване на злополука по най-бързия начин се изключва захранващото напрежение, пострадалият се освобождава от тоководещите части - от прекъсвача или бутона на работната маса, или ако това може да стане по-бързо - от главния прекъсвач на таблото в лабораторията. След изключване на захранващото напрежение, пострадалият се освобождава от тоководещата част и му се дава първа помощ, като същевременно се повиква лекар. Когато пострадалият е в съзнание се оставя на спокойствие, като се наблюдава да не се влоши състоянието му и се изчаква лекарската намеса. Когато пострадалият е в безсъзнание, ако диша, трябва да се разхлабят дрехите около гърдния кош, да се напръска с вода лицето му, да се контролира дишането и да се изчака лекарската намеса. Когато пострадалият не диша, трябва непрекъснато да му се прави изкуствено дишане до възстановяване на дихателната му дейност.

– Метални верижки с метални елементи (гривни и медалиони) трябва да се пазят от допир с тоководещи части на веригата.

Получаването на инструкциите по техническа безопасност от студентите се регистрира официално в специална тетрадка с дата и подпис на всеки инструктиран.

ИЗМЕРВАНЕ В ЕЛЕКТРОТЕХНИКАТА И ЕЛЕКТРОНИКАТА – МЕТОДИ, УРЕДИ И ТОЧНОСТ НА ИЗМЕРВАНИЯТА

Измерването е познавателен процес, при който измерваната величина се сравнява с друга, условно приета за единица. Измерването се извършва с технически средства, наречени измервателна апаратура.

Основните методи за измерване са два: пряк и непряк (косвен).

При непосредствения (пряк) метод измерваната величина се сравнява непосредствено с дадена еднородна величина. Този метод има две разновидности - метод на непосредствената оценка и метод на сравнението.

По метода на непосредствената оценка стойността на измерваната величина се определя непосредствено от показанията на измервателния уред, чиято скала е градуирана за определени значения на тази величина. По този метод се измерва електричен ток с амперметър, електрично напрежение с волтметър, електрична мощност с ватметър и др.

По метода на сравнението стойността на измерваната величина се определя чрез непосредственото ѝ сравняване с друга известна величина или с образцова мярка за същата величина. Този метод се прилага при измерване на електрично съпротивление, индуктивност и капацитет с мостови схеми, напрежения по компенсационния метод и др.

При косвения метод стойността на измерваната величина се определя по косвен път - чрез непосредствено измерване на други величини, с които търсената

$$k_{\text{HU}} = \frac{U_{\text{H}}}{I_{\text{H}}}, \frac{\text{V}}{\text{дел.}}; \quad k_{\text{HA}} = \frac{I_{\text{H}}}{\theta_{\text{H}}}, \frac{\text{A}}{\text{дел.}}; \quad k_{\text{HW}} = \frac{P_{\text{H}}}{\theta_{\text{H}}} = \frac{U_{\text{HW}} \cdot I_{\text{HW}}}{\theta_{\text{H}}}, \frac{\text{W}}{\text{дел.}}$$

Чувствителност (S) на уреда се нарича отношението на изменението на отклонението на показващото устройство към съответното изменение на измерваната величина, която предизвиква това отклонение, т.е $S = \frac{\partial \theta}{\partial X}$.

Следователно от два уреда, по-чувствителен е този, който прави същото отклонение под действието на по-малка измервана величина. По-чувствителни ще бъдат тези уреди, в които са по-малки триенятия, масата на подвижната част и погълнатата енергия.

Едно от най-важните качества на измервателния уред е неговата точност. Тя изразява степента на съвпадане между действителната и измерената величина. Точно измерване при определени изисквания може да се осъществи само при правилен подбор на измервателните методи, схема и апарати. Колкото по-точно е измерването, толкова по-сложна и скъпа е измервателната схема. Има разлика в изискванията за точност при научноизследователската дейност и при контролно-техническите измервания.

Абсолютна грешка (ΔX) се нарича разликата между измерваната стойност (показанието на уреда X) и действителната стойност X_0 на измерваната величина (получена например чрез еталонен уред).

$$\Delta X = X - X_0$$

Относителна грешка (β) се нарича отношението на абсолютната грешка ΔX към действителната стойност на измерваната величина X_0 , изразено в проценти

$$\beta, \% = \frac{\Delta X}{X_0} \cdot 100 = \frac{X - X_0}{X_0} \cdot 100, \%$$

Тази грешка характеризира точността на измервателния уред, но се изменя по скалата, като за началото $X_0 = 0$, $\beta = \infty$ и постепенно расте. Затова измерванията трябва да се извършват във втората половина на скалата, където относителната грешка е по-малка. Това зависи от правилния избор на номиналния обхват на измервателния уред.

Приведена грешка (β_{H}) се нарича отношението на абсолютната грешка ΔX към номиналния обхват на уреда X_{H} , изразено в проценти:

$$\beta_{\text{H}}, \% = \frac{\Delta X}{X_{\text{H}}} \cdot 100 = \frac{X - X_0}{X_0} \cdot 100, \%$$

Тази грешка служи за сравняване на точността и нормиране на грешките на измервателните уреди.

Грешките имат определен знак, който показва дали уредът измерва повече или по-малко от действителната стойност на търсената величина.

Клас на точност на измервателния уред се нарича степента на вярност на неговите показания. Количествено се определя от максималната приведена грешка при нормални работни условия. Класовете на точност са нормирани и по големината на основната допустима приведена грешка. Електроизмервателните уреди се разделят на следните групи (класове):

Таблица 1

Клас на точност	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5	4,0
Максимална приведена грешка,%	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$

Уредите от първите три класа са предназначени за точни лабораторни измервания, уредите от следващите два класа са предназначени за технически измервания, а тези от последните два класа служат за контролни и любителски измервания.


Когато ще се използват измервателни уреди, трябва да се знае тяхното предназначение и да се познават качествата им. За тази цел върху всеки уред се поставят условни означения. Преди всичко се означава наименованието на уреда (за ток – амперметър, за напрежение - волтметър и пр.). Това се прави с дума или началната буква съгласно таблица 2. Означава се видът на тока, за който е предназначен уредът,

Таблица 2

Вид на измерваната в-на	Наименование на уреда	Означение
Ток	Амперметър	A
	Милиамперметър	mA
	Микроамперметър	μ A
Напрежение	Волтметър	V
	Киловолтметър	kV
	Миливолтметър	mV
	Компенсатор	-
Електрическа мощност	Ватметър	W
	Киловатметър	kW
Електрическа енергия	Ватчасов електромер	Wh
	Киловатчасов електромер	kWh
Количество електричество	Амперчасов електромер	Ah
Електрическо съпротивление	Омметър	Ω
	Килоомметър	k Ω
	Мегаомметър	M Ω
	Мост	-
Индуктивност	Хенриметър	H
	Мост	-
Капацитет	Фарадометър	F
	Мост	
Честота	Честотомер	Hz
Фазова разлика	Фазомер	cos ϕ

измервателната система, определяща принципа на действие на уреда, класът на точност, обхватите, работното положение на уреда, изпитателното напрежение на изолация на уреда и др.

Таблица 3

Система на уреда	Означение на системата	Приложение
Магнитоелектрическа		A, V
Магнитоелектрическа логомер		M
Електромагнитна		V.A
Електромагнитен логомер		F, Hz
Електродинамична		W, V, A
Електродинамичен логомер		Cosφ, Hz, F
Феродинамична		W, V, A
Феродинамичен логомер		Cosφ, Hz, F
Индукционна		kWh, W
Топлинна		V, A
Детекторна		V, A
Магнитоелектрическа с термопреобразувател		V, A







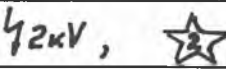
Магнитоелектрическа с електронен преобразувател		V, A
Електростатична		V
Вибрационна		Hz

Таблица 4

Работно положение на уреда	Означение
Вертикално	
Хоризонтално	
Наклонено под определен ъгъл	
Изпитателно напрежение на изолацията на уреда (напр. 2 kV)	
Положение на уреда относно земния меридиан	S→N

Съществуват уреди за измерване само на една или на няколко величини само при постоянен, само при променлив или и при двата вида ток. Освен това за по-голяма практичност има уреди, които притежават по няколко обхвата и имат или отделни скали за всеки обхват, или една обща скала за всички, като в единия и в другия случай константата на уреда е различна за различните обхвати.

Когато уредите са предназначени за измерване само на постояннотокови величини, на съединителните клеми със знаци “+” и “-” е означена полярността им, която трябва да се спазва при свързване. При измервателни уреди с две и повече намотки (например ватметри), отделните изводни клеми на напрежителната и токовата намотка са означени съответно със знак “U” и “I”. Означен е и номиналният обхват на съответната намотка, например 300 V, 5A и пр., а при многофазните уреди - и фазата, към която трябва да се свърже съответната намотка. За да не се допускат грешки при свързване на уредите с повече от една намотки, обикновено началото (генераторния край) на всяка намотка е означено със знаци “*” или “↓”.

Когато се наложи да се измерват стойности на някоя величина, по-големи от номиналния обхват на уреда, с който разполагаме, трябва да се разшири обхватът на този уред n пъти, където n се нарича кратност на увеличаване на обхвата (n - цяло число). Тогава константата на уреда при разширения обхват K_p се определя по израз $K_p = nK_n$, където K_n е номиналната константа на уреда.

След измерването, стойността на измерваната величина се намира като се умножат отчетените скални деления θ с номиналната константа на уреда K_H , а при разширен обхват - с константата при разширен обхват K_H . Например, при измерване на напрежение с волтметър ще имаме $U = K_{HV}\theta$, а при разширен обхват $U = K_{PV}\theta$.

В таблица 3 са дадени условните означения на системите електроизмервателни уреди и тяхното приложение. В зависимост от принципа на действие електроизмервателните уреди се разделят на следните системи: магнитоелектрическа, електромагнитна, електродинамична, електростатична, индукционна, детекторна, термоелектрическа, феродинамична, топлинна, електроннолъчева и т.н.

Голям интерес представляват цифровите измервателни уреди, които имат високи метрологични качества. Въпреки относителната си сложност и висока цена, тези уреди притежават редица предимства - непосредствено визуално отчитане на цифровите стойности на измерваната величина, висока точност (грешка $0,01 \pm 0,001\%$) и бързодействие, автоматизиране на измерванията и възможност за директна връзка с изчислителни и различни автоматични устройства, както и дистанционно предаване на резултатите от измерването без загуба на точност. Затова цифровите уреди намират все по-широко приложение както в лабораторни, така и в производствени условия за измерване на различни електрически и неелектрически величини.

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №1

ИЗМЕРВАНЕ НА СЪПРОТИВЛЕНИЯ С ВОЛТМЕТЪР
И АМПЕРМЕТЪР, С ОММЕТЪР И МЕГАОММЕТЪР (ЛОГОМЕР)

I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Да се разучат схемите за измерване на различни по големина съпротивления с амперметър и волтметър.
2. Да се определи схемата, при която измерването се извършва с по-малка грешка.
3. Да се снемат волтамперната характеристика на електрическа лампа с нажежаема жичка.
4. Да се разучи схемата на омметър и да се направят измервания с него.
5. Да се разучи схемата на мегаомметър (логомер) и с него да се провери izolацията на електрически кабел и асинхронен двигател.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

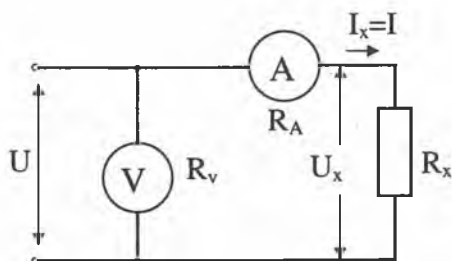
1. Измерване на съпротивления с волтметър и амперметър

Този метод е приложим за измерване на различни по големина съпротивления при постоянен ток или на чисто активни съпротивления и модулите на пълните съпротивления при променлив ток.

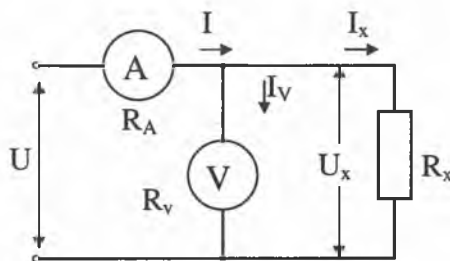
Използват се най-достъпните в практиката електроизмервателни уреди: волтметър и амперметър, като свързването им за измерване на неизвестно съпротивление R_x е възможно да се осъществи по две схеми: т.н. “V-A” схема, когато волтметърът е свързан пред амперметъра (фиг. 1.1) и “A-V” схема, когато волтметърът е свързан след амперметъра (фиг. 1.2).

Методът за измерване на съпротивления с амперметър и волтметър е косвен метод, основаващ се на закона на Ом за част от веригата. Стойността на неизвестното съпротивление R_x се определя от равенство:

$$R_x = U_x / I_x, \quad (1.1)$$



фиг. 1.1



фиг. 1.2

където U_X и I_X са съответно напрежителният пад в измерваното съпротивление и тока, протичащ през него. Тези две стойности не могат да бъдат измерени едновременно, поради влиянието на собствените вътрешни съпротивления на уредите (R_A и R_V). Затова е необходимо да се определи коя от двете схеми е целесъобразно да се използва.

От "V-A" схемата (фиг. 1.1) се вижда, че амперметърът измерва тока I_X , протичащ през неизвестното съпротивление R_X , а волтметърът отчита напрежение, равно на сумата от напрежителните падове в R_X и съпротивлението на амперметъра R_A , т.е.:

$$I = I_X, \quad U = U_X + I_X R_A$$

Ако неизвестното съпротивление се определя направо от директните показания на уредите (U и I), се получава

$$R'_X = R_{V-A} = \frac{U}{I} = \frac{U_X + I_X R_A}{I_X} = \frac{U_X}{I_X} + R_A = R_X + R_A > R_X,$$

а относителната грешка, която се допуска, ще бъде:

$$\beta_{V-A, \%} = \frac{R'_X - R_X}{R_X} 100 = \frac{R_{V-A} - (R_{V-A} - R_A)}{R_X} 100 = \frac{R_A}{R_X} 100, \% \quad (1.2)$$

Очевидно е, че тази грешка е по-малка при по-голямо измервано съпротивление R_X и при по-малко собствено съпротивление на амперметъра R_A .

При схема "A-V" (фиг. 1.2), волтметърът е включен успоредно на измерваното съпротивление и отчита напрежителния пад върху него (U_X), а амперметърът измерва общия ток, сума от протичащите токове през съпротивлението (I_X) и през волтметъра (I_V). Тогава показанията на уредите са:

$$U = U_X; \quad I = I_X + I_V = I_X + U/R_V$$

При определяне на съпротивлението само по показанията на уредите, за тази схема се получава:

$$R''_X = R_{A-V} = \frac{U}{I} = \frac{U_X}{I_X + I_V} = \frac{R_X}{1 + \frac{R_X}{R_V}} < R_X,$$

като се допуска следната грешка:

$$\beta_{A-V, \%} = \frac{R_{A-V} - R_X}{R_X} 100 = -\frac{R_X}{R_V + R_X} 100, \% \quad (1.3)$$

Тази грешка е по-малка при по-малко измервано съпротивление и при по-голямо собствено съпротивление на волтметъра R_V .

Когато не е необходимо намирането на R_X с голяма точност, то се изчислява направо от показанията на уредите ($R = U / I$). От (1.2) и (1.3) се вижда, че схема "V-A" е подходяща за измерване на сравнително големи съпротивления, а схема "A-V" - при сравнително малки, защото тогава грешките са по-малки. Границата между "малките" и "големите" съпротивления (когато относителните методични грешки и по двете схеми са приблизително равни по абсолютна стойност) се получава, когато неизвестното съпротивление има стойност $R_{X0} = \sqrt{R_A R_V}$. Тогава при изпълнено

$R_X > \sqrt{R_A R_V}$ (R_X - голямо) избираме "V-A" схема, а при $R_X < \sqrt{R_A R_V}$ (R_X - малко) - избираме "A-V" схема.

Ако са известни вътрешните съпротивления на измервателните уреди, по дадените уравнения може да се определи действителната стойност на неизвестното съпротивление R_X .

Основно предимство на разглеждания метод е, че позволява да се измери съпротивлението на консуматор при протичане на електрически ток през него, съответстващ на номиналните работни условия. Това е особено важно при нелинейните съпротивления, чиято стойност зависи от големината на протичащия ток.

Описаните схеми се използват най-често за измерване на средни съпротивления ($1+100 \text{ k}\Omega$).

2. Измерване на съпротивления с омметър

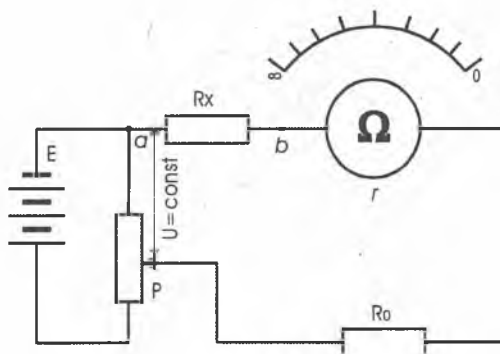
Омметрите са уреди за непосредствено измерване на съпротивления. Показанията им се основават на измерване на протичащия ток през електрическа верига, съдържаща измерваното съпротивление, като захранващото напрежение се поддържа постоянно.

За измервателен уред най-често във веригата се включва микроамперметър от магнитоелектрическата система, като последователно (фиг. 1.3) или паралелно (фиг. 1.4) с него се свързва и измерваното съпротивление R_X .

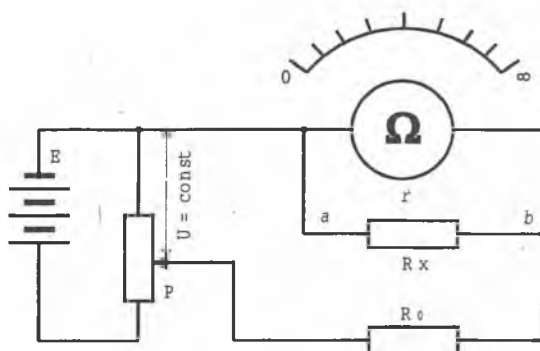
В омметрите с последователна схема на включване (фиг. 1.3), в измервателната верига протича ток.

$$I = \frac{U}{R_X + r + R_0}, \quad (1.4)$$

където R_0 е ограничаващо съпротивление, r - вътрешно съпротивление на измервателния механизъм, R_X - измерваното съпротивление. Тъй като съпротивленията R_0 и r са постоянни, стойността на тока във веригата е обратнопропорционална на неизвестното съпротивление. Тази схема е подходяща за измерване на големи съпротивления ($\text{k}\Omega$). Тогава $R_X \gg R_0 + r$ и (1.4) добива вида:



фиг. 1.3



фиг. 1.4

$$I \approx U/R_X.$$

Следователно скалата на измервателния механизъм може да се разграфи в единици за съпротивление (Ω и $k\Omega$) и е неравномерна, като нулевото деление ($R_X = 0$) отговаря на максимално отклонение на уреда, т.е. нулевото деление е в най-дясната част от скалата на омметъра, а при прекъснатата верига на измерваното съпротивление ($R_X = \infty$), токът $I = 0$ и стрелката е на най-лявото деление на скалата (∞).

При омметрите с паралелна схема (фиг. 1.4), неизвестното съпротивление е свързано паралелно на измервателния механизъм. Протичащият ток през механизма е:

$$I = \frac{U(R_X + r)}{r \cdot R_X + R_0 \cdot (R_X + r)}$$

Тази схема е подходяща за измерване на сравнително малки съпротивления (до $1 k\Omega$). Тогава $R_X \ll r$, $R_X \ll R_0$ и токът се определя от отношението :

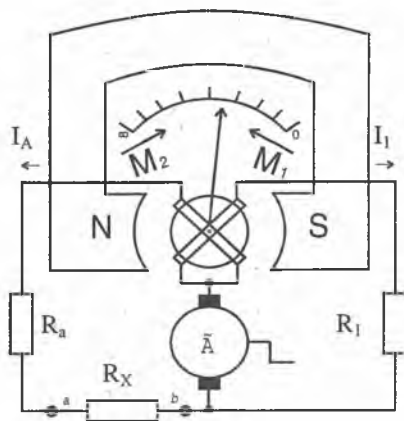
$$I = \frac{U \cdot R_X}{R_0 \cdot r}$$

Вижда се, че токът, протичащ и измерван от магнитоелектрическия механизъм е право пропорционален на измерваното съпротивление. Затова нулевото деление на скалата ($R_X = 0$) отговаря на минимално отклонение на уреда, т.е. намира се в най-лявата част на скалата, а при прекъснатата верига на неизвестното съпротивление ($R_X = \infty$), токът през измервателния механизъм е максимален и стрелката сочи най-дясното деление на скалата, която е почти равномерна.

Омметрите се захранват от източник на постоянно напрежение (най-често батерия). Електродвижещото напрежение E на батерията не остава постоянно и с течение на времето намалява. Затова при измерване на едно и също съпротивление с течение на времето се намалява тока във веригата и отклонението на стрелката на уреда, т.е. появява се отрицателна грешка. С цел да се компенсира намаляването на E и да се поддържа $U = \text{const}$, в схемите се включва потенциометъра P .

3. Измерване на съпротивления с мегаомметър

За измерване на много големи съпротивления се използват мегаомметри. Принципната схема на такъв уред е дадена на фиг.1.5.



фиг. 1.5

Измервателният механизъм е логомер от магнитоелектрическата система, който има две неподвижно свързани електрически изолирани една от друга бобини, които могат да се въртят около обща ос в неравномерното магнитно поле на един постоянен магнит. При логомера липсват спирални противодействащи пружини и при отсъствие на електрически ток в бобините, подвижната част застава в какво да е (безразлично) положение. За захранване на схемата се използва вграден генератор за постоянен ток с постоянни магнити и ръчно задвижване. При нормална скорост на въртене генераторът дава номиналното си напрежение (най-често 500, 1000 или 2500 V). Генераторът захранва две паралелно свързани електрически вериги. В едната верига са включени последователно едната бобина и един резистор с постоянно съпротивление R_1 , а измерваното съпротивление R_X е свързано последователно с другата бобина и резистор с постоянно съпротивление R_2 . При измерване (при въртене на ръчката) през двете бобини протичат токове I_1 и I_2 , обратнопропорционални на съпротивленията в съответните вериги. От взаимодействието на тези токове с магнитното поле, в което се намират бобините, възникват два противоположно насочени въртящи момента M_1 и M_2 , действащи върху общата ос. При нееднаквост на двата момента, подвижната част на механизма ще се завърти до някакво ъглово отклонение, при което двата момента ще се изравнят и движението ще спре, като стрелката показва определено деление на скалата. Ъгълът на завъртане α зависи само от отношението на токовете в бобините, т.е. от отношението на съпротивленията, които ги определят:

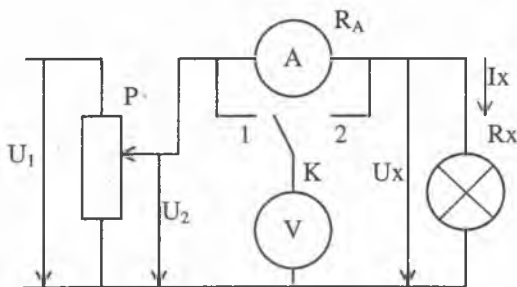
$$\alpha = f \left(\frac{I_1}{I_2} \right) = f \left(\frac{\frac{U}{R_1}}{\frac{U}{R_2 + R_X}} \right) = f \left(\frac{R_2 + R_X}{R_1} \right) \quad (1.5)$$

Ъгълът на завъртане не зависи от абсолютната стойност на токовете, нито от големината на захранващото напрежение, което може да не е стабилизирано (затова може да се използва генератор с ръчно задвижван). От (1.5) се вижда, че ъгълът на завъртане зависи от единствената променлива величина R_x , което позволява скалата на уреда да се разграфи направо в мегаомове. Мегаомметрите от този тип са подходящи за измерване на големи съпротивления, каквито са изолационните съпротивления на електрически машини и апарати, кабели и др. Затова и захранващото напрежение е с големи стойности.

III. РЕД ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Измерване с волтметър и амперметър

А. Реализира се схемата, изобразена на фиг. 1.6. Използва се реостат, подходящ за потенциометрично свързване към източника на напрежение, чрез който се регулира напрежението U_2 от нула до напрежението на захранващия източник, амперметър и волтметър с известни вътрешни съпротивления, превключвател К за осъществяване на "V-A" схема (положение 1) и "A-V" схема (положение 2) и неизвестното съпротивление (лампа с нажежаема жичка).



фиг. 1.6

Б. Чрез плъзгача на реостата се задава една стойност на напрежението $0 < U_2 < U_{2н}$, където $U_{2н}$ е номиналното напрежение на електрическата лампа. Осъществяват се схемите "A-V" и "V-A" и за всяка от тях се отчитат съответните напрежение и ток, които се нанасят в таблица 1.1 и за тях се изчислява стойността на R_x . Така изчислените съпротивления се сравняват с $\sqrt{R_A R_V}$, където R_A и R_V са вътрешните съпротивления на амперметъра и волтметъра за обхвата на който се работи. От тук се избира схемата на измерване, осигуряваща по-малка относителна грешка и измерването продължава само по тази схема.

В. По избраната схема на измерване ("A-V" или "V-A") се снима волтамперната характеристика на електрическата лампа $I = f(U)$, а също и зависимостта на съпротивлението на лампата и нейната мощност от напрежението $R_x = f(U)$. това се осъществява, като чрез реостата напрежението U_2 се повишава от 0 до $U_{2н}$ през равни интервали, като показанията на уредите и резултатите се записват в таблица 1.1. При

всяко измерване изчисленото съпротивление R_X се сравнява със съответната величина $\sqrt{R_A \cdot R_V}$.

Таблица 1.1

№	Схема	Отчетени величини				Изчислени величини		
		$K_V =$		$K_A =$		$R = U/I,$	$R_{XO} = \sqrt{R_A \cdot R_V}$	$P = U \cdot I$
		$\theta,$ дел	U, V	$\theta,$ дел	I, A	Ω	Ω	W

Г. От стойностите в табл. 1.1 се чертаят графиките на зависимостите $R_X = f(U)$, $I = f(U)$, и $P = f(U)$. От тях се прави извод какъв е температурния коефициент на съпротивлението на изследваната лампа (положителен или отрицателен) и какъв е характера на волтамперната характеристика (линейна или нелинейна).

2. Измерване с омметър

А. Изводните клеми “а” и “в” на омметър с последователна схема (фиг. 1.3) се свързва напъксо и с помощта на потенциометъра Р стрелката се установява на нулевото (най-дясното) деление на скалата.

Б. При омметър с паралелна схема (фиг.1.4), ако изводите “а” и “в” са свързани напъксо, стрелката показва “0”, тъй като ток през измервателния механизъм не тече. След прекъсване веригата на измерваното съпротивление R_X , стрелката се установява на най-дясното деление (∞) с помощта на потенциометъра Р.

В. С така подготвения омметър се измерва съпротивлението на електрическа лампа при стайна температура.

Г. Сравнява се получената стойност със стойностите, получени при измерване със “V-A” (или “A-V”) схема и се обяснява разликата в резултатите.

3. Измерване с мегаомметър

А. Преди започване на измерването се прави проверка на апарата. Ако се свържат изводите му “а” и “в” напъксо (фиг. 1.5) и се завърти ръчката, стрелката трябва да показва деление “0”, а при отворени изводи и въртене на ръчката - “ ∞ ”.

Б. С мегаомметъра се измерват изолационните съпротивления между отделните фази на електрически кабел и на статорните намотки на асинхронен двигател, като резултатите се нанасят в табл.1.2.

В. По резултатите се правят изводи за годността на изследваните електрически съоръжения и елементите им.

Таблица 1.2

№	Изолация между	Съпротивление на изолацията, МΩ	
		кабел	двигател
1	фаза А и фаза В		
2	фаза А и фаза С		
3	фаза В и фаза С		
4	фаза А и корпус		
5	фаза В и корпус		
6	фаза С и корпус		

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Коя от двете схеми “V-A” и “A-V” е по-подходяща за измерване на малки и коя за измерване на големи съпротивления, определени само от показанията на двата уреда?
2. Кой от двата уреда е причина за грешката при измерване на съпротивления съответно по “V-A” и “A-V” схема и защо?
3. При каква стойност на измерваното съпротивление относителната грешка при “V-A” и “A-V” схема е еднаква?
4. В кои случаи се използва омметър и в кои се предпочита измерване с амперметър и омметър?
5. Кога се използва омметър с последователна схема и кога с паралелна?
6. В кои случаи от практиката се използват мегаомметри? Дайте примери.
7. Какво е устройството и принципа на действие на един мегаомметър?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 2

КОМПЕНСАЦИОНЕН МЕТОД ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ПОСТОЯННИ НАПРЕЖЕНИЯ И ПРОПОРЦИОНАЛНИ НА ТЯХ ВЕЛИЧИНИ

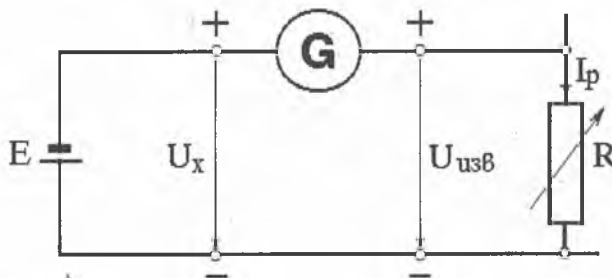
I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Запознаване с принципа на компенсационния метод
2. Да се изучи схемата и принципът на действие на компенсаторите за постоянен ток.
3. Да се провери класът на точност на лабораторен волтметър по компенсационния метод.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

1. Принцип и преимущества на компенсационния метод.

По компенсационния метод едно неизвестно напрежение U_X измерва, като се *сравнява и уравновесява* с друго, точно известно регулируемо напрежение $U_{изв}$. За да се сравнят двете напрежения, те се свързват *противопосочно* през галванометър G , който играе ролята на нулев индикатор - фиг. 2.1.



фиг. 2.1. Принцип на компенсационния метод

Известното регулируемо напрежение $U_{изв}$ се получава като пад на напрежение на изводите на образцовия резистор R , при протичането на ток I_p през него, наречен работен ток. Чрез промяна на R при поддържане на $I_p = \text{const}$ се променя $U_{изв}$ до положение, при което ток през G не тече, показанието му се нулира и двете напрежения стават равни, т.е.:

$$U_X = U_{изв} = R \cdot I_p$$

Компенсационният метод е един от най-точните методи за измерване на е.д.н. на постояннотокови източници (акумулатори, галванични елементи и др.), тъй като в момента на измерване през източниците, галванометъра и съединителните проводни-

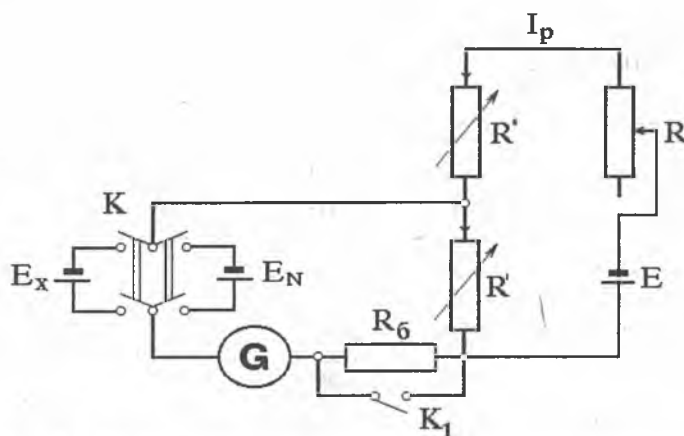
ци ток не тече, и следователно няма напрежителен пад във вътрешните им съпротивления.

По този метод косвено могат да се измерват и всички величини, които имат някакво съответствие с постоянно напрежение - ток, съпротивление, температура и др.

2. Принципна схема на компенсатор за постоянно напрежение.

Електрическите схеми, с които се реализира принципа на компенсационния метод се наричат *компенсатори*.

Принципната схема на компенсатор е показана на фиг. 2.2 и съдържа следните елементи:



фиг. 2.2. Принципна схема на компенсатор за постоянен ток

- 1) Източник на напрежение E , обуславящ протичането на работния ток I_p . Той трябва да удовлетворява условията $E > E_N$ и $E > U_X$. $E = 6V$;
- 2) Реостат R за установяване на работния ток I_p . $R = 5000\Omega$;
- 3) Образцови декадни резистори R' и R'' , които служат за получаване на регулируем напрежителен пад (върху R'), без да се изменя работния ток. Всяка от декадите има максимално съпротивление $11111\ \Omega$ и може да се регулира през $0.1\ \Omega$
- 4) Образцов източник на е.д.н. E_N - нормален елемент на *Weston*, необходим за задаване на работния ток I_p . $E_N = 1,0183V$ (при $20^\circ C$);
- 5) Галванометър G за контрол на равенството;
- 6) Предпазно съпротивление R_6 срещу претоварване на галванометъра и ключ K_1 за включване на R_6 ;
- 7) Двоен ключ K за превключване на E_N и E_X към компенсатора;
- 8) Обект за измерване - E_X или U_X .

Декадните резистори R' и R'' , реостата R и източника E образуват затворен контур, в който протича работния ток I_p . Чрез двойния ключ K напреженията E_N и E_X

се включват за сравнение поотделно към $U_{изв}$, което се получава на изводите на резистора R' , при протичането на работния ток I_p през него. В образувания контур се включва галванометъра G и предпазното съпротивление R_6 .

3. Измерване с компенсатора.

Измерването се осъществява в следната последователност:

- *Избор на работен ток.*

Възможните стойности, които може да заема работния ток са в интервала:

$$\frac{E}{R' + R'' + R_{max}} \leq I_p \leq \frac{E}{R' + R''}$$

Коя от тези стойности да бъде избрана зависи от стойността на неизвестното напрежение U_x . За да може да се измери определено неизвестно напрежение, трябва да бъде изпълнено следното условие:

$$U_x \leq R'_{max} I_p,$$

от където

$$I_p \geq \frac{U_x}{R'_{max}}$$

От горните условия се избира една от възможните стойности за работния ток.

- *Задаване на работния ток.*

Понеже стойностите на работния ток са много малки и измерването на такъв ток дори с прецизен амперметър не гарантира необходимата точност, то задаването на работния ток става по обратния ред:

- 1) от E_N и избраният работен ток се изчисляват стойностите на R_N' и R_N'' с точност до 0.1Ω , при които се постига равенство между E_N и $U_{изв}$:

$$R_N' = \frac{E_N}{I_p}, \quad R_N'' = 11111 - R_N'$$

- 2) получените стойности на R_N' и R_N'' се задават на декадите.
- 3) превключвателя K се включва към E_N .
- 4) чрез регулиране на реостата R в контура на работния ток, се постига равенство между E_N и $U_{изв}$, при което галванометъра се нулира. Това означава, че в контура на работния ток протича избраната стойност. Положението на плъзгача на реостат R повече не се изменя. Ключа K се поставя в неутрално положение и компенсатора е готов за измерване.

- *Измерване на неизвестно напрежение.*

Включваме ключа K към U_x . При това положение търсим равновесие чрез изменение на R' , и съответно на R'' , за да не се изменя I_p , така че, винаги да е изпълнено условието:

$$R' + R'' = 11111 \Omega.$$

За целта следим показанието на галванометъра G . При нулевото показание на G , което съответства на равновестното положение е валидно равенството:

$$U_x = R_x' \cdot I_p,$$

където R_x' е стойността на R' при равновесие. За предпазване на галванометъра от претоварване, първоначално включваме R_6 , чрез отваряне на K_1 , а при показание около нулата R_6 се шунтира чрез затваряне на K_1 .

- *Измерване на неизвестен ток и неизвестно съпротивление.*

Последователно във веригата на неизвестен ток I_x се включва образцово съпротивление R_H с известна стойност, измерва се напрежението на изводите му и по закона на Ом се изчислява I_x :

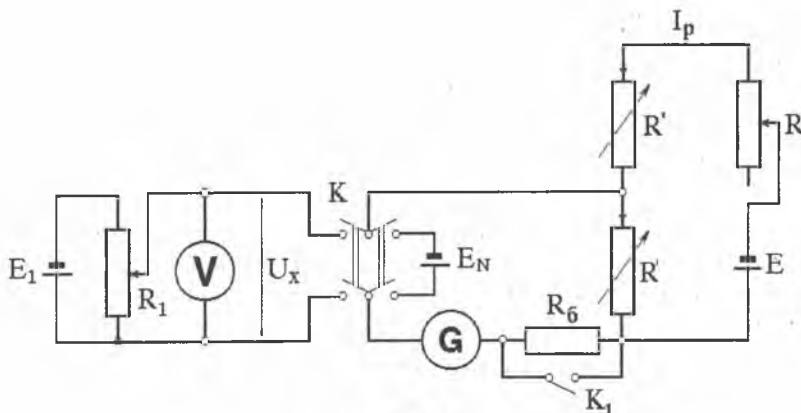
$$I_x = \frac{U_x}{R_H}$$

По аналогичен начин може да бъде измерено неизвестно съпротивление R_x - включва се образцово съпротивление R_H последователно на R_x и се измерват напреженията на изводите на R_H и R_x . Като се знае, че отношението на напреженията е равно на отношението на съпротивленията, то R_x може да бъде изчислено:

$$R_x = \frac{U_x}{U_H} \cdot R_H$$

III. РЕД ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. За проверка на класа на точност на лабораторен волтмвтр V , се свързва схемата на компенсатора показана на фиг. 2.3.



фиг. 2.3

2. Избира се работния ток, като се приеме $U_X = U_{V_{ном}}$.
3. Установява се избраната стойност на работния ток.
4. Посредством реостата R_1 се задават различни напрежения, съответстващи на определен брой скални деления от показанието на волтметра (скалата се разделя на 4 - 5 интервала).
5. Всяка от зададените и измерени с волтметра V стойности, се измерва и с компенсатора по описания по горе начин. Показанието на волтметра и стойностите на R'_X и R''_X , при които е постигнато равенството, се отчитат и нанасят в Таблица 1.
6. За всеки опит се изчисляват:
 - 1) Измереното с компенсатора напрежение U_X
 - 2) Относителната грешка на волтметра

Таблица 1.

Измерени величини				Изчислени величини			
θ_v	U_v	R'_X	R''_X	U_X	β	β_H	c
дел	V	Ω	Ω	V	%	%	-

$$\beta\% = \frac{U_V - U_X}{U_X} \cdot 100$$

- 3) Приведената грешка на волтметра

$$\beta_H\% = \frac{U_V - U_X}{U_{V_{ном}}} \cdot 100$$

където $U_{V_{ном}}$ е номиналният обхват на волтметра. На практика приведената грешка показва класа на точност на уреда.

- 4) Корекционен фактор

$$C = \frac{U_X}{U_V}$$

7. Определя се класът на точност на волтметра като максималната приведена грешка в проценти се сравнява със стандартните класове.
8. Да се начертаят в една координатна система графиките на зависимостите $\beta(\theta_v)$, $\beta_H(\theta_v)$ и $c(\theta_v)$. β и β_H се вземат по абсолютна стойност.

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Какъв е принципът на компенсационния метод?
2. Как трябва да се свържат U_x и $U_{изв}$, за да се сравнят?
3. Каква е ролята на галванометъра при този метод?
4. За какво е необходим резистор R'' в схемата на компенсатора?
5. Как се избира работния ток?
6. Как се задавава работния ток на компенсатора?
7. Как се измерва едно неизвестно напрежение с компенсатора?
8. Как може да се измери неизвестен ток и неизвестно съпротивление с компенсатора?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 3

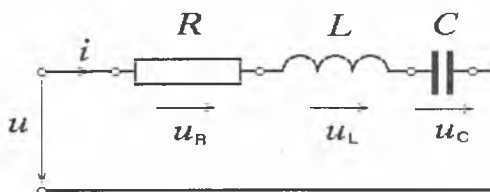
ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОСЛЕДОВАТЕЛНА RLC ВЕРИГА ЗА ПРОМЕНЛИВ ТОК

I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Да се изучат основните зависимости при верига за променлив ток, съставена от последователно свързани резистор, бобина и кондензатор.
2. Да се определят опитно параметрите на отделните елементи от веригата.
3. Да се построят векторните диаграми на напреженията и тока, при включени различни елементи във веригата.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

Електрическа верига от последователно свързани резистор с активно съпротивление R , бобина с индуктивност L и кондензатор с капацитет C е показана на фиг. 3.1



фиг. 3.1. Схема на последователна RLC верига

При захранване от източник на синусоидално напрежение

$$u = U_m \sin \omega t$$

във всеки от елементите на веригата ще протече ток

$$i = I_m (\sin \omega t - \varphi),$$

където u , i са моментните стойности на напрежението и тока

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U; I_m = \sqrt{2} \cdot I \quad - \text{амплитудните стойности на напрежението и тока;}$$

U, I - ефективните стойности на напрежението и тока - стойностите, които измерват апаратите;

$\omega = 2\pi f$, s^{-1} - ъглова честота; $f = 50$, Hz - честота; t , s - време;

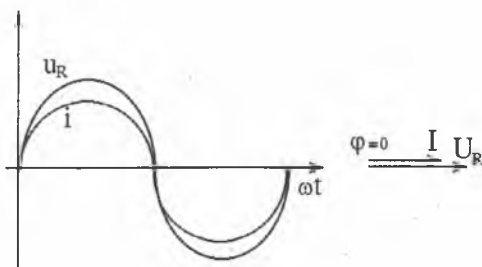
φ - ъгъл на фазовото отместване (фазова разлика) между напрежението и тока, rad (като по-позната мерна единица използваме градус - deg).

Основната разлика с електрическите вериги за постоянен ток е периодичния характер на величините и наличието на фазова разлика между напрежението и тока, която за различните елементи е различна:

➤ за резистора R:

$$u_R = Ri = RI_m \sin(\omega t - \varphi) = U_{Rm} \sin(\omega t - \varphi)$$

! *напрежението и тока в резистора R съвпадат по фаза* (фиг. 3.2)

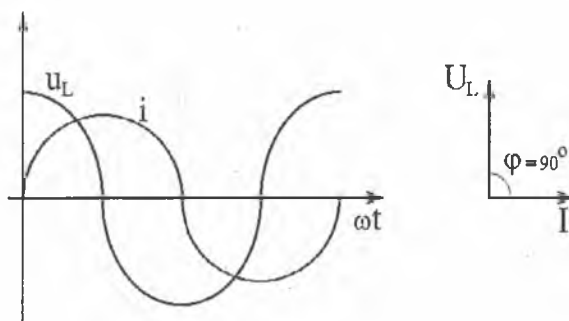


фиг. 3.2. Графика и векторна диаграма на напрежението и тока в активно съпротивление R

➤ за бобината L:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega LI_m \cos(\omega t - \varphi) = \omega LI_m \sin(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}) = U_{Lm} \sin(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2})$$

! *напрежението изпреварва по фаза тока с 90°* (фиг. 3.3).

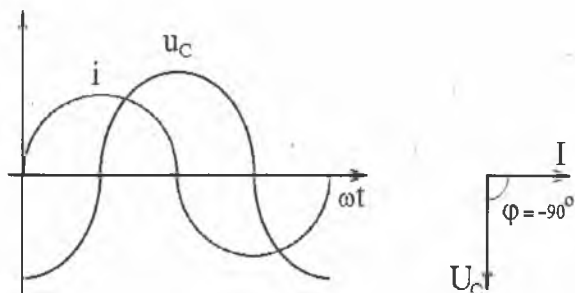


фиг. 3.3. Графика и векторна диаграма на напрежението и тока в индуктивност L

➤ за кондензатора C:

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = -\frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t - \varphi) = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}) = U_{Cm} \sin(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2})$$

! *напрежението изостава по фаза от тока с 90°* (фиг. 3.4).



фиг. 3.4. Графика и векторна диаграма на напрежението и тока в кондензатор С

Съгласно втори закон на Кирхоф, входното напрежение може да се определи като сума от напреженията на отделните елементи:

$$u = u_R + u_L + u_C = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt ,$$

което, изразено чрез комплексните ефективни стойности на напрежението и тока е

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = RI + jX_L \dot{I} - jX_C \dot{I} = [R + j(X_L - X_C)] \dot{I} = Z \dot{I}$$

От него следва, че *вектора на входното напрежение е геометрична сума от векторите на напреженията на отделните елементи.*

За ефективните стойности важи следната зависимост:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{(RI)^2 + [(X_L - X_C)I]^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} I = zI ,$$

където $z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, Ω е пълно съпротивление (импеданс) на веригата;

$X_L = \omega L$, Ω - индуктивно съпротивление на обмотката;

$X_C = \frac{1}{\omega C}$, Ω - капацитивно съпротивление на кондензатора.

Фазовата разлика φ между напрежението и тока във веригата е:

$$\varphi = \arctg \frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$$

В зависимост от стойностите на X_L и X_C , фазовата разлика може да бъде:

- $\varphi > 0$, $X_L > X_C$ - веригата има индуктивен характер и входното напрежение изпреварва тока - фиг. 3.5а).

– $\varphi < 0$, $X_L < X_C$ - веригата има капацитивен характер и входното напрежение изостава от тока - фиг. 3.5б).

– $\varphi = 0$, $X_L = X_C$ - веригата има активен характер въпреки наличието на реактивни елементи и входното напрежение съвпада по фаза с тока - фиг. 3.5в). Този режим се нарича **резонанс на напреженията**. При него $U_L = U_C$, импеданса $z = R$ има минимум, а тока във веригата достига максимална стойност.

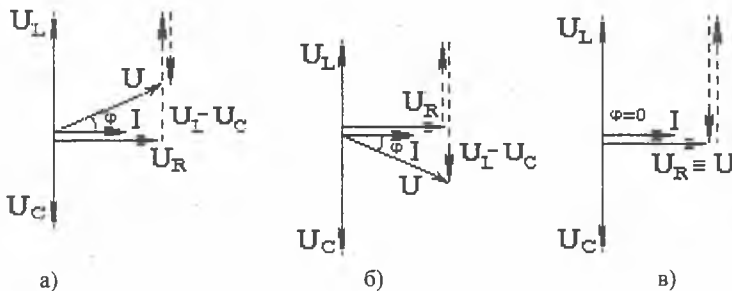
Условието за настъпване на резонанс е $X = X_L - X_C = 0$, което може да се постигне чрез:

- промяна на L или C ;
- промяна на честотата на захранващото напрежение f .

Честотата при която настъпва резонанс е:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ - и се нарича резонансна честота.}$$

Векторните диаграми за различните стойности на φ са показани на фиг. 3.5.



фиг. 3.5. Векторни диаграми за различни стойности на φ

Консумираната активна мощност във веригата е:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi, \text{ W}$$

от където фазовата разлика може да бъде определена чрез измерване на мощността, напрежението и тока

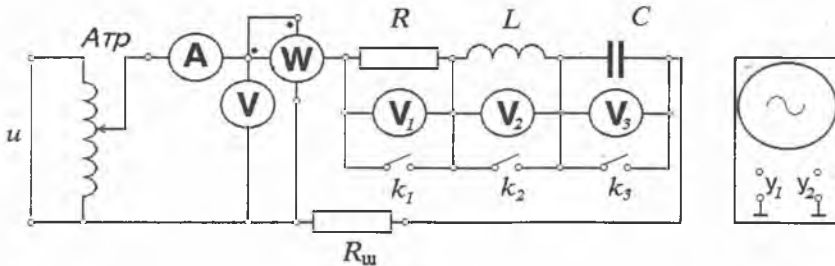
$$\varphi = \arccos \frac{P}{UI}$$

III. РЕД ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

За опитно изследване на веригата се свързва схемата, която е показана на фиг. 3.6.

Посредством автотрансформатор *Аmp* се регулира входното напрежение и входния ток на веригата, измервани съответно с волтметър *V* и амперметър *A*. Консу-

мираната активна мощност се измерва с ватметър W . Паралелно на всеки от елементите се свързват волтметрите V_1, V_2, V_3 за измерване на напреженията, и ключовете k_1, k_2, k_3 , с които могат да се реализират различни вериги. За наблюдение на графиките на синусоидите на напреженията и тока във веригата се свързва и двулъчев осцилоскоп. За всички опити входния ток се поддържа неизменен (0,2-0,25 А). Показанията на уредите се нанасят в Таблица 1. Последователно се реализират следните вериги:



фиг. 3.6. Работна схема

1. *Верига с активно съпротивление R .* Ключът k_1 е отворен, а k_2 и k_3 са затворени. От показанията на уредите се определят:

$$z = R = \frac{U_1}{I}, \Omega$$

$$\varphi = \arccos \frac{P}{UI} \approx 0^\circ$$

2. *Верига с bobина L .* Ключът k_2 е отворен, а k_1 и k_3 са затворени. Реалните bobини освен индуктивност L имат и активно съпротивление R_6 , което не може да се пренебрегне. Тогава от показанията на уредите се определят:

$$z = z_6 = \frac{U_2}{I}, \Omega$$

$$R_6 = \frac{P}{UI}, \Omega \quad X_L = \sqrt{z_6^2 - R_6^2}, \Omega \quad L = \frac{X_L}{\omega}, \text{H} \quad \varphi = \arccos \frac{P}{UI}$$

3. *Верига с кондензатор C .* Ключът k_3 е отворен, а k_1 и k_2 са затворени. Реалните кондензатори са близки до идеалните (имат малки диелектрични загуби).

$$X_C = \frac{U_3}{I}, \Omega \quad C = \frac{I}{\omega X_C} \cdot 10^6, \mu\text{F} \quad \varphi = \arccos \frac{P}{UI} \approx -90^\circ$$

4. *Верига с резистор и bobина.* Ключовете k_1 и k_2 са отворени, а k_3 е затворен.

5. *Верига с резистор и кондензатор.* Ключовете k_1 и k_3 са отворени, а k_2 е затворен.

6. Верига с резистор, бобина и кондензатор. Ключовете K_1 , K_2 и K_3 са отворени.

7. Верига с резистор, бобина и кондензатор в режим на резонанс. Ключовете K_1 , K_2 и K_3 са отворени. Чрез промяна на капацитета C се постига равенство $U_2=U_3$, а токът I достига максимална стойност. Определя се стойността на C , при която настъпва резонанс (както в т.3).

Таблица 3.1

Измерени величини						Изчислени величини								Положение на ключовете		
U	I	P	U ₁	U ₂	U ₃	R	z _б	R _б	X _L	L	X _C	C	φ	K ₁	K ₂	K ₃
V	A	W	V	V	V	Ω	Ω	Ω	Ω	H	Ω	μF	-			
				-	-		-	-	-	-	-	-		отв.	затв.	затв.
			-	-	-		-	-	-	-	-	-		затв.	отв.	затв.
			-	-			-	-	-	-	-	-		затв.	затв.	отв.
							-	-	-	-	-	-		отв.	отв.	затв.
							-	-	-	-	-	-		отв.	затв.	отв.
							-	-	-	-	-	-		отв.	отв.	отв.
							-	-	-	-	-	-		отв.	отв.	отв.

8. От получените данни да се построят в подходящ мащаб векторните диаграми за отделните вериги, като се има в предвид, че U_R съвпада по фаза с тока I , U_b изпреварва тока I с ъгъл ϕ , определен в т.2, а U_C изостава от тока I с ъгъл ϕ , определен в т.3 (виж фиг. 3-2, 3-3, 3-4 и 3-5).

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Какво е период, честота и ъглова честота на синусоидалните величини?
2. Каква е връзката между амплитудна и ефективна стойност при синусоидалните напрежения и токове?
3. Каква е фазовата разлика между напрежението и тока в електрическа верига с активно съпротивление, индуктивност, капацитет?
4. На какво е равен импеданса в последователна RL, RC, RLC верига?
5. Кой режим се нарича резонанс на напреженията?
6. Кое е условието за настъпване на резонанс и как може да се реализира?
7. На какво е равна резонансната честота?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №4

ИЗМЕРВАНЕ НА АКТИВНА МОЩНОСТ С ЕЛЕКТРОДИНАМИЧНИ ВАТМЕТРИ

I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Да се изучи устройството на електродинамичния ватметър.
2. Да се изучат схемите за измерване на активна мощност на еднофазен консуматор.
3. Да се изучат основните схеми за измерване на активна мощност на трифазни консуматори.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

1. Устройство на електродинамичния ватметър.

Електродинамичните ватметри са най-разпространените уреди за измерване на мощност във веригите за променлив ток. Могат да се използват и във вериги за постоянен ток, но се използват по рядко поради това, че там мощността се измерва лесно с помощта на амперметър и волтметър. На фиг. 4.1 схематично е показано устройството на електродинамичен ватметър. През неподвижната намотка А, наречена токова, преминава токът на консуматора, чиято мощност се измерва. Тя съдържа малък брой навивки и е оразмерена за определен номинален ток (1, 2, 5, 10 А и т.н.). Подвижната намотка Б, наречена напрежителна, се включва паралелно на входа на консуматора и токът през нея е пропорционален на входното напрежение. Тя съдържа голям брой навивки и се изготвя от проводник с малко сечение. Последователно с нея е включен резистор с голямо съпротивление и малък температурен коефициент на съпротивлението. Той се изпълнява най-често от манганин. Поради това, че тока през напрежителната намотка се определя основно от съпротивлението на този резистор, практически той е почти във фаза с входното напрежение на консуматора.

При взаимодействието на магнитните полета, създадени от токовете в двете намотки, възниква въртящ момент

$$M = i_A i_B \frac{dM_{AB}}{d\theta}, \quad (4.1)$$

където i_A и i_B са токовете през двете намотки;

- M_{AB} взаимната индуктивност между намотките;
- θ ъгловото отклонение на подвижната намотка.

При ватметрите конструктивно се осигурява $\frac{dM_{AB}}{d\theta} = \text{const}$. Като имаме предвид, че $i_A = i$ и $i_B = \frac{u}{R_B}$, където токът и напрежението u са входните параметри на консуматора, се получава:

$$M = i \frac{u}{R_B} = \text{const} = kui = kP, \quad (4.2)$$

където “ p ” е функцията на мощността на консуматора.

Във верига със синусоиден ток подвижната намотка се отклонява пропорционално на средната стойност на въртящия момент:

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = kUI \cos \varphi = kP, \quad (4.3)$$

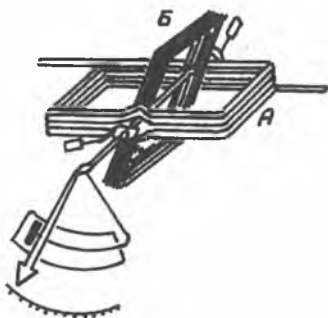
където U и I са ефективните стойности на напрежението и тока, а P - активната мощност на консуматора; φ - фазовата разлика между напрежението и тока.

Съпротивителният момент при тези уреди се обуславя от спирални пружинки, през които се подвежда тока i_B . Той е пропорционален на ъгловото отклонение на подвижната бобина

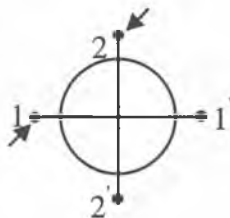
$$M_c = k_1 \theta. \quad (4.4)$$

При равенство между въртящия и съпротивителния момент за ъгловото отклонение се получава $\theta = k_2 P$ (4.5). От тази формула се вижда, че скалата на електродинамичните ватметри е равномерна.

Условното означение на ватметър в схемите на електрическите вериги е показано на фиг. 4.2, където с 1-1' и 2-2' са означени изводите на токовата и напрежителната намотка. Двойката изводи, белязана със знака “↓” (може също звездичка или точка), се нарича “начала” или “едноименни изводи” на ватметъра. Това означение се използва за правилно свързване на ватметъра (при еднаква посока на токовете в двете намотки спрямо едноименните изводи възниква положителен въртящ момент) и стрелката на уреда се отклонява по скалата.



фиг. 4.1



фиг. 4.2

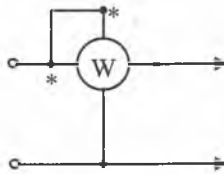
$$\text{Константата на ватметъра се определя с израза } k_w = \frac{U_H I_H}{\theta_H}, \quad (4.6)$$

където U_H и I_H са номиналните величини за напрежителната и токовата намотки; θ_H - номиналния брой деления на скалата.

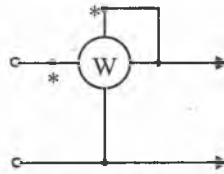
Обхватът на ватметъра може да бъде разширен по ток, по напрежение или едновременно и по ток и по напрежение. Начините за разширяване на обхвата не са предмет на тази лабораторна работа.

2. Схеми за измерване на активната мощност на еднофазен консуматор.

Тези схеми са аналогични на схемите за измерване на мощност с амперметър и волтметър и са показани на фиг. 4.3 а, б.



фиг. 4.3 а



фиг. 4.3 б

Относителната грешка при измерване на мощност по тези схеми е:

$$\text{За схема V-A} \quad \beta_{V-A} = \frac{P_a}{P_k} = \frac{P_a}{Z_k \cos \varphi} \quad (4.7)$$

$$\text{За схема A-V} \quad \beta_{A-V} = \frac{P_V}{P_k} = \frac{Z_k}{R_V \cos \varphi} \quad (4.8)$$

Където P_a е мощността, която се отделя в токовата намотка на ватметъра; P_V - мощността, която се отделя в напрежителната верига; R_a и R_V - активни съпротивления на токовата и съответно напрежителната верига на ватметъра; Z_k - модул на импеданса на консуматора; φ - фазовата разлика между напрежението и тока.

Като приравним изразите за двете грешки, получаваме $Z_k = \sqrt{R_a R_V} = Z_0$ (4.9)

При $Z_k < Z_0$ следва да се прилага A-V схема, а при $Z_k > Z_0$ - V-A схема.

3. Измерване на активна мощност в трифазни вериги.

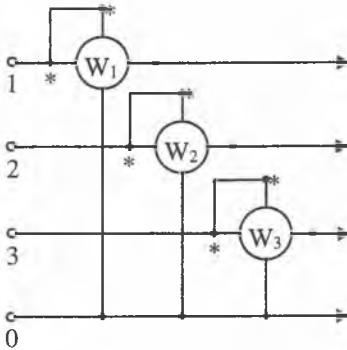
Активната мощност на трифазен консуматор се определя с изрза

$$P_{\Sigma} = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + U_3 I_3 \cos \varphi_3 \quad (4.10)$$

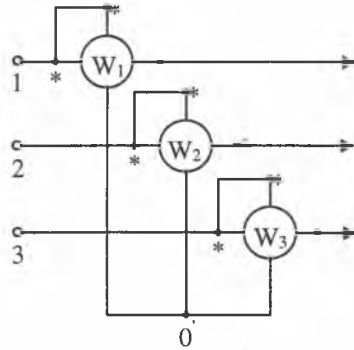
Където U_1, U_2, U_3 и I_1, I_2, I_3 са съответно ефективните стойности на фазовите напрежения и токове; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ - фазовите разлики между фазовите напрежения и фазовите токове на консуматора.

3.1. При несиметричен консуматор и четирипроводна линия активната мощност се измерва с три ватметъра по схемата на фиг. 4.4. В този случай за намирането ѝ се сумират показанията на трите уреда

$$P_{\Sigma} = k_1\theta_1 + k_2\theta_2 + k_3\theta_3 \quad (4.11)$$



фиг. 4.4



фиг. 4.5

3.2. При несиметричен консуматор и трипроводна линия активната мощност може да се измери:

3.2.1. С три ватметъра по схемата от фиг. 4.5. Напрежителните вериги на трите ватметъра трябва да имат еднакво съпротивление, за да се намират под действие на фазовото напрежение. Следователно, номиналното им напрежение трябва да бъде равно или по-голямо от U_{Φ} . Мощността се изчислява също по (4.11).

3.2.2. С два ватметъра (схема на Арон). За трипроводна линия е в сила равенството

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (4.12)$$

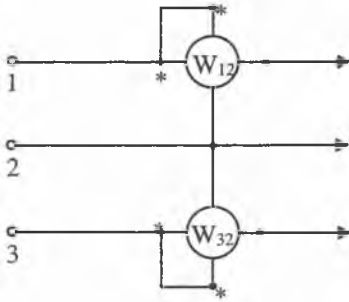
където i_1, i_2, i_3 са моментните стойности на токовете в линията. Като елиминираме от това равенство един ток, например $i_2 = -i_1 - i_3$ можем да представим моментната мощност на консуматора като двучлен

$$P_{\Sigma} = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3 = u_{12} i_1 + u_{32} i_3 \quad (4.13)$$

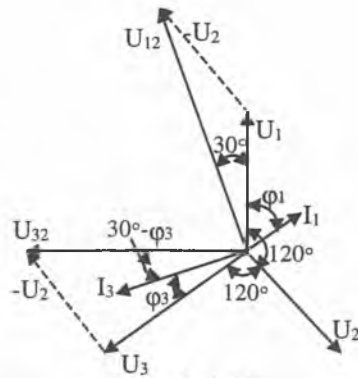
където u_{12} и u_{32} са моментните стойности на линейните напрежения. Активната мощност на трифазния консуматор е средна стойност на (4.13) за един период

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{\Sigma} dt = U_{12} I_1 \cos(30^\circ + \varphi_1) + U_{32} I_3 \cos(30^\circ - \varphi_3) \quad (4.14)$$

където U_{12} и U_{32} са ефективните стойности на съответните линейни напрежения; и φ_1, φ_3 - фазовите разлики между фазовите напрежения и фазовите токове. Схемата за измерване с два ватметъра е показана на фиг. 4.6, а векторната диаграма за този случай – на фиг. 4.7.



фиг. 4.6



фиг. 4.7

Формула (4.14) показва, че:

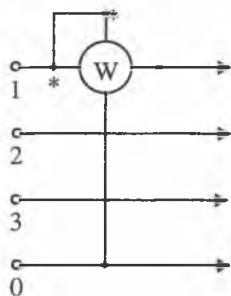
А) при $30^\circ + \varphi_1 > 90^\circ \setminus \varphi_1 > 60^\circ$ - консуматорът има силно индуктивен характер. Ватметър W_{12} от схемата на фиг. 4.6 ще се отклонява обратно;

Б) при $30^\circ - \varphi_3 > 90^\circ \setminus \varphi_3 < -60^\circ$ - консуматорът има силно капацитивен характер. Ватметър W_{32} ще се отклонява обратно. В тези случаи показанието на обратно отклонения се уред се отчита, като се кръстосат захранващите проводници на една от намотките му. Трифазната мощност се определя с израза:

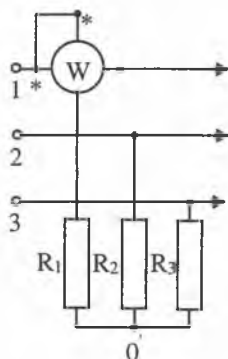
$$P_{\Sigma} = \pm k_{w12} \theta_{12} \pm k_{w32} \theta_{32} \quad (4.15)$$

Знак “-” в този израз се записва за даден член, ако съответния ватметър се е отклонявал обратно. Трябва да се има предвид, че сумарното показание на двата ватметъра, при измерване на активната мощност на консуматор е винаги положително.

3.3. При симетричен консуматор. Активната мощност може да се измери освен по всички посочени дотук схеми, но и с един ватметър. В този случай се измерва мощността на една фаза на консуматора и полученият резултат се утроява. На фиг. 4.8, 4.9 и 4.10 са показани три различни случая на такова измерване.

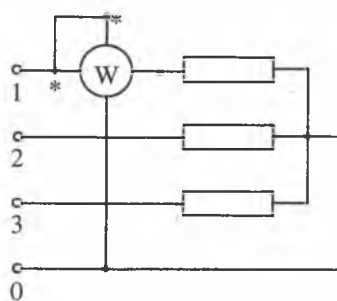


фиг. 4.8



$$R_w + R_1 = R_2 = R_3$$

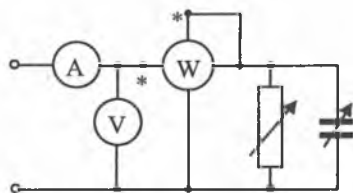
фиг. 4.9



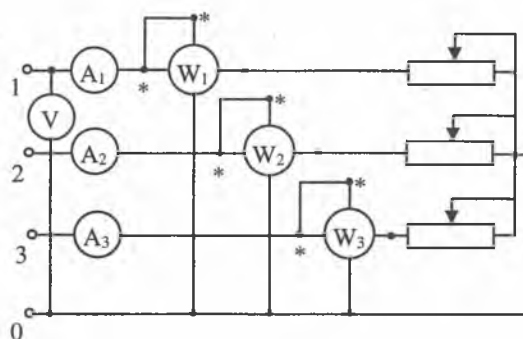
фиг. 4.10

III. РЕД ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Реализира се схемата от фиг. 4.11 за измерване на активната мощност на еднофазен консуматор. Правят се три измервания - едно при активен и две при комплексен товар. Резултатите се нанасят в таблица 4.1. От отчетените показания се изчисляват активната P , привидната S и реактивната Q мощности на консуматора и $\cos \varphi$.



фиг. 4.11



фиг. 4.12

2. Осъществява се веригата, показана на фиг. 4.12 за измерване на активна мощност при четирипроводна линия. С помощта на реостатите се задават четири режима - един симетричен и три несиметрични. Резултатите се нанасят в таблица 4.2.

3. Осъществява се веригата, показана на фиг. 4.13 за измерване по схемата на двата ватметра. Задават се същите четири режима, както в т.2. Резултатите се нанасят в таблица 4.2. Разкъсва се звездната точка и последователно на реостатите се включват кондензаторите от фиг. 4.13 б, т.е. реализира се активно капацитивен консуматор. Задават се два режима: на минимална фазова разлика (максимално съпротивление на

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Опишете конструкцията и принципа на действие на електродинамичните ватметри.
2. Запишете израза за въртящия момент.
3. Каква е скалата на електродинамичните ватметри? Как е правилно да се свързват намотките на електродинамичния ватметър?
4. Каква е ролята на едноименните изводи при ватметъра?
5. Как се определя константата на ватметър?
6. Как се разширява обхвата на ватметър?
7. Може ли да се определи фазовата разлика между напрежението и тока на входа на един консуматор с помощта на волтметър, амперметър и ватметър.
8. Начертайте схемата за измерване на мощност с три ватметъра в трипроводна линия.
9. Начертайте схемата за измерване на мощност с два ватметъра.
10. Докажете, че трифазната мощност може да се измерва само с два ватметъра?
11. В кои случаи възниква обратно отклонение на ватметър при схема на Арон?
12. Ако един консуматор се състои от паралелно свързани резистор и кондензатор, как ще се измени активната му мощност, ако увеличаваме капацитета на кондензатора?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №5

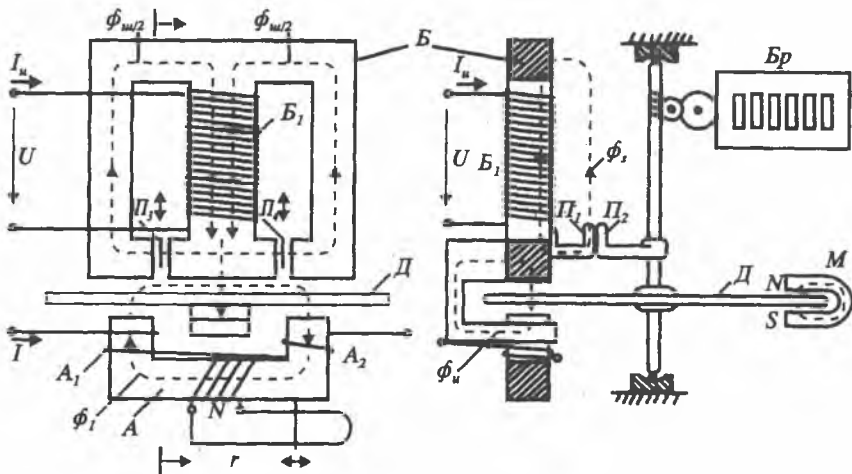
ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕДНОФАЗЕН ИНДУКЦИОНЕН ЕЛЕКТРОМЕР ЗА АКТИВНА ЕНЕРГИЯ

I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Запознаване с устройството и принципа на действие на еднофазен индукционен електромер.
2. Запознаване със схемата на свързване на електромера за измерване на активна енергия.
3. Проверка на точността на електромера при различно натоварване, проверка за отсъствие на самоход и определяне на чувствителността.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

Във веригите за променлив ток за измерване на активна електрическа енергия се използват изключително индукционни електромери. На фиг. 5.1 е показана принципна конструктивна схема на еднофазен индукционен електромер за активна енергия.



фиг. 5.1

Основните му съставни части са: токов електромагнит А (с две последователно свързани намотки A_1 и A_2) и напрежителен електромагнит Б (с намотка B_1), образуващи магнитната система; алуминиев диск Д, разположен във въздушната междина на магнитната система, който може да се върти заедно с вертикалната си ос; броячен механизъм Бр, свързан посредством червячна предавка с оста на диска и постоянен магнит М, обхващащ част от периферията на диска. Намотката на токовия електромагнит се свързва последователно във веригата и през нея протича токът I на консуматор.

матора, а намотката на напрężителния електромагнит се включва паралелно към напрężението U на консуматора. Двете намотки създават променливи магнитни потоци, пропорционални съответно на тока и напрężението на веригата. От съвместното действие на работните магнитни потоци Φ_I и Φ_U (фиг. 5.2) в магнитната система се създава бягащо магнитно поле, което индуктира вихрови токове в електропроводящия диск. При взаимодействието на тези токове с бягащото магнитно поле възниква двигателен момент M_d , който завърта диска:

$$M_d = k_I f \Phi_I \Phi_U \sin \psi = k_D U I \sin \psi \quad (5.1)$$

Тук k_I , k_D са конструктивни константи, f - честотата на захранващото напрężение, а ψ е фазовата разлика между магнитните потоци Φ_I и Φ_U . Посредством включване на някои допълнителни елементи и корекции, може да се изпълни условието: $\psi = (\pi/2) - \varphi$ или $\sin \psi = \cos \varphi$, където φ е фазовата разлика между U и I . Тогава M_d става пропорционален на активната мощност P :

$$M_d = k_D U I \cos \varphi = k_D P \quad (5.2)$$

От взаимодействието на постоянния магнит M с вихровите токове, индуктирани от него в диска при въртенето му между полюсите, се създава съпротивителен момент M_c , пропорционален на ъгловата скорост на диска $d\theta / dt$:

$$M_c = k_C d\theta / dt, \quad (5.3)$$

където θ е ъгълът на завъртане на диска, а k_C е конструктивна константа. При изравняване на двата момента $M_d = M_c$ (установен режим), дискът ще се върти равномерно с постоянна ъглова скорост. Тогава, съгласно (5.2) и (5.3):

$$k_D P = k_C d\theta / dt \quad (5.4)$$

Ако се интегрира лявата част на горното равенство за интервал от време $\Delta t = t_1 - t_2$, се получава активната енергия:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt, \quad (5.5)$$

която електромерът е отчел за време Δt , през което дискът е направил n пълни оборота. Интегрирането на дясната част на (5.4) изразява промяната на ъгъла на завъртане на диска от $\theta_1 = 0$ до $\theta_2 = 2\pi n$ [rad] за същия интервал от време, т.е.

$$\frac{k_D}{k_C} \int_0^{2\pi n} d\theta = \frac{k_D}{k_C} 2\pi n = K_E n \quad (5.6)$$

От равенството на (5.5) и (5.6) се получава уравнението на електромера

$$W = K_E n \quad (5.7)$$

Тук K_E е номиналната константа на електромера, която е равна на количеството енергия, съответстващо на един оборот на диска и се измерва в [W, s/tr]. Уравнението

(5.7) показва, че измерваната енергия W за даден интервал от време е пропорционална на константата K_E и броя на оборотите, извършени от диска за това време. Измерената енергия се отчита по показанията на броячния механизъм Бр, градуиран обикновено в kWh. На табелката на електромера са дадени номиналните му данни - ток, напрежение, честота и т.нар. преводно число N , което показва на колко оборота на диска съответства енергия 1 kWh, отчетена чрез броячния механизъм. Чрез преводното число може да се изчисли номиналната константа по формулата:

$$K_E = \frac{1}{N} 3600 \cdot 10^3, W, \text{ s/tr} \quad (5.8)$$

Относителната грешка, с която електромерът отчита преминалата през него енергия се определя по формулата:

$$\beta \% = \frac{W - W_D}{W_D} 100, \% \quad (5.9)$$

където W е отчетената от електромера енергия, а W_D е действително консумираната енергия, измерено с прецизни лабораторни уреди - еталонен ватметър и секундомер. За директно включените електромери (без измервателни трансформатори) относителната грешка не трябва да надвишава 2,5%. При проверка на електромера мощността на консуматора P се поддържа постоянна (измерва се с еталонния ватметър), а времето t , за което са направени определен брой (n) оборота на диска, се отчита със секундомер. Тогава W се изчислява по (5.7), а $W_D = P t$.

Ако грешката е извън допустимите граници, необходима е регулировка на електромера в специализирана лаборатория.

Самоход се нарича въртенето на диска на електромера без да има консумация на енергия (веригата на токовия електромагнит е прекъсната). Тогава въртящият момент се създава само от напрежителния електромагнит.

Чувствителност на електромера σ при номинално напрежение се нарича отношението на минималния ток, при който дискът се върти устойчиво, към номиналния ток на електромера:

$$\sigma, \% = \frac{I_{\min}}{I_H} 100, \% \quad (5.10)$$

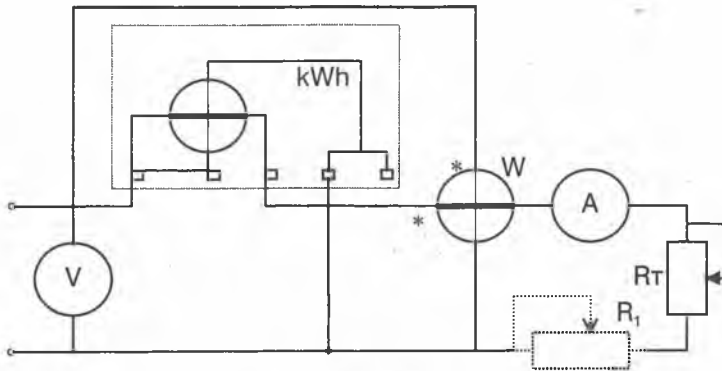
За директно включени в мрежата електромери е необходимо $\sigma \leq 0,5\%$.

Когато електромерът има самоход или чувствителността му е извън нормите, необходимо е да се регулира.

III. РЕД ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Свързва се схемата от фиг. 5.2 за измерване на активен енергия и проверка на еднофазен електромер. В нея ватметърът е еталонен и отчита действително изразходваната мощност, а амперметърът и волтметърът служат за контрол на тока и напрежението. R_T е променливо товарно съпротивление. По схемата може да се извърши проверка само при $\cos \varphi = 1$.

2. Проверената схема се включва към номинално напрежение и чрез промяна на R_T се установява номиналният ток във веригата. При това положение електромерът се оставя да работи 15 min., за да се установи номиналният топлинен режим.
3. За стойности на тока $0.1 I_N$, $0.5 I_N$ и I_N се отчита със секундомер времето за извършване на определен брой пълни обороти на диска. Това време не трябва да бъде по-малко от 60 s. Отчитат се показанията на останалите уреди. Резултатите се нанасят в табл. 5.1. За всяка стойност на тока се правят по две измервания при еднакъв брой обороти на диска и се изчисляват средните стойности на величините, чрез които се изчислява относителната грешка.



Фиг. 5.2

4. При работно състояние на електромера (дискът се върти) се прекъсва токовата верига ($I = 0$), но напрежителната намотка остава свързана към номиналното напрежение. Електромерът няма самоход, ако дискът му след показване на отличителния белег на прозорчето спре да се върти. Тогава пластинките Π_1 и Π_2 (фиг. 5.1) застават точно една срещу друга. Ако дискът продължи да се върти (има самоход) електромерът се регулира посредством приближаване на пластинките Π_1 и Π_2 , като след това отново се проверява.

5. За проверка на чувствителността на електромера в токовата верига се включва реостат с достатъчно голямо съпротивление R_1 и амперметърът се заменя с милиамперметър. При номинално напрежение и максимално съпротивление дискът не трябва да се върти. Намалява се постепенно съпротивлението на реостата и се отчита минималният ток I_{min} , който предизвиква пълно завъртане на диска. По (5.10) се изчислява чувствителността.

6. Въз основа на направените в т.3 измервания се изчисляват измерената от електромера и действително консумираната енергия, а чрез тях – относителната грешка β . Резултатите се нанасят в табл. 5.1.

7. Прави се преценка за точността и качествата на електромера. Построява се графично зависимостта $\beta = f(I)$.

Таблица 5.1

№	Отчетени величини					Измерени величини		
	I	Мощност		t	n	W	W _g	β
		θ	P					
A	дел	W	s	tr	W _s	W _s	%	
1								
2								
ср.								
1								
2								
ср.								
1								
2								
ср.								

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Какво е устройството на еднофазен индукционен електромер?
2. Обяснете принципа на действие на електромера.
3. Как се свързва електромер в еднофазна верига.
4. Как се определя константата на електромера?
5. Как се определя относителната грешка на електромера?
6. Как се проверява електромера за липса или наличие на самоход?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №6

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДВИГАТЕЛ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК С ПАРАЛЕЛНО ВЪЗБУЖДАНЕ

I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Да се изучи устройството, принципа на действие и начините за пускане и управление на скоростта на двигателя.
2. Да се снимат работните характеристики на двигателя.
3. Да се снесе естествената механична характеристика на двигателя.
4. Да се снимат механични характеристики при съпротивление в котвената верига и при отслабено магнитно поле.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

Постояннотоковата електрическа машина, както повечето електрически машини, е обратима, т.е. може да работи и в двигателен, и в генераторен режим. Електродинамичните сили, респективно въртящият момент на машината, се създават при взаимодействието между магнитно поле и тока, протичащ през т.н. котвена намотка, която е изведена през специален комутационен апарат, наречен колектор. Котвената намотка и колекторът най-често са разположени върху ротора на машината, но съществува и обратното конструктивно решение - котвена намотка и колектор, разположени в неподвижния статор.

Магнитното поле се създава от т.н. възбудителна намотка (ВН), през която протича ток I_v , наречен "възбудителен". В много съвременни машини вместо възбудителна намотка се използват постоянни магнити. При котвена намотка в ротора, възбудителната намотка, или постоянните магнити, са разположени в статора и обратно.

От взаимодействието между тока I_k , протичащ през котвената намотка, и магнитния поток Φ се поражда въртящия момент

$$M = C_m \cdot \Phi \cdot I_k, \quad (6.1)$$

където C_m е константа, която зависи от конструктивните параметри на машината.

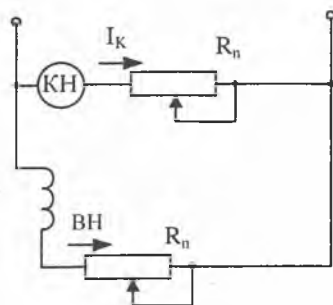
Под действието на този въртящ момент (при двигателите) или под действие на външно приложен въртящ момент (при генераторите), роторът започва да се върти с честота n . При въртенето котвените проводници пресичат магнитното поле и в тях се индукира електродвижещо напрежение. Индукираното напрежение в отделните проводници се мултиплицира в зависимост от броя на проводниците и начина на свързване и дава общото електродвижещо напрежение в котвената намотка:

$$E = C_e \cdot \Phi \cdot n, \quad (6.2)$$

където C_e е константа, определена от конструктивните параметри на машината.

При двигателите с паралелно възбуждане възбудителната намотка се свързва към източника на постоянно напрежение U паралелно на котвената намотка

(фиг. 6.1). Във веригата на котвената намотка е включен пусковият реостат R_p , а във веригата на възбудителната намотка - реостатът R_v . Реостатите са необходими за изпитанията и не са задължителни при промишлените схеми на свързване. При двигателите с постоянни магнити веригата на възбудителната намотка отпада.



фиг. 6.1

От закона на Ом за котвената верига се определя токът:

$$I_k = \frac{U - E}{R_n + r}, \quad (6.3)$$

където r е собственото съпротивление на котвената намотка.

В момента на пускане на двигателя ($n = 0$) електродвижещото напрежение E има нулева стойност и токът I_k е най-голям. Съпротивлението r е много малко и, при отсъствие на пусковия реостат, токът добива недопустима стойност (от десет до петдесет пъти по-голяма от номиналната му стойност). Същевременно и въртящият момент, определен от (6.1) добива недопустима стойност. Това може да разруши двигателя както електрически, така и механически. Затова пускането на постоянно-токовия двигател става задължително или с включен пусков реостат, или при силно понижено напрежение U .

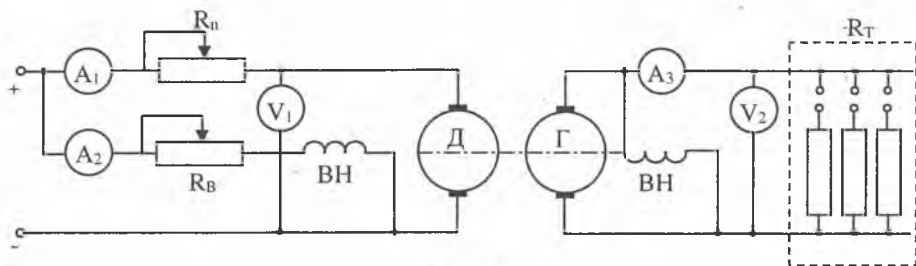
След завъртане на двигателя и с увеличение на честотата на въртене n нараства електродвижещото напрежение E и токът I_k намалява. За поддържане на приблизително неизменен ток по време на ускоряването на двигателя до номиналната му честота на въртене, съпротивлението на пусковия реостат може да се намалява плавно, или на степени, в съответствие с честотата на въртене, до пълното му изключване при номиналната ѝ стойност. Ако пускането се извършва при понижено напрежение U , то трябва по същия начин да се повишава до достигане на номиналната му стойност.

За заснемане на работните характеристики на двигателя е необходимо да се изменя режимът му на работа, като се създават различни, при това точно определени съпротивителни моменти на вала му. Това може да се осъществи по два начина: механичен и електрически.

От механичните методи най-широко приложение има спирачката на Прони. Тя представлява двучелюстна дискова спирачка, свързана с вала на изпитвания двигател,

която, чрез механично триене, създава съпротивителен момент. Точното измерване на този момент става чрез измерване на опорната реакция на спирачката с помощта на специална везна. Съоръжението е скъпо и неудобно за работа.

Значително по-удобен е електрическият метод. За целта, чрез еластичен съединител или друга предавка, валът на изследвания двигател се свързва с вала на генератор за постоянен ток (постояннотокова машина в генераторен режим). Генераторът превръща получената от двигателя механична мощност отново в електрическа. Тази електрическа мощност може да бъде изменяна лесно чрез промяна на товарното съпротивление R_T и да бъде измерена чрез включените амперметър и волтметър във веригата (фиг. 6.2).



фиг. 6.2

На всяка машина са присъщи загуби на енергия. Получената от генератора електрическа мощност ще бъде по-малка от механичната мощност, получена от двигателя. За да бъде определена точно механичната мощност, което е целта, трябва да са известни точно загубите на мощност в генератора при различни режими на работа или, което е едно и също, к.п.д. при различните режими. За тази цел генераторът трябва да е бил подложен предварително на изпитания и загубите при различните режими да бъдат нанесени в табличен, графичен, или друг вид. Такъв генератор се нарича тариран генератор.

След като е известна механичната мощност, въртящият момент се определя лесно от известния от механиката израз:

$$M = \frac{P_M}{2\pi n / 60} = 9,55 \frac{P_M}{n} \quad (6.4)$$

В тази формула честотата n е в (1/min), мощността във (W), а моментът - в (Nm).

Механичната мощност се определя от електрическата мощност, отдадена от генератора, след прибавяне на загубите му:

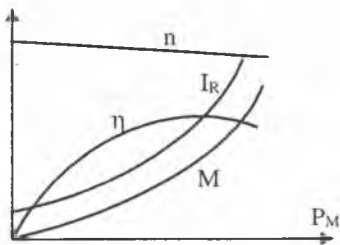
$$P_M = P_G + P_{заг} = P_G / \eta_r = U_G I_G / \eta_r \quad (6.5)$$

където U_G , I_G са съответно напрежението и тока на генератора.

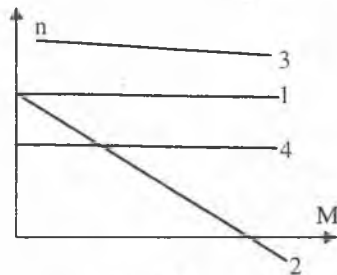
Работните характеристики на двигателя представляват зависимости на най-важните величини: въртящия момент M , честотата на въртене n , тока I_k и к.п.д. от полезната (механична) мощност P_M при постоянно захранващо напрежение $U = const$ и възбудителен ток $I_b = const$.

Механичните характеристики представляват зависимостта между честотата на въртене n и въртящия момент M при постоянни стойности на захранващото напрежение $U = \text{const.}$, магнитния поток $\Phi = \text{const.}$ и съпротивлението в котвената верига $R_p = \text{const.}$

На фиг. 6.3 е показан видът на работните характеристики, а на фиг. 6.4 – различни механични характеристики на двигателя. Характеристика 1 отговаря на номинални стойности на U и Φ и $R_p = 0$ и се нарича естествена характеристика. Характеристика 2 отговаря на номинални стойности на U и Φ и $R_p = 0$. Характеристика 3 е за случай $R_p = 0$; $U = U_{\text{ном}}$; $\Phi < \Phi_{\text{ном}}$, а характеристика 4 - за $R_p \neq 0$; $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$; $U < U_{\text{ном}}$.



фиг. 6.3



фиг. 6.4

III. РЕД ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Да се разучи конструкцията на постоянноотоквата машина: котвена намотка, колектор, четки, главни и допълнителни полюси.
2. Да се свърже схемата от фиг. 6.2, като реостатът R_p се постави в положение на максимално съпротивление, а реостатът R_v - в положение, отговарящо на нулева стойност на съпротивлението.
3. Да се включи източникът на постоянно напрежение U и, след развъртане на двигателя, да се премести плъзгачът му в обратната посока, отговаряща на нулева стойност.
4. Да се заснемат работните характеристики, като за целта се попълни следната таблица:

Таблица 1

Резултати от измерванията								Резултати от изчисленията			
за двигателя				за генератора							
U	I _v	I _k	n	U _г	I _г	η _г	P _{заг.}	P	P _м	η	M
V	A	A	1/min	V	A	—	W	W	W	—	Nm

Измерванията започват с ненатоварен генератор (празен ход), след което се включват последователно секции на товарното съпротивление R_t , като се следи токът на генератора да не надхвърли допустимата стойност. При всички измервания напрежението на двигателя U трябва да бъде неизменно. Ако е необходимо, то може да се коригира с помощта на R_p . Същото важи и за тока I_v .

5. Да се постави плъзгача на R_p в средно положение и се повторят измерванията, но се попълват само колоните n , U_g , I_g , η_r , P_m , M .

6. Възстановява се състоянието $R_p = 0$, а плъзгачът на R_v се поставя в средно положение. Измерванията се повтарят, като се попълват само колоните от т. 5. Следи се тока на двигателя, който не трябва да надхвърли допустимата стойност.

7. Построяват се графично работните характеристики от данните по т. 4.

8. Построяват се графично механичните характеристики както следва:

- естествената - от данни по т. 4;
- при $R_p = 0$ - от данни по т. 5;
- при $\Phi < \Phi_{ном}$ - от данни по т. 6

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Опишете устройството и принципа на действие на двигателите за постоянен ток с паралелно самовъзбуждане.
2. Защо при изследването на двигателя за постоянен ток към вала му се присъединява генератор за постоянен ток?
3. Как се определя механичната мощност P_m на двигателя?
4. Как се снемат механичните характеристики на двигателя?
5. Как се снемат работните характеристики на двигателя?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №7

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕДНОФАЗЕН ТРАНСФОРМАТОР

I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

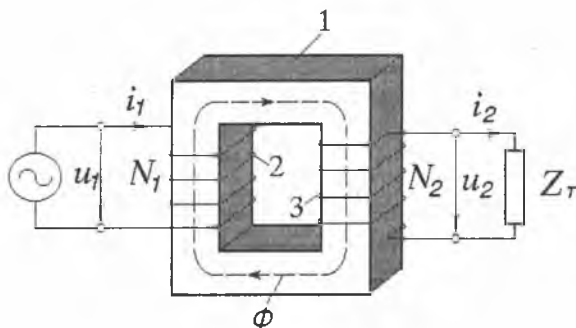
1. Запознаване с устройството и принципа на действие на еднофазен трансформатор.
2. Снемане и построяване на работните характеристики на еднофазен трансформатор.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

1. Устройство на еднофазен трансформатор

Трансформаторът е статична електрическа машина, която предава по електромагнитен път енергия от една електрическа верига в друга, като при това предаване могат да се променят величините *напрежение* и *ток* при запазване на честотата.

Основните конструктивни елементи на един еднофазен трансформатор са: - магнитопровод 1, и две намотки 2 и 3 (фиг. 7.1.)



фиг. 7.1. Конструктивна схема:

1-магнитопровод, 2-първична намотка, 3-вторична намотка

Магнитопроводът служи да канализира магнитния поток. Изработва се от тънки листове стоманена силициева ламарина (ламели), изолирани един от друг, за да се намалят загубите от вихрови токове и хистерезис. Върху ядрата на магнитопровода се разполагат двете намотки. Едната намотка с N_1 навивки се включва към захранващ източник с напрежение U_1 и се нарича *първична*, а към другата намотка с N_2 навивки се свързва товарът Z_r и тя се нарича *вторична*.

2. Принцип на действие

Принципът на действие на трансформатора се основава на явлението електромагнитна индукция. При включване на първичната намотка към източник на синусоидално напрежение U_1 , през нея протича променлив ток i_1 , който възбужда синусо-

соидален магнитен поток, по-голямата част от който се затваря през магнитопровода - Φ . Този поток обхваща и двете намотки и индуктира в тях електродвижещи напрежения, ефективните стойности на които са:

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_T$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_T$$

където, f - честотата на захранващото напрежение, Hz

Φ_T - амплитудна стойност на магнитния поток, Wb

Отношението на електродвижещите напрежения E_1 и E_2 е постоянна величина, наречена *коэффициент на трансформация* -

$$k_{mp} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

В режим на празен ход на трансформатора ($i_2=0$; вторичната намотка е отворена) са в сила следните равенства:

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1 - Z_1 \dot{I}_1; \quad \dot{E}_2 = \dot{U}_{2o}$$

Ако пренебрегнем пада на напрежение в първичната намотка $Z_1 \cdot I_1$, можем да определим коефициента на трансформация от режима на празен ход, като измерим напреженията на двете намотки:

$$k_{mp} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_{2o}}$$

В зависимост от стойността на k_{tr} , трансформаторите биват:

- повишаващи - $k_{tr} > 1$
- понижавачи - $k_{tr} < 1$
- разделителни - $k_{tr} = 1$

Работен режим (режим на натоварване) на трансформатора е този, при който към вторичната намотка на трансформатора се включва консуматор с пълно съпротивление Z_L . Тогава под действието на индуктираното във вторичната намотка е.д.н. E_2 ще протича ток i_2 и напрежението на изводите на намотката е:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - Z_2 \dot{I}_2 = Z_m \dot{I}_2$$

Работни характеристики.

Свойствата на трансформаторите в работен режим най-добре се илюстрират от техните работни характеристики.

Работните характеристики на трансформатора изразяват зависимостите на: коефициента на полезно действие η , фактора на мощността в първичната намотка $\cos \phi_1$, пада на напрежение във вторичната намотка ΔU_2 и тока в първичната намотка I_1 , като функция на натоварването P_2 , при постоянни стойности на U_1 , f , $\cos \phi_2$.

Експерименталното изследване на трансформатора и снемането на работните характеристики може да се осъществи чрез непосредствено натоварване с различен товар от 0 до $I_{2ном}$. При това, отчитайки показанията на измервателните апарати включени в схемата, се изчисляват следните величини:

– полезната мощност отдавана към консуматора

$$P_2 = U_2 \cdot I_2, \text{ W}$$

– фактора на мощността в първичната намотка

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1}$$

– коефициента на полезно действие

$$\eta_{пр} = \frac{P_2}{P_1}$$

– пада на напрежение във вторичната намотка

$$\Delta U_2 = \frac{U_{2o} - U_2}{U_{2o}} \cdot 100, \%$$

Определянето на к.п.д. за трансформатори с голяма мощност може да се направи и косвено, чрез определяне на загубите в трансформатора. Тогава

$$\eta_k = \frac{P_2}{P_2 + \sum P_{заг}} = \frac{P_2}{P_2 + P_{ст} + P_{л}}$$

Загубите в трансформатора са:

- загуби в магнитопровода, наречени загуби в стоманата - $p_{ст}$
- загуби в проводниците в намотките, наречени загуби в медта - $p_{л}$

Загубите в стоманата включват загубите от вихрови токове и загубите от хистерезис. Те не зависят от натоварването и се определят експериментално от опита на празен ход. Като пренебрегнем загубите $R_1 \cdot I_1^2$ в първичната намотка, които са незначителни, цялата консумирана мощност от трансформатора в режим на празен ход, отива за покриване загубите в стоманата:

$$p_{ст} \approx P_{1o}$$

Загубите в намотките зависят от квадратите на съответните токове, т.е. те зависят от натоварването. Те се определят се експериментално от опита на късо съединение.

Тъй като $U_{1к} \ll U_{1ном}$ загубите в стоманата са нищожни и могат да се пренебрегнат, цялата мощност консумирана от трансформатора отива за покриване на загубите в намотките при номинален товар:

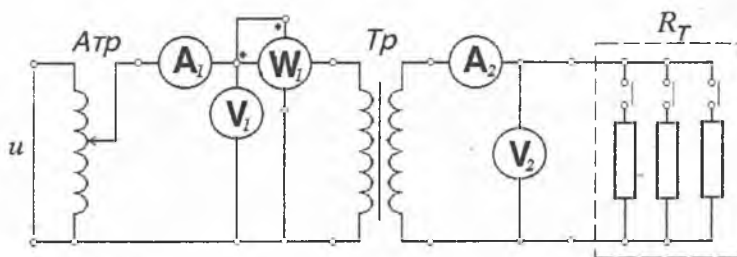
$$P_{л ном} = P_{1к}$$

За всяка друга стойност на товара $I_2 < I_{2ном}$ загубите в медта се изчисляват от израза:

$$P_{л} = P_{1к} \left(\frac{I_2}{I_{2н}} \right)^2$$

III. РЕД ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. За изследване на трансформатора чрез непосредствено натоварване се свързва схемата показана на фиг.7-2.



фиг. 7.2. Ел.схема на свързване на еднофазен трансформатор

С помощта на автотрансформатора Атр, напрежението на първичната намотка се повишава до $U_{1ном}$. За измерване на напрежението, тока и мощността в първичната намотка се свързват волтметърът V_1 , амперметърът A_1 и ватметърът W_1 . Амперметърът A_2 и волтметърът V_2 служат за измерване на тока и напрежението във вторичната намотка.

2. Опит на празен ход

На първичната намотка се подава $U_{1ном}=220V$, а вторичната намотка е отворена, $I_2=0$. Показанието на ватметъра W_1 дава загубите в стоманата $p_{ст}$. От отношението на напреженията U_1 и U_2 се определя коефициента на трансформация $k_{тр}$. Показанията на уредите се нанасят в Таблица 1.

Таблица 1.

Измерени величини					Изчислени величини							забележка
U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	P_2	$\cos \phi_1$	$\eta_{пр}$	$p_{ст}$	p_m	η_k	ΔU_2	
V	A	W	V	A	W	-	°	W	W	-	%	
				0					0			празен ход
												натоварване

			0					0				късо съединение

3. Непосредствено натоварване

Чрез промяна на товарното съпротивление R_T се задават пет различни стойности на тока I_2 до $I_{2\text{ном}} = 5\text{A}$. При всяка стойност на тока I_2 , U_1 се проверява и се поддържа постоянно по време на натоварването. Резултатите от измерванията се нанасят в Таблица 1.

4. Опит на късо съединение

Автотрансформаторът се връща в положение 0. Изводите на вторичната намотка с е свързват на късо, т.е. $U_2=0$. Напрежението U_1 се повишава бавно до стойност $U_{1к}$, при която токът във вторичната намотка стане равен на номиналния $I_{2к}=I_{2н}=5\text{A}$. Показанието на ватметъра W_1 дава загубите в медта при номинално натоварване $p_{м\text{ ном}}$. Резултатите от измерванията се нанасят в Таблица 1.

5. Да се построят в подходящ мащаб и в една координатна система работните характеристики на трансформатора:

$\cos \varphi_1 = f(P_2)$, $\eta_{\text{пр}} = f(P_2)$, $\eta_k = f(P_2)$, $I_1 = f(P_2)$ и $\Delta U_1 = f(P_2)$, като се има в предвид, че стойностите на величините от опита на късо съединение не участват при построяването.

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Що е трансформатор?
2. Кои са основните конструктивни елементи на трансформатора?
3. Какъв е принципът на действие на еднофазен трансформатор?
4. Кой режим се нарича режим на празен ход?
5. Как се определя коефициентът на трансформация и какви биват трансформаторите в зависимост от него?
6. Кой режим се нарича режим на натоварване?
7. Кои са работните характеристики на еднофазен трансформатор?
8. Как се определят опитно загубите в стоманата?
9. Как се определят опитно загубите в намотките?
10. Как се провежда опита на късо съединение?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 8

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТРИФАЗЕН АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ С РОТОР, СЪЕДИНЕН НАКЪСО

I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Да се изучи устройството и принципа на действие на асинхронния двигател с ротор, съединен накъсо.
2. Да се снимат работните характеристики на двигателя.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

Асинхронните двигатели с късо съединен (кафезен) ротор са най-масово използваните електродвигатели поради простата им конструкция, осигуряваща висока експлоатационна надеждност и ниска цена, както и поради добрите им енергетични показатели. Що се касае до един друг важен показател - техническите възможности за безстепенно изменение на честотата на въртене, те отстъпват на постояннооборотните двигатели, при които това се осъществява с по-прости технически средства.

Бурното развитие на полупроводниковите технологии и по-специално на мощните честотни преобразуватели постепенно води до технико-икономическо предимство на асинхронните двигатели и по този показател.

Основните конструктивни елементи на асинхронната машина са статорът и роторът. Статорът представлява пръстеновиден пакет от електротехническа ламарина, закрепен към корпуса на машината. По вътрешната повърхност на този пакет са оформени канали, в които, подходящо изолирани, са разположени проводниците на статорните бобини. Отделните бобини могат да бъдат свързани помежду си последователно или паралелно, но в крайна сметка се образуват три независими и еднакви групи бобини, изместени пространствено на 120 електрически градуса помежду си (електрическият градус е равен на реалния, разделен на броя на чифтовете полюси p). При двуполусна машина $p = 1$ и бобините са разположени на 120 градуса помежду си. При четириполусна машина те са разположени на 60 градуса.).

Роторът представлява цилиндричен пакет от електротехническа ламарина, по външната повърхност на който са оформени канали. Във всеки канал има един единствен проводник, най-често целият канал е запълнен, например с алуминий. Два пръстена от същия материал в двата края на ротора свързват всички проводници накъсо.

При свързване на статорните намотки към трифазна верига в машината се създава въртящо се магнитно поле. Това поле пресича проводниците на ротора, при което индукира електродвижешо напрежение в тях. Тъй като роторните проводници са свързани накъсо и образуват затворена верига, през тях ще протече ток. От взаимодействието на този ток с въртящото се магнитно поле възникват тангенциални сили и въртящ момент M , който задвижва ротора в посоката на въртящото се поле.

Както повечето електрически машини, асинхронният двигател е обратим, т.е. той може да работи и в генераторен режим. В двигателен режим той предава механична енергия към съоръжение, свързано с него, чрез въртящия си момент, чиято посока съвпада с посоката на въртене. При това честотата на въртене на ротора n винаги е по-малка от тази на въртящото се магнитно поле n_0 , с което се осигурява пресичането на роторните проводници от магнитното поле, индуктирането на е.д.н., протичането на ток и създаването на въртящ момент.

Разликата между двете честоти на въртене се характеризира от величината хлъзгане s :

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (8.1)$$

където честотата на въртене на магнитното поле е:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}. \quad (8.2)$$

Генераторен режим е налице при $n > n_0$, при което хлъзгането става отрицателна величина. При това се променя посоката на взаимно пресичане между проводници и магнитно поле, променят се и посоките на е.д.н., на тока и на въртящия момент, а оттам и посоката на механичната енергия, която вече ще постъпва отвън, ще се превърне от машината в електрическа енергия и ще се върне в трифазната ел. верига.

III. РЕД ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Да се разучи конструкцията на асинхронния двигател с късосоединен ротор.
2. Да се свърже схемата от фиг. 8.1.
3. Да се снимат работните характеристики на двигателя, като се попълни таблица 8.1.
4. Да се построят графично работните и механичната характеристики на асинхронния двигател.

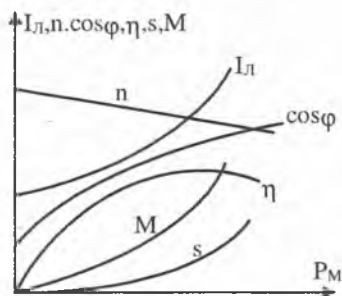
Работните характеристики на асинхронния двигател представляват зависимости на най-важни величини: въртящия момент M , честотата на въртене n , тока I , хлъзгането s , к.п.д. и фактора на мощността $\cos \varphi$ от полезната (механична) мощност.

За механично натоварване на асинхронния двигател се използва електрическият метод, описан в лабораторна работа № 6. Двигателят е куплиран към постоянно-токов генератор, който превръща механичната мощност в електрическа, която може лесно да бъде измерена с волтметър и амперметър. За да се намери механичната мощност, към измерената електрическа трябва да се прибавят загубите на генератора $P_{згг}$, или, което е едно и също, да се отчете неговият к.п.д. η_g .

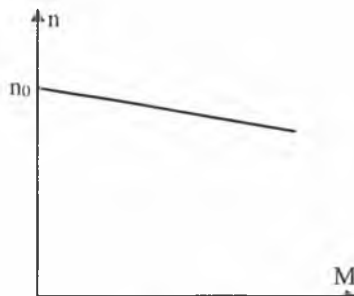
$$P_M = P_r + P_{згг} = P_r / \eta_g = U_g \cdot I_g / \eta_g \quad (8.3)$$

Въртящият момент се изчислява по познатата от механиката формула:

$$M = P_M / \omega = 60 P_M / 2\pi n = 9,55 P_M / n$$



фиг. 8.2



фиг. 8.3

Видът на работните характеристики е показан на фиг. 8.2

От получените резултати може да се построи и част от механичната характеристика на асинхронния двигател. Видът ѝ е показан на фиг. 8.3.

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Опишете устройството и принципът на действие на асинхронния двигател с ротор, съединен на късо.
2. Защо роторът на асинхронния двигател не може да се върти със скорост, равна на скоростта на въртене на магнитното поле?
3. За какво служи генераторът за постоянен ток при изследване на асинхронния двигател?
4. Как се определя механичната мощност на вала и момента на асинхронния двигател?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №9

ПОДОБРЯВАНЕ ФАКТОРА НА МОЩНОСТТА НА ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАЩИ ЛИНИИ

I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Да се изясни същността на проблема $\cos \varphi$.
2. Да се изучат начините и средствата за повишаване (подобряване) на фактора на мощността.
3. Да се подобри фактора на мощността на линия, захранваща трифазен асинхронен двигател.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

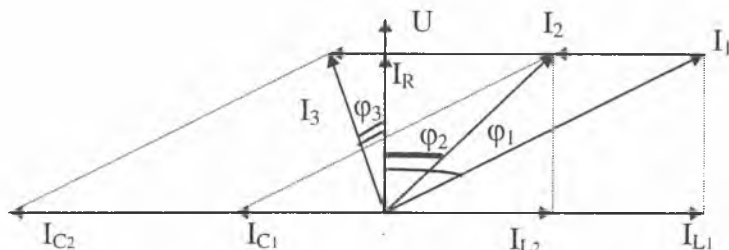
Известно е, че с φ се означава фазовата разлика между тока и напрежението на един консуматор в мрежа за променлив ток, а активна мощност P е тази част от пълната му мощност S , която се преобразува необратимо в друг вид (топлинна, механична и др.) и върши полезна работа. При работа на такъв консуматор по захранващите го линии се пренася активна мощност:

$$\text{(за еднофазен консуматор)} \quad P_1 = U I \cos \varphi = S \cos \varphi \quad (9.1)$$

$$\text{(за симетричен трифазен консуматор)} \quad P = 3 U I \cos \varphi = 3 S \cos \varphi,$$

където U и I са фазните напрежение и ток.

Тъй като напрежението на захранващите линии е постоянно ($U = \text{const}$), активната мощност е пропорционална на произведението $I \cdot \cos \varphi$. Тогава при пренасяне на определена активна мощност $P = \text{const}$ по електропроводна линия токът I ще бъде толкова по-малък, колкото е по-висок $\cos \varphi$ и ще бъде толкова по-голям, колкото е по-малък $\cos \varphi$. При $\cos \varphi = 1$ токът I ще бъде най-малък. Това е показано на векторната диаграма (фиг. 9.1).



Фиг. 9.1

Само електрическите консуматори с активен характер на товара работят с $\cos\varphi = 1$. Това са съпротивителни пещи, котлони, електрически лампи с нажежаема жичка и др. Преобладаващата част (60-90%) от електрическите товари обаче са с индуктивен характер (асинхронни електродвигатели, трансформатори, индукционни нагреватели, тиристорни преобразуватели и др.) и работят с $\cos\varphi < 1$, като тока изостава по фаза от напрежението. Условно бихме могли да разложим тока на такъв консуматор на две взаимноперпендикулярни съставки (фиг. 9.1):

а) Активна $I_R = I \cos\varphi$ - тя съвпада по фаза с напрежението и определя активната мощност, която черпи консуматора от мрежата:

$$P = U I_R = U I \cos\varphi$$

Една и съща активна мощност $P = \text{const}$. може да бъде пренасяна с различни по големина токове, които имат еднакви активни съставки. Така например от (фиг. 9.1) се вижда, че $I_1 > I_2$, но проекциите им върху вектора U (активните им съставки) са равни, т.е.

$$I_1 \cos\varphi_1 = I_2 \cos\varphi_2 = I_R = \text{const}$$

Следователно и пренасяната активна мощност от двата тока при $U = \text{const}$ ще бъде една и съща. Но при протичане на различни по големина токове $I_1 > I_2$ в електропроводна линия с активно съпротивление $r_{\text{л}}$ и загубите на мощност (отделени като топлина), ще са различни:

$$P_{\text{ЗГ1}} = r_{\text{л}} I_1^2 = r_{\text{л}} \left(\frac{I_R}{\cos\varphi_1} \right)^2 \quad P_{\text{ЗГ2}} = r_{\text{л}} I_2^2 = r_{\text{л}} \left(\frac{I_R}{\cos\varphi_2} \right)^2$$

Вижда се, че при пренасянето на определена мощност $P = \text{const}$, загубите по линията при по-ниския фактор на мощността $\cos\varphi_1 < \cos\varphi_2$ са значително по-големи, т.е. $P_{\text{ЗГ1}} \gg P_{\text{ЗГ2}}$.

б) Реактивна (индуктивна) съставка $I_L = I \sin\varphi$ - тя изостава по фаза на $\pi/2$ спрямо U . Мощността, която този ток определя, се нарича реактивна мощност:

$$Q = U I_L = U I \sin\varphi$$

Това е тази част от пълната мощност, която служи само за създаване и поддържане на магнитното поле на консуматора и се колебае непрекъснато между него и източника, без да се губи. При асинхронните двигатели и трансформаторите това е мощността, определена от намагнитващия ток.

При нисък фактор на мощността $\cos\varphi$ през електрическите линии и съоръжения се предават значителни реактивни мощности. За участък от електрическата мрежа с активно (R) и реактивно (X) съпротивления, през които се предава активна (P) и реактивна (Q) мощност, загубите на активна мощност са:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_a + \Delta P_p$$

където ΔP_p са допълнителните загуби на активна мощност, предизвикани от протичането на реактивната мощност Q . Възникват и допълнителни загуби (падове) на напрежение:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} = \frac{PR}{U} + \frac{QX}{U} = \Delta U_a + \Delta U_p,$$

където ΔU_p са загубите на напрежение, обусловени от реактивната мощност.

Всичко това води до намаляване на пропускателната способност на електропреносни линии и съоръжения, намалява се получаваната от генератори и трансформатори активна мощност при една и съща пълна мощност S (виж.9.1). Затова е необходимо увеличаване на сеченията на въздушните и кабелни линии, увеличаване на номиналната мощност и броя на трансформатори и генератори и т.н., което е свързано с допълнителни капиталовложения.

От всичко казано до тук става ясно, че факторът на мощността има голямо икономическо значение. Проблемът се свежда до начините, мероприятията, средствата, чрез които може да се подобри $\cos\phi$ за система от индуктивни електрически товари. Тези мерки могат да се разделят на две основни групи, в зависимост от това дали се използват или не компенсиращи устройства.

А. Намаляване потреблението на реактивна мощност от консуматорите без използване на компенсиращи устройства

1. Конструктивни мерки - оптимално оразмеряване конструкцията на електрическите съоръжения и качествен ремонт с цел намаляване на намагнитващия ток. Например по-висок $\cos\phi$ имат асинхронните електродвигатели с по-малка въздушна междина между ротора и статора, защото това е свързано с по-малко съпротивление по пътя на магнитния поток на двигателя и следователно, необходим е по-малък намагнитващ ток за създаване и поддържане на този поток.

2. Правилен избор на мощността на асинхронните двигатели и трансформатори - тогава те работят с номиналната си мощност и факторът на мощността е максимален, а коефициентът на полезно действие е голям. Ако товарът им е по-малък от номиналния, трябва да се заменят с двигатели и трансформатори с по-малка мощност, а също в часовете с по-малък товар да се изключват част от хранящите трансформатори.

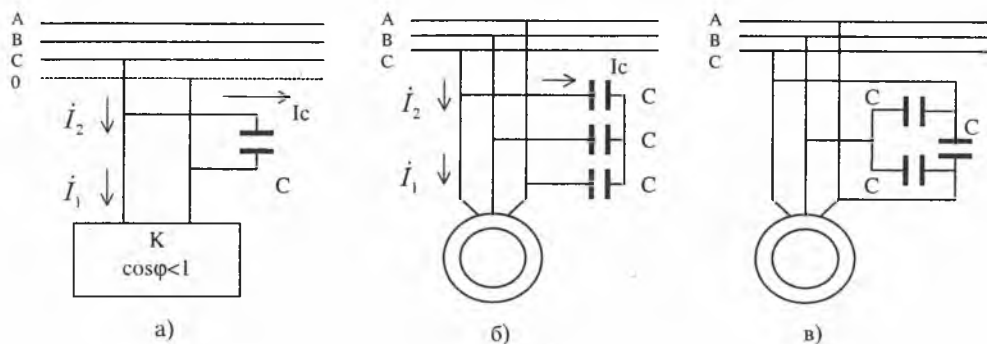
3. Асинхронните двигатели и трансформаторите не трябва да се оставят да работят на празен ход ($P = 0$), тъй като тогава техният $\cos\phi = 0.2 \div 0.3$.

4. Намаляване напрежението на ненатоварени асинхронни двигатели (ако не могат да бъдат заменени с по-маломощни). Осъществява се по различни начини – превключване на статорните намотки от триъгълник в звезда (намалява се три пъти намагнитващия реактивен ток I_L), секциониране на статорните намотки, понижаване на хранящото напрежение чрез превключване на отклоненията на понижаващите трансформатори и др.

Обикновено оптималната стойност на фактора на мощността не може да се получи чрез такива естествени мерки и затова се използват компенсиращи устройства (източници на реактивна мощност) - статични кондензатори, синхронни компенсатори и синхронни двигатели. Чрез тях се генерира реактивна мощност непосредствено до консуматорите ÷ (индуктивните товари). Така хранящите линии се разтоварват от реактивните токове и загубите многократно намаляват.

Б. Използване на компенсиращи устройства

1. Кондензаторни батерии. Ако паралелно на електропроводна линия, захранваща консуматор с индуктивен характер (фиг. 9.2а) се включи кондензаторна батерия (капацитивно съпротивление), към двете съставки на общия ток I_1 (фиг. 9.1) се прибавя и тока през кондензатора I_{C_1} . Този капацитивен ток изпреварва захранващото напрежение на ъгъл $\pi/2$ и компенсира част от индуктивната съставка I_{L_1} на тока I_1 . В резултат на това се намалява фазовата разлика φ_2 между новия общ ток в захранващата линия I_2 и захранващото напрежение U ($\varphi_2 < \varphi_1$). Следователно се подобрява факторът на мощността на линията ($\cos\varphi_2 > \cos\varphi_1$).



фиг. 9.2

При това консуматорът ще продължи да получава активна мощност, определена от U , I_1 и φ_1 , както и преди включване на кондензаторната батерия. По захранващата линия обаче от източника до мястото, където е включена кондензаторната батерия, ще се пренася същата активна мощност, но вече с новия ток I_2 и фазов ъгъл φ_2 . Токът през кондензатора I_{C_1} определя реактивната мощност $Q = UI_{C_1} = Q_C$, която поддържа електрическото поле на кондензатора. Получава се обмен на реактивна мощност и енергия между електрическото поле на кондензатора и магнитното поле на индуктивния консуматор. Тъй като кондензаторната батерия е свързана непосредствено до консуматора, захранващата линия се разтоварва от реактивна мощност и $I_2 < I_1$. Така с включване на кондензаторна батерия се подобрява факторът на мощността на захранващите линии и се намаляват загубите в тях.

От възможните три съотношения между реактивните токове: $I_C < I_L$, $I_C = I_L$ и $I_C > I_L$, стремежът е да се подбере $I_C = I_L$ (тогава $\cos\varphi = 1$ и $I = I_R$). Последният случай е нецелесъобразен (прекомпенсиране), защото факторът на мощността ($\cos\varphi_3$) отново се влошава и общият ток по линията нараства ($I_3 > I_R$) - фиг. 9.1.

Стойността на капацитета на кондензаторната батерия, необходим за подобряване фактора на мощността от $\cos\varphi_1$ до $\cos\varphi_2$ в еднофазна линия се изчислява по формулата:

$$C = \frac{P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{\omega U^2}, F \quad (9.2)$$

Тук P - пренасяна активна мощност (W); $\operatorname{tg}\varphi_1$ - стойност, съответстваща на $\cos\varphi_1$ (преди компенсацията); $\operatorname{tg}\varphi_2$ - стойност, съответстваща на $\cos\varphi_2$ (след компенсацията); U - фазно напрежение (V); $\omega = 2\pi f$ - ъглова честота (s^{-1}); f - честота на захранващото напрежение (Hz).

В трифазните електрически мрежи се използват трифазни кондензаторни батерии, свързани в звезда (\bigwedge) (фиг. 9.2б) или в триъгълник (Δ) (фиг. 9.2в). Необходимата стойност на капацитета за една фаза в тези случаи се намира чрез изразите:

$$C_{\bigwedge} = \frac{P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{3\omega U^2} = \frac{P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{\omega U_{\Delta}^2}, F \quad (9.3)$$

$$C_{\Delta} = \frac{P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{3\omega U_{\Delta}^2}, F, \quad (9.4)$$

където $U_{\Delta} = \sqrt{3}U$ е линейното напрежение (V).

Вижда се, че при свързване в триъгълник необходимият капацитет C на фаза е по-малък три пъти от същия капацитет при свързване в звезда. Затова кондензаторните батерии се свързват в триъгълник и се присъединяват към електрическите мрежи най-често към разпределителните табла на ниско напрежение. Обикновено $\cos\varphi$ не се повишава над 0.96, тъй като за повишаването му от 0.96 до 1 капиталните вложения са по-големи от получените в резултат на компенсацията икономии.

2. Синхронен компенсатор. Синхронният компенсатор представлява синхронен двигател, работещ на празен ход и поради липса на механичен товар, конструкцията му е облекчена. Той се включва към мрежата и може да работи в режим на генериране на реактивна мощност (при превъзбуждане) или в режим на консумирането ѝ (при недовъзбуждане). Изменението на големината на генерираната или консумирана реактивна мощност от компенсатора се осъществява чрез изменение на възбудителния му ток. Използването на синхронни компенсатори за подобряване фактора на мощността е икономически изгодно само при големи мощности (над 10 MVA) на крупни подстанции и промишлени предприятия.

3. Синхронни двигатели. В превъзбудено състояние те също работят с капацитивен фактор на мощността, при което не само задвижват някаква работна машина, но и подобряват $\cos\varphi$ на електропреносната мрежа. Прилагат се в следните случаи:

а) Замяна на асинхронни двигатели със синхронни, ако не се нарушават изискванията към задвижването на съответния механизъм.

б) Използване на синхронни двигатели с по-голяма мощност, отколкото изисква задвижвания механизъм.

В заключение трябва да се подчертае, че избора на компенсиращи устройства се провежда при технико-икономическо сравнение на различни варианти.

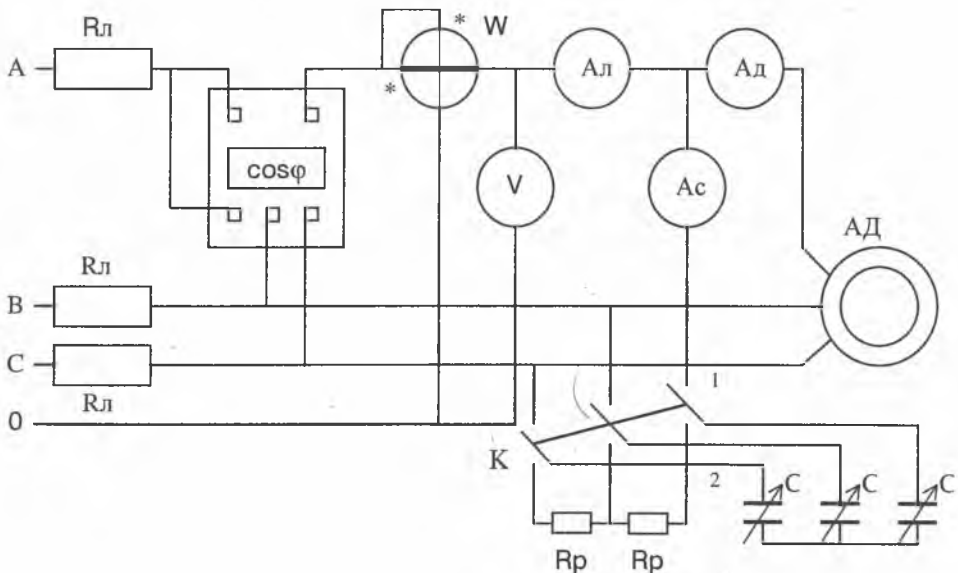
III. РЕД НА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Реализира се схемата, показана на фиг. 9.3. Тук R_L са три товарни съпротивления, които заместват реалните загуби в линията при влошен $\cos\phi$. Трифазната кондензаторна батерия C с регулируеми capacitети се включва паралелно към трифазния асинхронен двигател чрез превключвателя K . В положение 2 на превключвателя, батерията се разрежда през разрядните съпротивления R_p . Амперметърът A_L измерва компенсиращия ток на линията I_L , A_D - тока на двигателя I_D , а A_C - тока на кондензаторната батерия I_C . Трифазният електродинамичен фазомер, градуиран в единици за $\cos\phi$ (косинусфимер) показва фактора на мощността на линията.

2. При изключена кондензаторна батерия се включва двигателят. От показанията на уреда се изчислява естественият $\cos\phi$, с който работи двигателят:

$$\cos \phi_{\text{дв}} = \frac{P_1}{U I_D},$$

където P_1 е отчетената мощност от ватметъра за една фаза. Изчислява се и необходимият капацитет за пълно компенсиране на $\cos\phi_{\text{дв}}$ (до $\cos\phi = 1$) по (9.3), като се има предвид (9.1), че $P = 3P_1$.



фиг. 9.3

3. Включва се кондензаторната батерия, като на капацитета се задават стойности 20%, 40%, ..., 100% от изчислената в т.2. При всяка стойност на C се отчитат и записват показанията на уредите в табл. 9.1. Тъй като двигателят работи в режим на празен ход, може да се смята, че активната мощност остава постоянна ($P = \text{const}$).

Таблица 9.1

№	Отчетени величини							Изчислени величини			
	C	f	U	P_1	I_l	I_d	I_c	P	$P_{\text{заг.л}}$	η_l	$\cos\varphi_l$
	μF	Hz	V	W	A	A	A	W	W	-	-
1.									-		

4. По отчетените опитни данни се изчисляват:

а) Консумираната мощност от асинхронния двигател: $P = 3 P_1$;

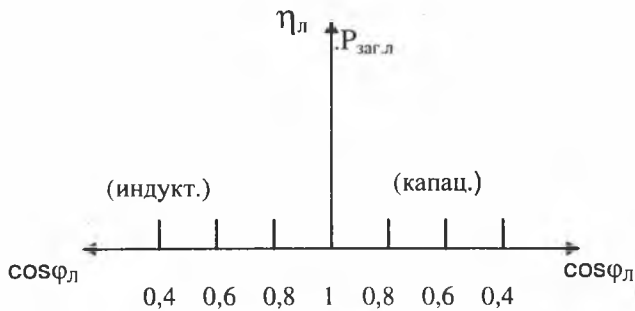
б) Загубите на мощност в електропреносната линия: $P_{\text{заг.л}} = 3 R_l I_\Lambda^2$;

в) Коефициентът на полезно действие на линията: $\eta_l = \frac{P}{P + P_{\text{заг.л}}}$;

г) Факторът на мощността на линията при всеки опит: $\cos\varphi = \frac{P_1}{U I_\Lambda}$. Стойно-

стите на така изчислените величини се нанасят в табл. 9.1.

5. Построяват се графично зависимостите $I_l = f(C)$ и $\cos\varphi_l = f(C)$. На отделна координатна система (фиг. 9.4) се построяват кривите $P_{\text{заг.л}} = f(\cos\varphi_l)$ и $\eta_l = f(\cos\varphi_l)$.



фиг. 9.4

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Какво представлява проблемът $\cos \varphi$?
2. С какви мероприятия се повишава $\cos \varphi$ в захранващата ел. мрежа?
3. С какви средства могат да се компенсират реактивните товари и да се подобри $\cos \varphi$?
4. Как се изчислява стойността на капацитета на кондензаторна батерия, необходима за подобряване на $\cos \varphi$ на дадена електропреносна линия?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №10

ИЗСЛЕДВАНЕ ДЕЙСТВИЕТО НА ТОКОИЗПРАВИТЕЛНИ СХЕМИ И ИЗГЛАЖДАЩИ ФИЛТРИ

I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА.

1. Запознаване с действието на различни видове токоизправителни схеми.
2. Запознаване с действието на индуктивен, капацитивен и многоелементен филтър.
3. Експериментална проверка на характерни електрически величини и съотношения при токоизправителните схеми.
4. Опитно изследване на действието на индуктивен, капацитивен и "П-образен филтър.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

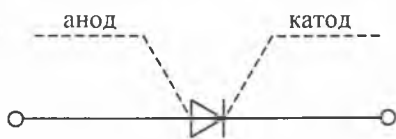
ТОКОИЗПРАВИТЕЛНИ СХЕМИ

Съвременните радиоелектронни устройства представляват сложно съчетание от електронни и полупроводникови елементи, резистори, кондензатори, бобини и други спомагателни елементи. За работа на активните елементи на устройствата - лампите, транзисторите и интегралните схеми - е необходимо захранване на апаратурата както с постоянен, така и с променлив ток. Устройствата, които осигуряват необходимите напрежения, се наричат токозахранващи устройства. Преобразуването на променливото мрежово напрежение в постоянно напрежение се извършва от токоизправителни схеми, които са съставна част от токозахранващите устройства.

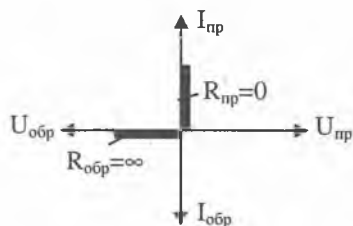
Токоизправителните схеми се състоят от един или няколко електрически елемента, на които съпротивлението в посока на протичане на тока /права посока / е многократно по-малко от това в обратна. Такова свойство притежават електровакуумните двуелектродни лампи /наричани още кенотрони/, газонапълнените лампи /газотрони, тиратрони, игнитрони, екситрони/, полупроводниковите елементи /германиеви и силициеви диоди, селенови и медноокисни клетки, тиристоры/. Ламповите елементи понастоящем не се вграждат в нови разработки и имат историческо значение. В електрическите схеми изброените токоизправителни елементи се обозначават със знака показан на фиг. 10.1. Волт - амперната характеристика на един токоизправителен елемент с идеални свойства е дадена на фиг. 10.2: съпротивлението в посока на пропускане е нула, а в обратна посока е с безкрайно голяма стойност.

При мощни промишлени електронни устройства или мощни консуматори на постоянноотокова електроенергия се прилагат трифазни схеми на токоизправителни устройства.

При токозахранващите устройства, предназначени за маломощни радиоелектронни устройства, най-често се използват следните три еднофазни токоизправителни схеми.



фиг. 10.1

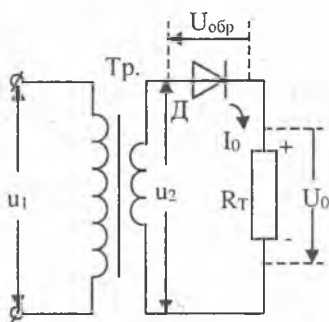


фиг. 10.2

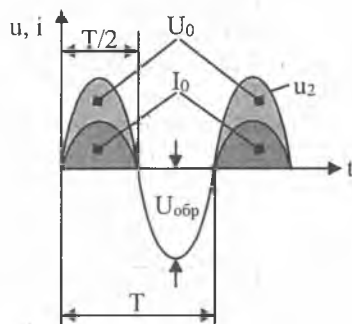
1. Еднотактна еднофазна токоизправителна схема

Тази схема се изгражда само с един токоизправителен елемент. През него и товара на схемата протича ток само в продължение на едната половина на периода на променливото вторично напрежение на мрежовия трансформатор Тр /фиг.10.3 /, когато анодът на изправителния елемент е положителен спрямо катода. Затова схемата се нарича още “еднополупериодна”.

От графиките на изправените напрежения U_0 и ток I_0 (фиг.10.4) е ясно, че тези величини имат пулсиращ характер, като за интервали от време, равни на половин период, ток не протича през товарния резистор R_T .



фиг. 10.3



фиг. 10.4

При синусоидално напрежение на вторичната страна на трансформатора са валидни съотношенията:

$$I_0 = \frac{U_0}{R_T} = \frac{I_{cp}}{2} = 0,318 \cdot I_{2m}; \quad U_{обр} = U_{2m};$$

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_{2m} \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0,45 \cdot U_2;$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_{2m}^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot dt} = \frac{I_{2m}}{2} = 1,57 \cdot I_0$$

Тук означенията имат следния смисъл:

U_0 - постоянна съставна на изправеното напрежение,

I_0 - постоянна съставна на изправения ток,

U_{2m} , U_2 - амплитудна (максимална) и ефективна стойност на вторичното напрежение на трансформатора,

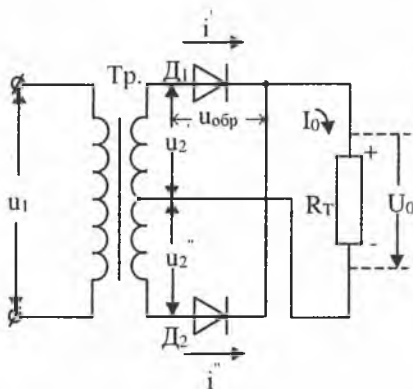
I_{2m} , I_2 - амплитудна (максимална) и ефективна стойност на вторичния ток на трансформатора,

$U_{обр}$ - максимално обратно напрежение, което действа върху токоизправителния елемент в момент на непропускане.

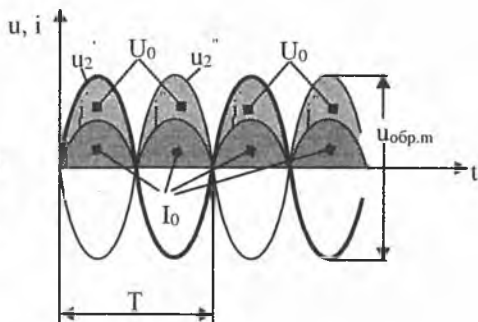
Еднотактната изправителна схема се използва при малки мощности, поради необходимостта от по-големи габарити на захранващия трансформатор в сравнение с другите изправителни схеми при необходимост от получаване на еднакви параметри на изправената електроенергия.

2. Двуполупериодна схема със среден извод от вторичната намотка на захранващия трансформатор

При тази схема (фиг. 10.5) вторичната намотка на трансформатора има две намотки, в които спрямо тяхната обща точка (средната точка) действуват напрежения с фазова разлика π . Поради това тя се нарича още двуфазна изправителна схема. През всяка от двете вторични намотки и свързания към единия техен край съответен изправителен елемент протичат токови импулси през времето на положителната полу-вълна за съответната фаза (фиг. 10.6). Тъй като напреженията на съответните два анода се намират в противофаза, когато провежда ток елементът (например полупроводников диод) D_1 , елементът D_2 е в запушено състояние и обратно. Токът през товара R_T протича в една посока и е пулсиращ, като стойността му варира между нула и максималната стойност I_{2m} .



фиг. 10.5



фиг. 10.6

Някои основни съотношения на характерните електрически величини се извеждат при синусоидално вторично напрежение (тук с U_2 е означено напрежението между средната точка и единия край на вторичната намотка на трансформатора):

$$U_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{2}{\pi} U_{2m} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} \cdot U_2 = 0,9 \cdot U_2;$$

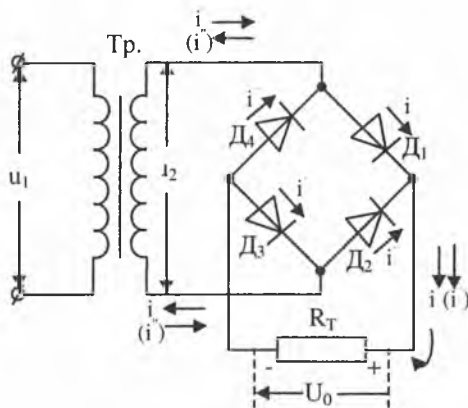
$$I_0 = I_{cp} = 0,639 \cdot I_{2m}; \quad I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_{2m}^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot dt} = \frac{I_{2m}}{2} = 0,78 \cdot I_0.$$

Смисълът на отделните означения бе пояснен при предната схема.

Тази схема има недостатъка, че максималното обратно напрежение се получава равно на удвоената максимална стойност на фазовото напрежение: $U_{обр} = 2 \cdot U_{2m}$. Това се дължи на факта, че отпушеният в даден момент диод включва другият непроводящ в този момент диод към цялата вторична намотка. Затова при дадена стойност на постоянната съставка на изправеното напрежение тази схема, както и еднотактната изправителна схема, изискват използването на изправителни елементи, които издържат двойно по-високо напрежение в сравнение със следващата разглеждана схема - мостовата токоизправителна схема. Освен това конструкцията на трансформатора е по - сложна, което представлява допълнителен недостатък.

2. Еднофазна мостова токоизправителна схема

Тази схема (фиг. 10.7) спада към двуполупериодните токоизправителни схеми. Съставена е от четири токоизправителни елемента - диодите D_1 , D_2 , D_3 и D_4 , които са включени във верига, която поради вида на конфигурацията си се нарича "мостова". В единия диагонал на моста е включена вторичната намотка на мрежовия трансформатор Tr , а в другия - товарния резистор R_T .



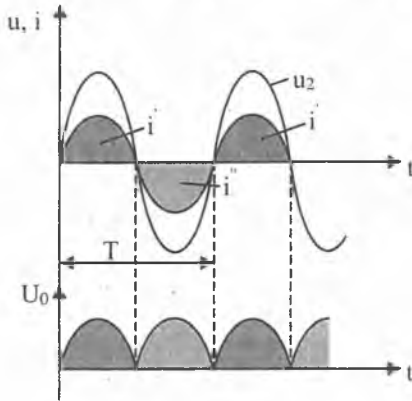
фиг. 10.7

През единия полупериод на променливото напрежение ток протича през диода D_1 , товарния резистор R_T и диода D_3 . Този ток е означен на фиг. 10.7 с I' . През следващия полупериод на напрежението ток протича през диода D_2 , товарния резистор R_T и диода D_4 (токът I''). Изправителният ефект на схемата се изразява в протичането на токови импулси през товара в една и съща посока и е илюстриран на фиг. 10.8. Съот-

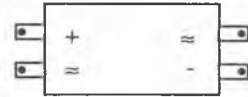
ношенията между характерните електрически величини, които имат възприетите при предната схема означения, са следните:

$$U_0 = 0,9 U_2; I_0 = I_{cp} = 0,639 I_{2m}; U_{обр} = U_{2m};$$

$$I_2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{2m}^2 \sin^2 \omega t \cdot dt = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{I_0}{0,639 \cdot \sqrt{2}} = 1,11 \cdot I_0$$



фиг. 10.8



фиг. 10.9

Мостовата еднофазна токоизправителна схема е една от най-често употребяваните поради факта, че обратното напрежение върху диодите е с двойно по-малка стойност при едно и също изправено напрежение в сравнение с предишните две схеми, ток протича и през двете полува̀лни, трансформаторът е с проста конструкция. Като недостатък може да се посочи наличието на голям брой токоизправителни елементи. С усъвършенствването на тяхната технология на производство, което понижава себестойността им, този факт има все по-малка значимост.

За улесняване реализацията на токозахранващото устройство тази схема се произвежда и в интегрален вид (фиг. 10.9). От корпуса, в който е монтирана мостовата схема, се извеждат четири присъединителни клеми - две за променливо напрежение (означени със знака ~) и две за изправеното напрежение (съответно + и -).

ИЗГЛАЖДАЩИ ФИЛТРИ

При изправяне на променливото напрежение по коя да е от токоизправителните схеми на изхода се получава пулсиращо напрежение, което съдържа постоянна и променливи съставни. Променливите съставни, на които се дължат пулсациите на изправеното напрежение, при пропускане в захранваната апаратура, създават смущения в нейната работа. Например, при нискочестотните усилватели предназначени за озвучаване, тези съставни се усилват и във високоговорителя се проявяват като непрекъснат тон ("брум") с честота 50 Hz или 100 Hz в зависимост от вида на използваната за захранване изправителна схема.

За намаляване на променливите съставни, т.е. на пулсациите, между изхода на токоизправителната схема и консуматора се поставя филтър. Неговото предназначение е да подаде към захранваното електронно устройство само постоянната съставна на изправеното напрежение, а всички променливи съставни да бъдат "отсети". Количествено степента на пулсации на изправеното напрежение се оценява с коефициент на пулсациите, който представлява отношението на максималната стойност на първата (основната) променлива съставка U_{1max} към средната стойност U_0 на изправеното напрежение (постоянната съставна):

$$q = \frac{U_{1m}}{U_0}$$

Различните електроапаратури предявяват различни изисквания към захранващите ги устройства по отношение големината на коефициента на пулсации /табл. 1/.

Таблица 1

Вид на захранваното устройство (консуматора)	Допустима стойност на коефициента q
1. Микрофонен предусилвател	0,0001
2. Междинни стъпала на нискочестотни усилватели	0,01 - 0,1
3. Изходящи стъпала на нискочестотни усилватели	0,1 - 0,5
4. Електромагнитни релета	2,0
5. Двигател за постоянен ток /мощност до 20 W/	5,0

В практиката се използват дроселно - кондензаторни /L - C/ филтри и резисторно - кондензаторни /R - C/ филтри. Те се изграждат от елементи, които самостоятелно не могат да осигурят необходимата филтрация: дросели (бобини със желязна сърцевина) и кондензатори с голям капацитет.

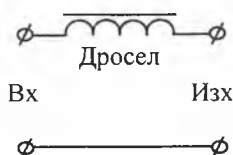
Филтърът, включващ в схемата си само един дросел, се нарича "L" – филтър (фиг. 10.10). Действието му се основава на закона за електромагнитната индукция. Протичащата през бобината на дросела променлива съставна на изправния ток създава в магнитопровода на бобината променлив магнитен поток. Последния индукира в бобината на дросела е.д.н. на самоиндукция, което съгласно правилото на Ленц е такъв знак, че намалява големината на променливите съставки на изхода на филтъра.

Филтриращото действие на "C" филтъра (фиг. 10.11) се дължи на различните времена за зареждане и разреждане на кондензатора, като първото е по-малко от второто. В резултат кондензаторът бързо се зарежда, а по-продължително време отдава енергията си на товара, като с това компенсира значително създаваните от токоизправителната схема пулсации.

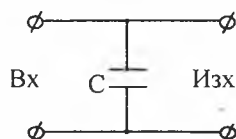
Формалното обяснение на горните явления се основава на честотната зависимост на реактивните съпротивления на бобината и кондензатора:

$$X_L = \omega L; \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

За променливите съставни последователно включената бобина (фиг. 10.10) има индуктивно съпротивление, което е право пропорционално на честотата им и отслабва влиянието им на изхода на филтъра. Капацитивното съпротивление с повишаване на честотата намалява и тъй като кондензаторът се включва паралелно, когато играе роля на "С" - филтър (фиг. 10.11), то той оказва шунтиращо влияние върху променливите съставни по отношение на товара.



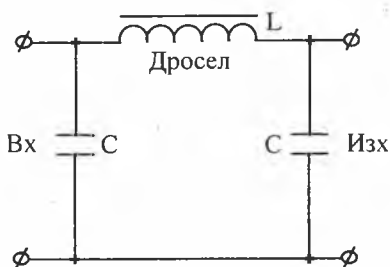
фиг. 10.10



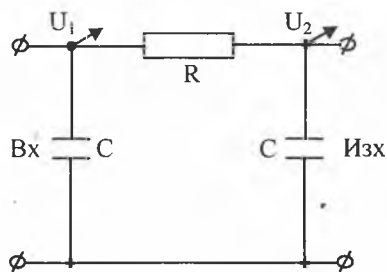
фиг. 10.11

Значително по - голяма ефективност притежава "С - L - С" - филтъра, при който се използват два кондензатора и една бобина. Неговата схема е дадена на фиг. 10.12. Възможно е на мястото на бобината в "С - L - С" филтъра да се свърже резистор, което значително намалява размерите на филтъра и неговата себестойност (дроселите са около двадесет пъти по - скъпи елементи от резисторите, поради по - сложната технология на изработката им).

Полученият "С - R - С" филтър (фиг. 10.13) се използва в маломощни устройства, в които изправеният ток е с малка стойност и напрежителният пад, който се получава върху резистора R не е голям. Използува се още в случаите, когато едновременно с изглаждане на напрежението трябва да се понижи и неговата стойност (при многостъпалните усилватели). Филтриращото действие на този филтър е по - слабо.



фиг. 10.12

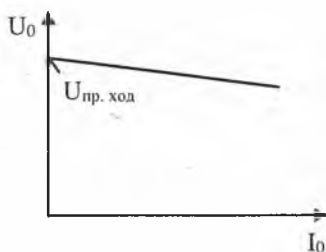


фиг. 10.13

Ефективността на изглаждащите филтри се оценява количествено с коефициент на изглаждане на пулсациите $K_{изгл}$. Той се дефинира като отношение на коефициента на пулсации без филтър и коефициента на пулсации с филтър:

$$K_{изгл} = \frac{q_{без\ филтър}}{q_{с\ филтър}}$$

Зависимостта на изправеното напрежение от изправения (товарен) ток е основна характеристика на всяко токозахранващо устройство и се нарича външна характеристика: $U_0 = F(I_0)$ (фиг. 10.14). Намалението на напрежението на изхода на токоизправителя с увеличение на консумирания от него ток се дължи на нарастването на напрежителния пад в съпротивлението на вторичната намотка на трансформатора, в съпротивлението в посока на пропускане на изправителните елементи и в съпротивлението на последователно включеното рамо на изглаждащия филтър (дросел или резистор). Напрежението на изхода се нарича напрежение на празен ход (U_0 пр.х.) когато товарният ток има нулева стойност (товарът е изключен).



фиг. 10.14

III. РЕД ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Свързват се необходимите измервателни уреди към предоставения лабораторен макет. За измерване на амплитудата на променливите съставки, необходими за изчисляване на коефициента на пулсации при различните схеми, се използва електронен волтметър, който е предназначен за измерване на променливи напрежения в рамките на определен честотен диапазон. Да се има предвид, че електронните волтметри обикновено са градуирани в ефективни стойности.

2. С помощта на ключетата от макета последователно се реализират еднотактна, двутактна със средна точка и мостова токоизправителна схема. Отчитат се показанията на измервателните уреди, които се нанасят в таблица 2, след което се извършват необходимите изчисления. От екрана на осцилоскопа се пречертават осцилограмите, които се прилагат към протокола на лабораторната работа. Стойностите на обратните напрежения се измерват с помощта на калибрираното усилване на вертикалния усилвател на осцилоскопа, чийто вход "У" се превключва за целта към клемите на макета, означени с буквите "у - у".

3. Чрез превключване на ключетата от макета се реализират различни видове изглаждащи филтри, в съответствие с втората колона на таблица 3. Изчислява се коефициентът на изглаждане на пулсациите за различните филтри. С осцилоскопа се наблюдава ефективността от тяхното действие, като осцилограмите се пречертават и се прилагат към протокола.

Таблица 2

№	Вид на схемата	I_2 , mA	U_2 , V	I_0 , mA	U_0 , V	I_2/I_0	U_0/U_2	$U_{0\text{обр}}$	Осцилограми
1	Еднотакта								
2	Двухтактна (със средна точка)								
3	Мостова								

Таблица 3

Вид на схема	Вид на филтъра	U_0 без филтър	$U_{I\text{max}}$ без филтър	q без филтър	U_0 с филтър	$U_{I\text{max}}$ с филтър	q с филтър	К	Осцилограма
		V	V	-	V	V	-		
Еднотактна	L C L-C C-L-C								
Двухтактна	L C L-C C-L-C								

4. Снема се товарната характеристика на мостова токоизправителна схема при включен "С - L - С" филтър. За целта, чрез промяна на стойността на товарния резистор се задават посочените в таблица 4 стойности на товарния ток. Графично се построява получената товарна характеристика (фиг. 10.14).

Таблица 4

U_0	V							
I_0	mA	0	40	60	80	100	120	140

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Каква е честотата на пулсациите на трите разгледани в упражнението токоизправителни схеми?
2. При коя от схемите с един и същ филтър ще се получи по-ефективно изглаждане на пулсациите (ще се получи по-малък коефициент на пулсации)?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 11

ИЗСЛЕДВАНЕ ДЕЙСТВИЕТО НА УПРАВЛЯЕМИ ТОКОИЗПРАВИТЕЛНИ СХЕМИ

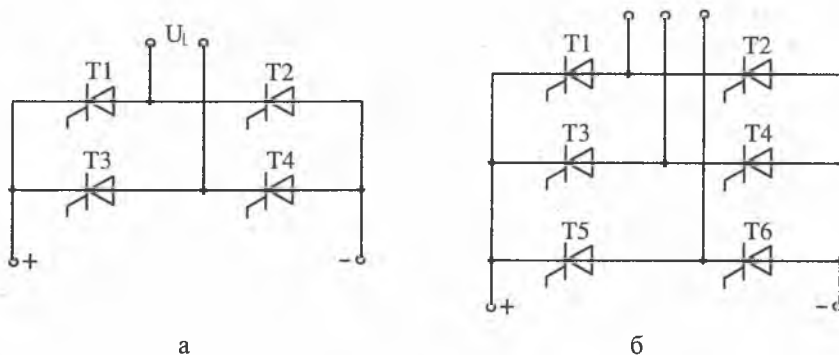
I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Да се разучи функционирането на тиристора като ключ и като управляем токоизправителен елемент.
2. Да се разучи действието на еднофазни и трифазни мостови полууправляеми и напълноуправляеми токоизправителни схеми.
3. Да се разучи блоковата схема на управляващото импулсно устройство.
4. Да се снемат опитно зависимостта на изправеното напрежение от ъгъла на отпушване. Зависимостта да се представи графично.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

Всяка токоизправителна схема може да бъде преобразувана в управляема, ако всички, или част от диодите се заменят с управляеми токоизправителни елементи (тиристори). На фиг. 11.1 а и б са показани съответно еднофазна и трифазна мостови управляеми токоизправителни схеми, в които всички диоди са заменени с тиристори. На фиг.11.2 а и б са показани същите схеми, в които само половината от диодите са заменени с тиристори.

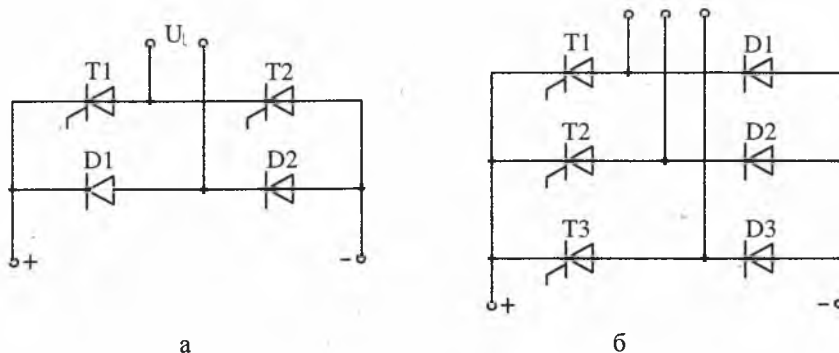
Схемите от фиг. 11.1 се наричат напълно управляеми, а схемите от фиг.11.2 - полууправляеми мостови схеми. Независимо от наименованието и четирите схеми позволяват плавно изменение на изправеното напрежение практически от нула до една максимална стойност, която, за всяка схема е равна на изправеното напрежение, което би се получило, ако схемата е неуправляема.



фиг. 11.1

Полууправляемите схеми са по-икономични заради по-малкия брой тиристори и по-опростените схеми за управление. Напълноуправляемите схеми имат свои пре-

димства, едно от които е възможността за по-бързо изменение на изправения ток при индуктивен товар. Това бързодействие може да се окаже от съществено значение, ако токоизправителят е включен в система за автоматично управление.



фиг. 11.2

Управляемите токоизправителни схеми имат много висок к.п.д. Те се използват навсякъде, където е необходимо регулируемо постоянно напрежение.

Най-важното им приложение е в регулируемите електрозадвигания с постояннотокови двигатели. Използват се и за регулиране на мощността на електронагреватели, осветление, електролизни вани и др.

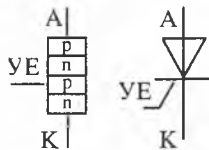
II. ОСНОВНИ СВЕДЕНИЯ ЗА ТИРИСТОРИТЕ

Тиристорът представлява четирислоен полупроводников елемент с PNPN структура и символично означение, показано на фиг. 11.3. То е подобно на това на полупроводников диод, като е прибавен допълнителен извод, наречен управляващ електрод. Ако между управляващия електрод и катода К на тиристора не е подадено напрежение, независимо от полярността на напрежението, подадено между анода А и катода К на тиристора, през него практически не протича ток. В действителност протича един много малък обратен ток, както при диод, на който е подадено обратно напрежение. Поведението на тиристора в този случай е еднакво с това на диоди, свързани последователно и противопосочно.

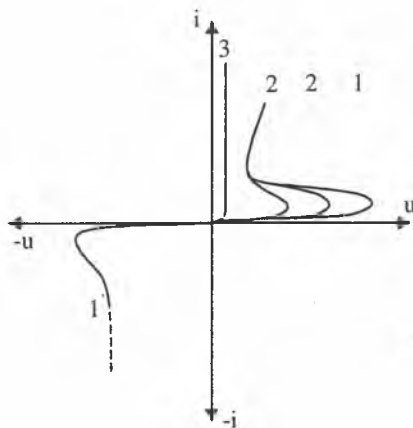
При подаване на положително напрежение на управляващия електрод спрямо катода, през управляващия електрод протича ток, а десният клон на волтамперната характеристика се изменя, както е показано на фиг. 11.4, линии 2.

При достатъчно голямо управляващо напрежение, респ. управляващ ток, десният клон добива вида на характеристика на обикновен диод при включване в права посока (линия 3). В този случай тиристорът има поведение на обикновен диод.

При тиристорите на практика се използват само описаните две крайни състояния. Едното се нарича изключено (тиристорът практически не провежда ток в нито една посока), а другото се нарича включено (тиристорът има поведение на диод и провежда ток само в една посока).



фиг. 11.3



фиг. 11.4

Един път приведен във включено състояние, тиристорът го запазва, независимо от управляващото напрежение. Това позволява управляващото напрежение да се подава във вид на кратки импулси. Големината им трябва да е достатъчна, за да се премине към включено състояние. На практика е необходим импулс с напрежение няколко волта или ток няколко десетки милиампера.

При най-често използваните тиристори преминаването от включено към изключено състояние може да стане само, ако за кратко време се прекъсне токът през тиристора (или се намали под определена критична стойност).

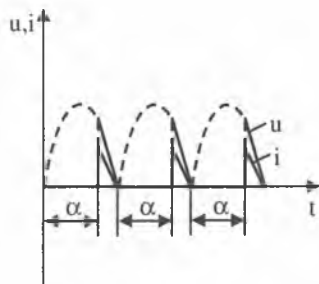
При схеми, захранвани с променливо напрежение, какъвто е случаят при управляемите токоизправители, това става автоматично при преминаване на тока през нула. При схеми, захранвани с постоянно напрежение, изключването на тиристорите представлява технически проблем, който се решава или чрез специални схеми, или чрез използване на специални тиристори, които могат да бъдат изключвани чрез подаване на отрицателно напрежение на управляващия електрод (т.нар. GTO-тиристори - от англ. Gate Turn Off).

III. УПРАВЛЕНИЕ НА ИЗПРАВЕНОТО НАПРЕЖЕНИЕ

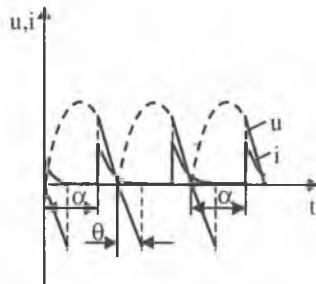
Обикновено тиристорите се управляват чрез подаване на кратки импулси на управляващия електрод с регулируема фаза спрямо началото на съответния полупериод. При това изходното напрежение на мостовата схема от фиг. 11.2,а и токът през товарното съпротивление R_t ще се появят след импулса, включващ съответните тиристори (T1 и T3 или T2 и T4), както е показано на времедиagramата на фиг. 11.5. Включените тиристори ще се изключат в края на полупериода, след като токът стане равен на нула.

Ако товарът е активно индуктивен, токът няма да се анулира в края на полупериода (спомнете си, че при активно индуктивен товар токът изостава по фаза от напрежението) и тиристорите остават включени и след края на полупериода, независимо от това, че напрежението на източника е сменило знака си. Времедиagramите за

този случай са показани на фиг. 11.6. Времето, през което тиристорите остават включени след края на полупериода отговаря на фазов ъгъл θ . При достатъчно голяма индуктивност, тиристорите ще останат включени до подаване на управляващите импулси на другата двойка тиристори, т.е. $\theta = \alpha$. В този случай се казва, че токоизправителят работи в режим на непрекъсната проводимост.



фиг. 11.5



фиг. 11.6

При полууправляемата мостова схема от фиг. 11.2а, независимо от характера на товара, времедиаграмите ще имат вида, показан на фиг. 11.5, тъй като, при отрицателно напрежение след края на полупериода, токът ще продължи да тече, но ще премине през последователно свързаните диоди D1 и D2.

Средната стойност на изправеното напрежение при активен товар и при индуктивен товар, включен към полууправляема мостова схема, се дава от израза:

$$U_{0\alpha} \approx \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{\approx} (1 + \cos \alpha) \approx 0,45 U_{\approx} (1 + \cos \alpha).$$

При индуктивен товар и напълноуправляема мостова схема средното изправено напрежение е функция и на ъгъла θ . В частност, при непрекъсната проводимост ($\theta = \alpha$) формулата е:

$$U_{0\alpha} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{\approx} \cos \alpha \approx 0,9 U_{\approx} \cos \alpha.$$

Управляващите импулси с регулируема фаза могат да бъдат изработени от най-разнообразни управляващи схеми. В лабораторния макет е използвана една от най-популярните схеми. Тя съдържа генератор на линейно изменящо се напрежение, синхронизиран със захранващото синусоидално напрежение (Г, фиг. 11.7), чието изходно напрежение е подадено към единия вход на компаратор К.

Към другия вход на компаратора се подава постоянно напрежение, чиято стойност се регулира ръчно, с помощта на потенциометър Р. Изходното напрежение на компаратора се променя скокообразно при всяко изравняване на напреженията на входовете му. Диференциращата схема Д превръща скокообразното изменение в тесен импулс, който се усилва от транзисторното стъпало Т и, през трансформатора Тр, се подава към управляващия електрод на тиристора. При изменение на стойността на постоянното напрежение се промяна и фазата, при която става изравняването му с

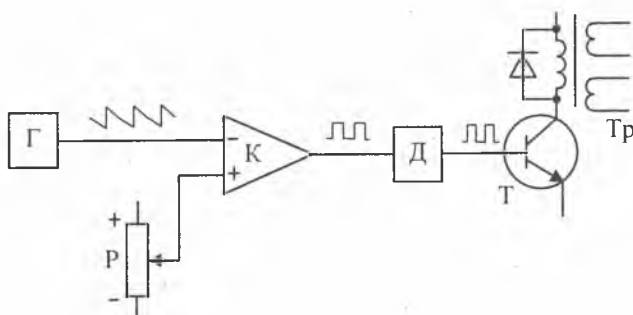
линейно изменящото се напрежение и оттам - фазата на получения управляващ импулс.

III. РЕД ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Да се разучи схемата и принципа на действие на лабораторния модел от фиг. 11.7.
2. Към изходите на схемата на управляемия токоизправител да се свърже електрическа лампа като товарно съпротивление. Да се свържат входните клеми към захранващото напрежение.
3. Чрез свързване на двулъчев осцилоскоп към изхода на генератора на линейно изменящо се напрежение и към регулирания потенциометър се наблюдава изменението на момента, респ. фазата на изравняване на двете напрежения.
4. Чрез свързване на двулъчевия осцилоскоп към изхода на компаратора и импулсния трансформатор се наблюдава скокообразното изменение на напрежението на компаратора и получения при това импулс.
5. Чрез свързване на двулъчевия осцилоскоп към изхода на управляемия токоизправител се наблюдава кривата на изправеното пулсиращо напрежение при различни ъгли на отпушване.
6. Чрез промяна на ъгъла на регулиране през 15 градуса да се снимат напрежението U_0 , тока I_0 , честотата на въртене n на постояннотоков двигател с възбуждане от постоянни магнити. Данните се нанасят в табл. 11.1.
7. Да се построят графично зависимостите $U_0\alpha = f(\alpha)$ и $n = f(\alpha)$.
8. Да се определи к.п.д. на токоизправителя.

Таблица 11.1

№	α	U_1	I_1	U_0	I_0	n	η
	°	V	A	V	A	tr/min	-



фиг. 11.7

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Какви характерни участъци има волтамперната характеристика на тиристора и как се променят те при различни стойности на управляващия ток?
2. Как работи двуполупериодния управляем токоизправител?
3. Как действуват разгледаните мостови управляеми токоизправители?
4. Съществува ли линейност между ъгъла на фазово управление α и средната стойност на изправеното напрежение?
5. Къде се използват управляемите токоизправители?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 12

МНОГОСТЪПАЛЕН НИСКОЧЕСТОТЕН УСИЛВАТЕЛ - ПОЛУЧАВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА АМПЛИТУДНО-ЧЕСТОТНАТА ХАРАКТЕРИСТИКА

I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Запознаване с принципната схема на многостъпален нискочестотен усилвател.
2. Снемане на честотната характеристика на многостъпален нискочестотен усилвател.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

Електронният усилвател представлява устройство, съставено от полупроводникови елементи (биполярни и полеви транзистори, тунелни диоди) и спомагателни елементи (резистори, кондензатори и други), което е предназначено да усилюва електрически сигнали.

Усилвателите намират широко приложение не само в радиосъобщителната техника, но и в различни други области на електрониката. Тези устройства служат за усиляване на много слаби сигнали при измерването на неелектрически величини по електричен път и са основен градивен елемент на различни автоматични устройства и пр.

На фиг. 12.1 е показано в блоков вид усилвателно устройство, в което усилвателният елемент е транзистор.

Източникът на сигнала (1), който предстои да бъде усилен, може да бъде някакъв преобразувател (датчик) на неелектрическа величина, която се измерва или регулира - фотоелемент, термоелемент, индуктивен, капацитивен или резисторен датчик.

Консуматорът на усилената енергия (3) представлява измервателен или регистриращ (пищещ) уред, изпълнителен орган на регулатор, намотка на електромагнитно реле или на електродвигател, бобинката на високоговорител и т.н.

Източникът на захранване (2) доставя енергия, която усилвателят (4) преобразува в енергия на усилените сигнали.

Широкото приложение на усилвателите е предпоставка за голямото разнообразие на тези устройства, поради което съществуват различни начини на систематизирането им. Някои от признаците, по които най-често биват класифицирани са следните:

1. Според вида на параметъра на усиления електрически сигнал:
 - а - усилвател на напрежение.
 - б - усилвател на ток.
 - в - усилвател на мощност.
2. Според честотния диапазон на сигналите, които се усилят:
 - а - постояннотокови усилватели - честотният диапазон се намира между долна гранична честота $f_1 = 0$ Hz и горна гранична честота, която се движи най-често

от 50-100 Hz до няколко десетки kHz. Намират приложение в промишлената електроника, изчислителната и измервателна техника.

б - нискофреkwотни усилватели - честотния диапазон при тази група усилватели е от $f_1 = 16 \text{ Hz}$ до $f_2 = 20000 \text{ Hz}$. Първоначално са служели само за усилване на звукови сигнали (човешкото ухо реагира на трептения в посочения честотен диапазон). Понастоящем нискофреkwотните усилватели намират широко приложение и в автоматиката и телемеханиката.

в - високофреkwотни усилватели - работят при фиксирана честота или тясна честотна лента в областта на високите честоти (например 460 kHz; 10,7 MHz и т.н.).

г - широколентови усилватели: $f_1 = 20$ до 50 Hz , а $f_2 =$ от 3 до 10 MHz.

С разширяващото се напоследък използване на спътници в областта на далекосъобщителната техника честотните диапазони на работа на усилвателите се разшириха и изместиха в областта на високите честоти (няколко десетки гигагерца).

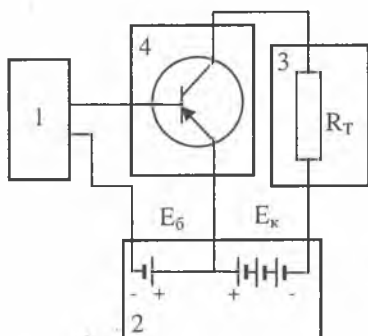
3. Според вида на връзката между отделните усилвателни стъпала на многостъпалните усилватели:

а - "RC-усилватели" са усилвателите, при които сигнала се прехвърля между отделните усилвателни стъпала с помощта на резисторно-кондензаторна връзка.

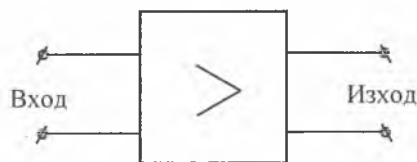
б - трансформаторни усилватели - при тях входната верига на дадено усилвателно стъпало (или товарния резистор) се свързва с изходната верига на предишното стъпало с помощта на трансформатор.

в - усилватели с директна (гальванична) връзка - тази връзка се използва при постояннотоковите усилватели.

В блоковите схеми на електронните апаратури усилвателите се обозначават така, както е показано на фиг. 12.2.



фиг. 12.1



фиг. 12.2

За оценяване работата на един усилвател и пригодността му за работа в определена област на техниката се използват негови качествени показатели, по-съществени от които са:

1. *Коефициент на усилване.* Той представлява число, равно на отношението на изходната към входната величина. При синусоидален сигнал на входа на усилвателя

се дефинират коефициенти на усилване по напрежение K_U , по ток K_I и по мощност K_P по следния начин:

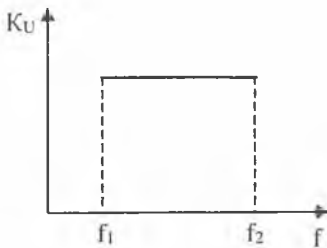
$$K_U = \frac{U_{\text{ИЗХ}}}{U_{\text{ВХ}}}; \quad K_I = \frac{I_{\text{ИЗХ}}}{I_{\text{ВХ}}}; \quad K_P = \frac{P_{\text{ИЗХ}}}{P_{\text{ВХ}}}.$$

Коефициентите на усилване по напрежение и ток представляват комплексни величини.

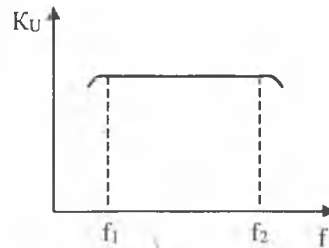
Тъй като първоначално усилвателите са се използвали като нискочестотни, а звуковото възприятие на човека за сила на звука е пропорционално на логаритъма на изменението на звуковото налягане, е прието коефициентите на усилване по напрежение и поток да се изразяват с логаритмични единици. Те се наричат "децибели" и се определят по формулата:

$$K_{U(I)}, \text{ dB} = 20 \cdot \lg /K_{U(I)}/.$$

2. *Честотна характеристика* на усилвателя се нарича зависимостта на модула на коефициента на усилване по напрежение K от честотата: $K_U = F(f)$. Идеалната честотна характеристика на един усилвател има вида, показан на фиг. 12.3. Честотите f_1 и f_2 определят работния честотен обхват на усилвателя. Поради наличието на реактивни елементи в схемите на усилвателите (кондензатори и бобини), чийто съпротивления зависят от честотата, в реалните честотни характеристики съществува спадане в областта на ниските и високите честоти (фиг. 12.4). За това допринася и честотната зависимост на коефициента на усилване на използваните активни усилвателни елементи (транзисторите).



фиг. 12.3



фиг. 12.4

3. *Коефициент на нелинейни изкривявания.* Той представлява количествена оценка за внасяните от усилвателя промени във формата на усилвания сигнал. Този ефект се дължи на съществуването на нелинейни участъци на динамичните характеристики на усилвателните елементи. Изчислява се по формулата:

$$v = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2}}.$$

При качествените усилватели този коефициент е по-малък от 1%. В горния израз U_1 е ефективната стойност на първата хармонична съставка на изходния сигнал, а U_2, U_3, \dots, U_n са ефективните стойности на съответните висши хармонични съставки, които са възникнали в усиления сигнал поради изкривяване от усилвателя на формата на входния сигнал.

4. *Коефициент на полезно действие.* Тази величина се изчислява по следната формулата, в която $P_0 = E \cdot I_0$ е мощността, която се изразходва от всички токоизточници в схемата, а $P_{\text{изх.}}$ е активната мощност, отделена върху товара на усилвателя:

$$\eta = \frac{P_{\text{изх.}}}{P_0}$$

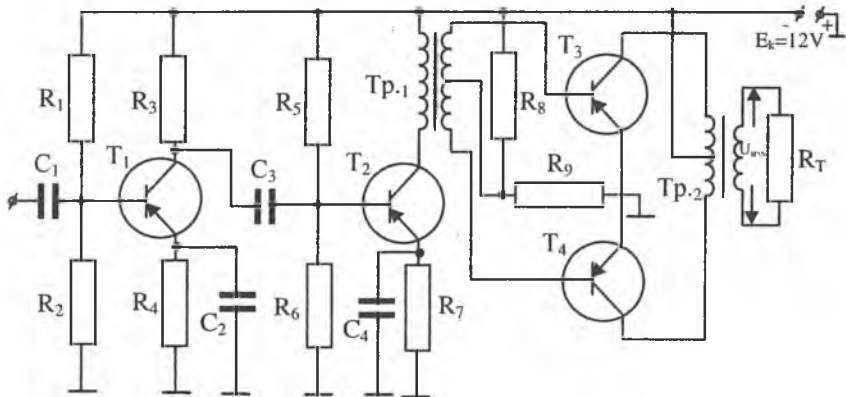
В горния израз $P_{\text{изх.}}$ се изчислява от израза:

$$P_{\text{изх.}} = \frac{U_{\text{изх. max}}^2}{2R_T}$$

където $U_{\text{изх. max}}$ е амплитудата на изходното напрежение, а R_T е товарният резистор.

III. РЕД ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

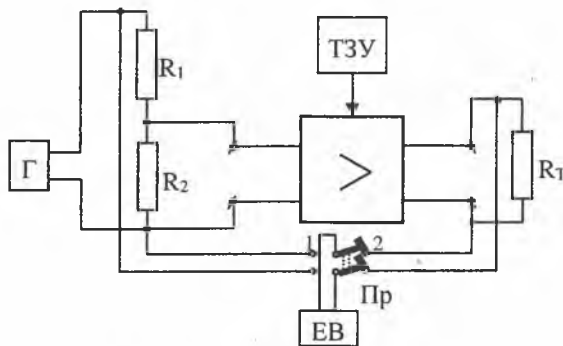
1. Разучава се схемата на лабораторния макет (фиг. 12.5) и се обяснява предназначението на отделните елементи.



фиг. 12.5

2. Свързва се блоковата схема от фиг. 12.6, предназначена за изследване хода на честотната характеристика на нискочестотен усилвател. Означенията в схемата имат следния смисъл: Г - генератор на синусоидално напрежение; ЕВ - електронен волтметър; ТЗУ - токозахранващо устройство. Резисторите R_1 и R_2 образуват делител на напрежение, като съпротивленията им са в съотношение $R_1/R_2 = 100$. Включването

им дава възможност електронният волтметър ЕВ да измерва изходното напрежение и по-малкото по стойност входно напрежение в един и същ измервателен обхват. В такъв случай действителната стойност на входното напрежение е 100 пъти по-малка от показанията на уреда, което трябва да се има предвид при изчислението на коефициента на усилване на усилвателя. С превключвателя Пр. волтметърът ЕВ се превключва към входа или изхода на усилвателя.



фиг. 12.6

3. По зададена стойност на изходната мощност $P_{\text{изх}}$ се определя ефективната стойност на изходното напрежение:

$$U_{\text{изх}} = \sqrt{P_{\text{изх}} \cdot R_{\text{T}}}$$

4. Включва се захранването на усилвателя, генератора и електронния волтметър, а превключвателя Пр се поставя в положение 2 за измерване на изходното напрежение.

От генератора се задава входно напрежение с честота $f = 1000 \text{ Hz}$, като постепенно се повишава стойността му от нула до някаква стойност, при която изходното напрежение стане равно на изчисленото в т.3. Превключвателя Пр се превключва в положение 1, при което се отчита напрежението на входа на усилвателя. Това напрежение ($U_{\text{вх}}$) в последствие се поддържа постоянно за различните честоти, при които става изследването.

5. Изчислява се коефициентът на усилване K на усилвателя за честотите, съгласно табл.1, в която се нанасят опитните данни. При всяко измерване входното напрежение ($U_{\text{вх}}$) се поддържа равно на измереното в т.4.

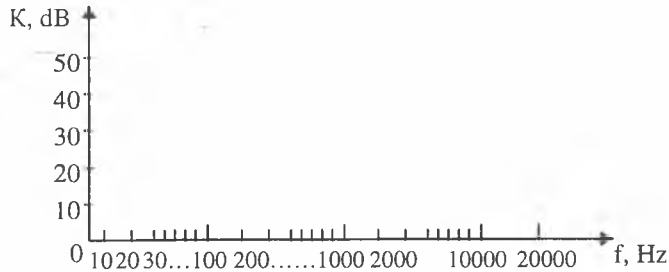
6. Построява се честотната характеристика на изследвания усилвател, като по абсцисната ос се нанасят значенията на честотите в логаритмичен мащаб, който се използва тогава, когато е необходимо да се изобразят графично величини, изменящи се в широки граници. В случая това се налага при нанасяне стойностите на честотите. За целта (фиг. 12.7) по абсцисната ос се нанасят точки на разстояние от началото на координатната система, което е пропорционално на десетичните логаритми на задаваните честоти, а получените точки се обозначават със стойностите на честотите.

Тъй като за нанасяне на коефициента на усилване по ординатната ос се използва линеен мащаб, то координатната система от фиг. 12.7 се нарича полулогаритмична.

$U_{вх} = \dots\dots\dots \text{mV} = \text{const.}$

Таблица 1

f	kHz	0,02	0,07	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	5	10	12	15	16	17	18	19	20	
U _{изх}	V																			
K	-																			
K	dB																			



фиг. 12.7

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Какви са начините за намаляване на нелинейните изкривявания на един усилвател?
2. Какво е предназначението на резисторния делител във входната част на изследвания усилвател от блоковата схема, дадена на фиг. 12.6.
3. Как се извършва градуирането на осите на полулогаритмична и логаритмична координатна система?
4. На какво се дължи различието в хода на честотните характеристики на един идеален и един реален усилвател?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 13

ИЗСЛЕДВАНЕ ДЕЙСТВИЕТО НА ИМПУЛСНИ СХЕМИ -
ТРАНЗИСТОРЕН МУЛТИВИБРАТОР, ДИФЕРЕНЦИРАЩА ВЕРИГА
И ТРАНЗИСТОРЕН ТРИГЕР

I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Разучаване принципа на действие на автогенераторен транзисторен мултивибратор.
2. Изследване на транзисторен мултивибратор. Снемане на осцилограми в различни характерни точки на схемата. Измерване на амплитудата, периода и честотата на изходните сигнали.
3. Разучаване и наблюдаване действието на диференцираща верига.
4. Изследване на транзисторен симетричен тригер. Проверка на методите за управление на симетричния тригер. Измерване на напрежения и токове в характерни точки на схемата. Измерване на амплитудата, периода и честотата на изходните сигнали при управление на тригера чрез общия /броячен/ вход.

II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

1. Автогенераторен транзисторен мултивибратор (М)

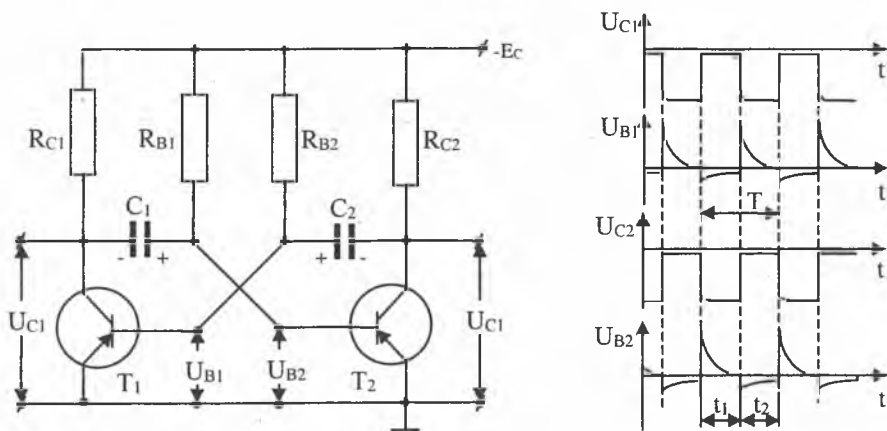
Мултивибраторите са схеми, които генерират правоъгълни импулси. Автогенераторните мултивибратори имат две временно устойчиви състояния. При включване на захранването те преминават непрекъснато от едното в другото състояние и генерират импулси с форма близка до правоъгълната. Те са релаксационни електронни схеми и за тях е характерно наличието на две нива в изходния сигнал, като преминаването от едното в другото се извършва скокообразно.

Транзисторният мултивибратор представлява двустъпален променливотоков усилвател, при който изхода на всяко стъпало е свързан с входа на другото (фиг. 13.1). Така се осъществява силна положителна обратна връзка и условия за самовъзбуждане в различни честоти. Транзисторите работят в ключов режим. Когато елементите в двете стъпала имат еднакви стойности мултивибраторът е симетричен и на изхода му се получават правоъгълни импулси, чиято продължителност е равна на паузата.

При положение, че установеното състояние е транзистора T_1 -запушен а T_2 -наситен в схемата протичат следните процеси:

Кондензаторът C_1 се зарежда с посочения поляритет по следната верига: положителен полюс на източника $+E_c$ /маса/, през прехода В-Е на отпушения транзистор T_2 , кондензатора C_1 , колекторен резистор R_{c1} , отрицателен полюс $-E_c$. В същото време, кондензаторът C_2 , който е бил зареден от предишния етап с посочената на фигурата полярност, се разрежда по веригата: положително заредена плоча на C_2 , базов резистор R_{b2} , отрицателен полюс $-E_c$, отпушения транзистор T_2 , отрицателна плоча на

C_2 . Напрежението на кондензатора C_2 се оказва запушващо за транзистора T_1 и поддържа състоянието на транзистора в положението, в което се намира. След разреждането на кондензатора C_2 , това запушващо напрежение отпада. Транзисторът T_1 има условия за отпушване, понеже базата му е свързана през резистора R_{B2} към отрицателния полюс $-E_c$ /транзисторите са PNP и се отпушват с отрицателно напрежение U_{be} . Положителната обратна връзка разменя състоянието на двата транзистора и T_1 се насища, а T_2 запушва. Тогава кондензатора C_2 започва да се зарежда, а C_1 -разрежда. По-нататък процесите се редуват по описаната последователност.



фиг. 13.1

Продължителността на временно устойчивите състояния се определя с изразите:

$$t_1 = 0,7 \cdot R_{B2} \cdot C_2, \text{ s} \quad t_2 = 0,7 R_{B1} \cdot C_1, \text{ s.} \quad (13.1)$$

Периода на импулсите е:

$$T = t_1 + t_2 = 0,7 (R_{B1} C_1 + R_{B2} C_2), \text{ s} \quad (13.2)$$

Честотата се дава с израза:

$$f = 1/T, \text{ Hz} \quad (13.3)$$

2. Диференцираща верига (ДВ)

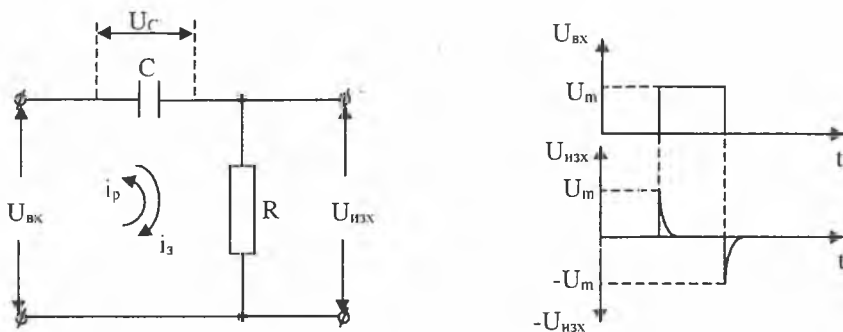
Верига, напрежението на изхода на която е пропорционално на производната на входното, се нарича диференцираща. Нейната схема е показана на фиг. 13.2, както и процесите при подаване, например, на положителен правоъгълен импулс.

При подаване на правоъгълно входно напрежение, тока във веригата нараства със скок, защото кондензаторът C не е зареден и представлява почти късо съединение. Тогава напрежителния пад върху резистора R , т.е. изходното напрежение получава максимална стойност.

След това кондензаторът C започва да се зарежда, зарядния ток намалява и изходното напрежение намалява. Поради това, че времеконстантата, равна на RC е значително по-малка от продължителността на входния правоъгълен импулс, зареждането на кондензатора C завършва преди да е настъпил края на входния импулс и изходното напрежение спада до нула.

При прекратяване на входния импулс, кондензаторът C започва да се разрежда през резистора R с ток, който в първоначалния момент е максимален, а след това намалява експоненциално до нула.

Поради различните посоки на тока на зареждане и тока на разреждане на кондензатора, в изхода се получават разнополярни импулси със стръмен фронт по посока на нарастване на входния сигнал, и заден фронт с експоненциална форма.



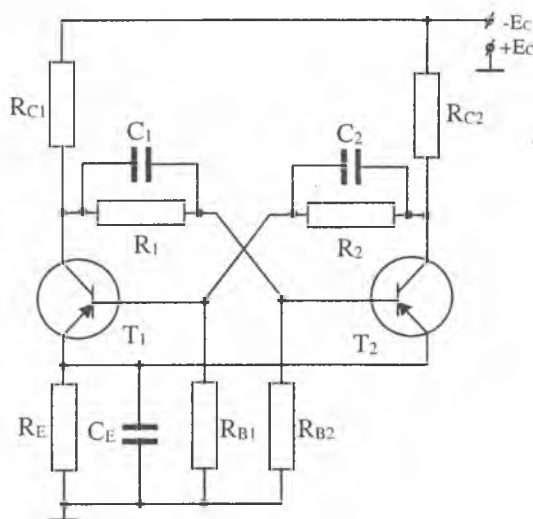
фиг. 13.2

3. Транзисторен симетричен тригер (Т)

Тригерът е електронна схема с две устойчиви състояния, която може да се намира неограничено дълго в едното от тях. Преминва скокообразно от едното устойчиво състояние в другото при определено входно въздействие.

На фиг. 13.3 е показана схемата на симетричен транзисторен тригер с автоматично преднапрежение, създадено от елементите R_c и C_c . Схемата представлява двустъпален постояннооток усилвател с положителна обратна връзка между двете стъпала, осъществена с делителите R_1-R_{b2} и R_2-R_{b1} . Тригерът е симетричен по отношение на елементите. Стойностите на елементите са подбрани така, че във всяко от двете устойчиви състояния, единият транзистор да е наситен, а другият запушен. Преминването от едното състояние, например T_1 -наситен, T_2 -запушен в другото T_1 -запушен, T_2 -наситен се осъществява по следния начин: При постъпване например на положителен външен пусков импулс на базата на отпушения p-n-p транзистор T_1 , последния започва да се запушва и потенциалът на колектора му става по-отрицателен. През резисторния делител R_1-R_{b2} това се предава на базата на транзистора T_2 , което предизвиква неговото отпушване. Потенциалът на колектора на T_2 става положителен. През другия резисторен делител R_2-R_{b1} това изменение се предава на базата на T_1 , което предизвиква неговото по-пълно запушване и съответно по-пълно-

то отпушване на T_2 . Поради силната положителна обратна връзка процесът протича лавинообразно, в резултат на което транзистора T_1 се запушва, а T_2 насища. За да се повиши скоростта на превключване, резисторите R_1 и R_2 се шунтират с кондензатори C_1 и C_2 , наречени ускоряващи. Техните капацитети трябва да бъдат малки, в противен случай тригерът ще се превърне в мултивибратор.



фиг. 13.3

Управлението на тригера може да се осъществи и чрез подаване на отрицателен импулс, предизвикващ отпушване на запушения транзистор, примерно T_2 . Предпочита се обаче първият начин, поради по-висока чувствителност на схемата.

В зависимост от мястото на подаване на управляващите импулси, са възможни два начина за управление на тригера:

а) Разделно пускане:

При подаване на отпушващи импулси на един от входовете, ако съответният транзистор е бил запушен, ще се отпусне от първия импулс. Следващите импулси не променят състоянието на тригера. Възможен е и начина с подаване на запушващи импулси на отпушен транзистор.

б) От броячния вход:

Това е общ вход за двата транзистора, на който се подава поредица от краткотрайни еднополярни импулси. Това предизвиква поредно сменяне състоянието на тригера. Пусковите импулси постъпват на базите и на двата транзистора, но всеки импулс ще действа само на единия транзистор и ще преобръща тригера. За определяне полярността на въздействащите импулси във входните вериги се поставят диоди, които пропускат само положителни или отрицателни импулси.

6. Наблюдават се сигналите на входа и изхода на диференциращата верига.

7. Осъществява се разделно управление на тригера чрез вход 1 и вход 2. Данните се нанасят в табл. 13.2.

Таблица 13.2

състояние	състояние	$U_{вх1}$	$U_{вх2}$	I_{c1}	I_{c2}	$U_{изх1}$	$U_{изх2}$
T1	T2	V	V	mA	mA	V	V
наситен	запушен						
запушен	наситен						

8. При управление на тригера по общия вход, с двулъчев осцилоскоп се измерва периодът, честотата и амплитудата на входните и изходните импулси. Данните се нанасят в табл. 13.3.

Таблица 13.3

$U_{вх3}$	$T_{вх3}$	$f_{вх3}$	$U_{изх m}$	$t_{изх}$	$T_{изх}$	$f_{изх}$	$f_{вх}/f_{изх}$
V	mS	Hz	V	mS	mS	Hz	—

9. Начертават се една под друга времедиаграмите на изхода на мултивибратора, на изхода на диференциращата верига и изхода на тригера. Да се направи извод за съотношението на честотите на входните и изходните импулси.

IV КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Какъв е принципа на действие на транзисторния автогенераторен мултивибратор?
2. Какъв е принципа на действие на диференциращата верига?
3. Какъв е принципа на действие на транзисторния симетричен тригер?
4. Какви са възможните методи за регулиране честотата на мултивибраторите?
5. Какви са начините за управление на симетричния тригер?
6. Кога на изхода на тригера ще се получи поредица от правоъгълни импулси?
7. Кога симетричния тригер се проявява като запомнящо устройство?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 14

ОПЕРАЦИОНЕН УСИЛВАТЕЛ: ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОСНОВНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РАЗУЧАВАНЕ НА НЯКОИ ПРИЛОЖЕНИЯ

I. ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Запознаване с характеристиките на интегрален операционен усилвател.
2. Изследване приложението на операционните усилватели за извършване на математически операции, както и в усилвателни и генераторни схеми.

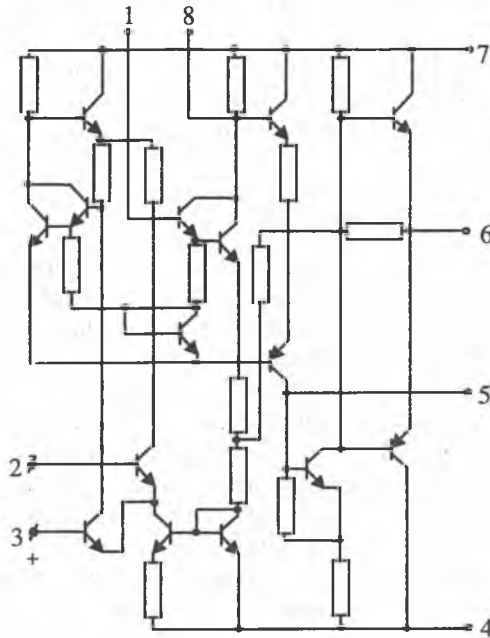
II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

Първоначално тази категория усилватели са били употребявани в аналоговите изчислителни машини за изпълняване на математически операции събиране, изваждане, умножение по константа, интегриране, диференциране, откъдето идва названието им "операционни усилватели". Първите усилватели са били конструирани с електронни лампи, а по-късно – с транзистори. Най-широко разпространение придобиха интегралните операционни усилватели, като тяхната многостранност на приложение е такава, че те се използват във всички области на електрониката. Тези усилватели се прилагат в схемите на формироващите на сигнали, стабилизатори на напрежение, активни филтри, функционални генератори, аналогови паметни, измервателни устройства, аналого-цифрови и цифрово-аналогови преобразуватели, в нискочестотната техника и т.н. Тяхната универсалност се дължи на следния факт. Без обратна връзка операционните усилватели притежават много голям коефициент на усилване (от порядъка на 1 000 000, а при някои видове и повече). Но те се използват с обратна връзка, като усилването им в този случай се редуцира до значително по-малки стойности - в границите от 1 до 100. Това означава, че характеристиките на "обхватният" от обратна връзка усилвател ще се определят от параметрите на елементите на веригата на обратната връзка, а не от използваните в операционния усилвател компоненти. По такъв начин с прилагането на различни обратни връзки (предимно отрицателни по характер) се получават електронни схеми с различни свойства. При това схемите с операционни усилватели се получават с много стабилни и точно определени параметри, тъй като елементите на обратната връзка обикновено са пасивни (резистори, кондензатори, диоди) и могат да се подбират с голяма точност.

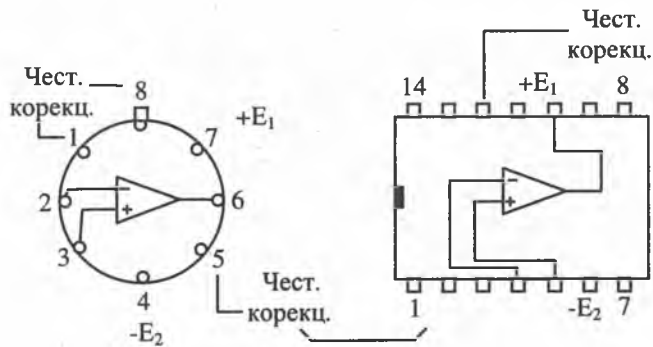
Принципна схема на операционния усилвател 1УО-709 е показана на фиг. 14.1, а на фиг. 14.2 е дадена номерацията на изводите, при метално /А/ и пластмасово/Б/ оформление на интегралната схема ("чипът") на усилвателя.

Първото стъпало представлява диференциална автобалансна схема, затова операционният усилвател е с два входа. При подаване на напрежение на единия вход изходното напрежение се получава с обратен поляритет спрямо входното, поради което този вход се нарича инвертиращ. Входното напрежение, подадено на другия вход, предизвиква промяна на изходното напрежение със същата полярност както и

входното, поради което вторият вход се нарича неинвертиращ. За да може да работи с дуполярни (положителни или отрицателни) изходни напрежения по отношение на общата точка в схемата – "масата" (корпуса на електронната апаратура), операционните усилватели се захранват с две постоянни напрежения: $+E_1$ и $-E_2$. Противоположните им полюси (съответно $-E_1$ и $+E_2$) се свързват към общата точка (масата) на електронната схема, в която се използва операционния усилвател.

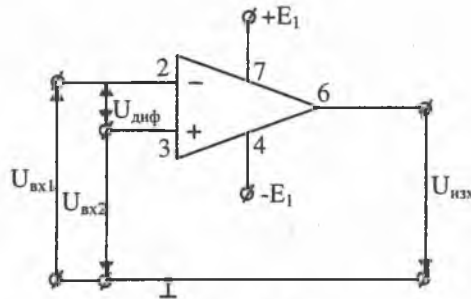


фиг. 14.1



фиг. 14.2

На фиг. 14.3 е дадено означението в схемите на операционен усилвател, като инвертиращият вход е отбелязан със знак (-), а неинвертиращият – с (+).



фиг. 14.3

При съставяне на различни схеми с операционни усилватели се приема, че те притежават параметри, които са характерни за идеален усилвател:

1. Безкрайно голямо усилване.
2. Безкрайно широка честотна лента на усилване, започваща от 0 Hz.
3. Изходно съпротивление равно на нула.
4. Безкрайно голямо входно съпротивление.
5. Напрежение на изхода равно на нула при нулева потенциална разлика на входа (двата входа са свързани накъсо помежду си и спрямо маса).

Реализирането на усилвател с посочените параметри естествено е невъзможно. Така например винаги на изхода на усилвателя се получава остатъчно изходно напрежение при нулева потенциална разлика между входните изводи ($U_{\text{изх.ост.}}$), което се дължи на съществуването на известна несиметрия във входните вериги на схемата. За отразяване на това явление като параметър на операционните усилватели винаги се посочва и стойността на входното напрежение, което е необходимо да се подаде на усилвателя, за да се нулира напрежението $U_{\text{изх.ост.}}$. Този параметър се нарича "входно напрежение на несиметрия" ($U_{\text{вх.нес.}}$).

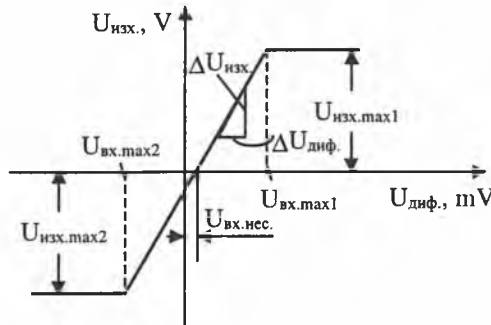
Един от най-важните показатели на операционните усилватели – коефициентът на усилване без обратна връзка K – се определя като отношение на изменението на изходното напрежение $\Delta U_{\text{изх.}}$ и нарастването на напрежението между двата входа $\Delta U_{\text{диф.}}$. Последното се нарича диференциално напрежение: $U_{\text{диф.}} = U_{\text{вх.1}} - U_{\text{вх.2}}$. Този коефициент обикновено се дефинира при постоянен ток и може да се определи от линейната част на амплитудната характеристика на усилвателя: $U_{\text{изх.}} = f(U_{\text{диф.}})$ (при $E_{1,2} = \text{const}$), която е показана на фиг. 14.4:

$$K = \frac{\Delta U_{\text{изх.}}}{\Delta U_{\text{диф.}}} \quad (14.1)$$

Върху характеристиката от фиг. 14.4 са означени и стойностите на максималното изходно напрежение с положителна и отрицателна полярност, както и входното

напрежение на несиметрия $U_{\text{вх.нес.}}$. От израза 14.1 следва и връзката между $U_{\text{вх.нес.}}$ и остатъчното изходно напрежение $U_{\text{изх.ост.}}$:

$$U_{\text{вх.нес.}} = \frac{U_{\text{изх.ост.}}}{K} \quad (14.2)$$



фиг. 14.4

Поради големият коефициент на усилване без обратна връзка напрежението $U_{\text{вх.нес.}}$, което може да достигне при някои образци усилватели до около 10 mV, предизвиква насищане на изхода на усилвателя (появяване на изходно напрежение със стойност $U_{\text{изх.макс1}}$ или $U_{\text{изх.макс2}}$). В такова състояние усилвателят става неуправляем и е невъзможно използването му за усилване на сигнали. За да съществува линейна зависимост между входните и изходното напрежение, (линеен режим на работа) операционните усилватели обикновено работят с отрицателна обратна връзка (ООВ) по постоянен ток. Тя намалява стойността на напрежението $U_{\text{изх.ост.}}$. На фиг. 14.5 е дадена схема на операционен усилвател с осъществена верига на ООВ, която се състои от резисторите R_1 и R_2 . При наличие на ООВ коефициентът на усилване добива стойност $K_{\text{ОВ}}$, която се определя от израза:

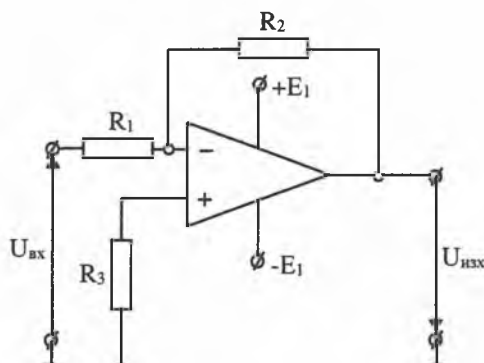
$$K_{\text{ОВ}} = \frac{K}{1 + \beta \cdot K} = \frac{U_{\text{изх.ост.}}}{U_{\text{вх.нес.}}}, \quad (14.3)$$

където β е означен коефициента на предаване по напрежение на веригата на обратна връзка, който за схемата от фиг. 14.5 има стойност

$$\beta = \frac{R_1}{R_2}. \quad (14.4)$$

Връзката между входното и изходно напрежение на схемата от фиг. 14.5 се дава от израза:

$$U_{\text{изх.}} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{\text{вх.}} \quad (14.5)$$



фиг. 14.5

От последната зависимост се вижда, че с помощта на резисторите R_1 и R_2 могат да се осъществят теоретично произволни съотношения (машаби на преобразуване) между входното и изходното напрежения на схемата. Твърде често, в зависимост от конкретното предназначение на съставяната схема, на мястото на резисторите R_1 и R_2 се включват кондензатори, диоди или други комплексни вериги. Така става възможно реализирането на разнообразни функционални връзки между входното и изходното напрежение.

Ако, например, така се подберат стойностите на съпротивленията на резисторите R_1 и R_2 (фиг. 14.5), че тяхното отношение да бъде равно на константата "а", т.е. $R_2/R_1 = a$, за връзката между $U_{вх}$ и $U_{изх}$ се получава:

$$U_{изх} \approx -a \cdot U_{вх}. \quad (14.6)$$

В този случай схемата от фиг. 14.5 се нарича **машабен усилвател** (или "схема за умножение с константа "а").

Ако се приеме, че $R_1 = R_2 = R$, т.е. резисторите R_1 и R_2 са еднакви (примерно $R = 100 \text{ k}\Omega$), се осъществява зависимостта $U_{изх} \approx -U_{вх}$. В този случай усилвателят от фиг. 14.5 се разглежда като "схема за промяна на знака на напрежението".

Схемата от фиг. 14.6 се нарича **суматор**. Тя извършва операциите "сумиране" и "промяна на знака" едновременно:

$$U_{вх.1} + U_{вх.2} + U_{вх.3} \approx -U_{изх}. \quad (14.7)$$

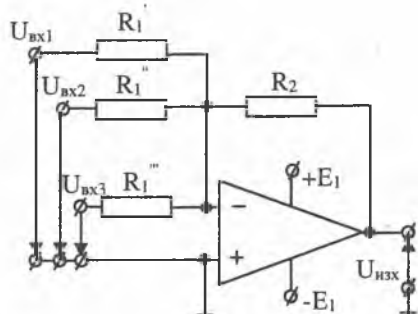
Това е възможно, ако всички резистори в схемата са с еднакви стойности на техните съпротивления:

$$R_1^I = R_1^{II} = R_1^{III} = R_2 \quad (14.8)$$

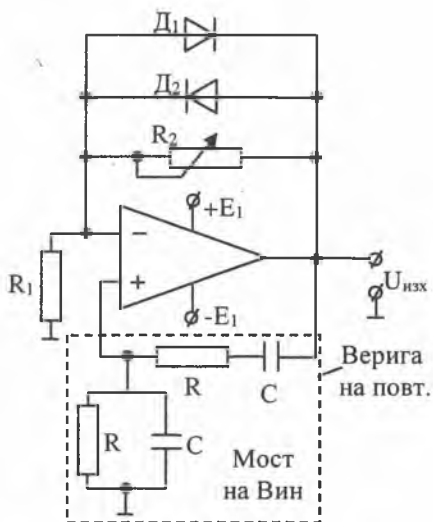
В електронните апаратури намира приложение схемата на **генератор на синусоидални колебания** с операционни усилватели. При генераторите във веригата на положителната обратна връзка (състояща се от елементите, включени между изхода на усилвателя и неинвертиращия му вход) се включва RC-звено (мост на Вин), чиято

предавателна характеристика е честотно зависима, а ООВ се реализира с резистори (фиг. 14.7). За да се получат синусоидални колебания, е необходимо амплитудата им да се ограничава до стойност, при която усилвателят продължава да работи в линеен режим (да не се насища). Такова ограничение във веригата на генератора от фиг. 14.7 извършват двата диода D_1 и D_2 , включени паралелно на резистора R_2 във веригата на ООВ. Действието им е следното. Когато амплитудата на възникналите синусоидални колебания на напрежението на изхода – $U_{изх}$ – е по-малка от напрежението на отпушване на диодите (около 0,6 V), те не оказват влияние. Коэффициентът на ООВ се определя само от R_1 и R_2 . При достигане на амплитудата на $U_{изх}$ до напрежението на отпушване на диодите, те се отпушват (единият при положителната, а другият – при отрицателната полувайна на променливото напрежение $U_{изх}$) и започват да шунтират резистора R_2 . Това води до увеличаване на коефициента на предаване на ООВ и съответно до намаляване на коефициента на усилване на операционния усилвател (израз 14.3), а с това се извършва и необходимото стабилизиране на амплитудата на генерираните колебания. Тяхната честота зависи от стойностите на елементите на моста на Вин и се определя по формулата:

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC} \quad (14.9)$$



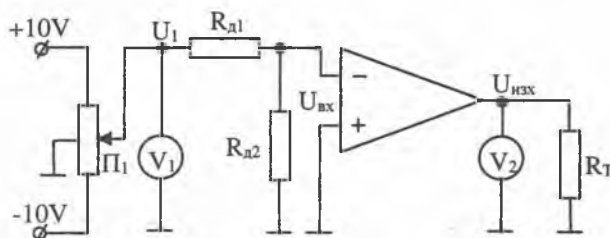
фиг. 14.6



фиг. 14.7

III. РЕД ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Снема се амплитудната характеристика на операционен усилвател с помощта на схемата от фиг. 14.8, която се реализира върху лабораторния макет.



фиг. 14.8

Изследването се извършва за операционен усилвател тип "741", който е вграден в макета. То се провежда по следния начин. Променяйки стойността на напрежението U_1 се постига нулева (или близка до нея) стойност на изходното напрежение $U_{изх}$. При $U_{изх} = 0$ се определя входното напрежение на несиметрия с помощта на волтметър V_1 и резисторния делител, вграден в макета ($R_{д1} - R_{д2}$):

$$U_{вх.нес.} = U_1 \frac{R_{д2}}{R_{д1} + R_{д2}} = 0,001 \cdot U_1, \quad (14.10)$$

където $\frac{R_{д2}}{R_{д1} + R_{д2}} = 0,001$ е коефициентът на предаване на делителя. Резултатите се

нанасят в табл. 14.1. След построяване на графиката, върху нея се означават входното напрежение на несиметрия $U_{вх. нес.}$, допустимите работни стойности на входното и изходното напрежение $\pm U_{вх. max}$ и $\pm U_{изх. max}$.

$$K = \Delta U_{изх} / \Delta U_{вх}$$

Таблица 14.1

$+U_{вх}$	mV						K1	
$+U_{изх}$	V						K2	
$-U_{вх}$	mV						K3	
$-U_{изх}$	V						K4	

$$K_{ср.} = (K1 + K2 + K3 + K4) / 4 = \dots\dots\dots$$

2. Да се изчисли коефициентът на предаване по напрежение на стабилизиращата верига на отрицателната обратна връзка β , който обезпечава остатъчно изходно напрежение $U_{изх.ост.}$ на операционния усилвател не повече от 0,1 V. За целта да се използват резултатите, получени в предната точка и изразите 14.3 и 14.4.

3. Да се свърже схема за събиране и промяна на знака (фиг. 14.6) и се провери действието ѝ за три различни стойности на събираемите. Резултатите да се поместят в табл. 14.2.

Таблица 14.2

Пореден опит		№ 1	№ 2	№ 3
U1	V			
U2	V			
U3	V			
Uизх	V			

4. Да се свърже схемата на генератор на синусоидално напрежение с мост на Вин във веригата на положителната обратна връзка (фиг. 14.7). Предварително се изчислява честотата на изходното напрежение на генератора (формула 14.9) със стойностите на предоставените резистори и кондензатори. Опитно се проверява резултата с помощта на включен на изхода на генератора осцилоскоп. Данните от изчислението и измерването се поместват в протокола.

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Кой от параметрите на операционните усилватели има такава стойност, че позволява за повечето от практическите приложения усилвателят да се разглежда като идеален?
2. Възможно ли е в едно електронно устройство, реализирано с операционен усилвател, да се осъществи едновременно ООВ и ПОВ?

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА №15

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЛОГИЧЕСКИ ЕЛЕМЕНТИ И СХЕМИ

I ЦЕЛ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Да се разучат основните логически понятия и правила на логическото смятане и възможностите за тяхното реализиране чрез електронни логически елементи.
2. Да се разучат основните логически елементи и да се провери тяхното действие.
3. Да се синтезира произволна комбинационна логическа схема с използване на двуходови логически елементи **И-НЕ**.

II ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ

Логическите елементи са основните градивни елементи в интегралната цифрова схемотехника. Логическият елемент е електронна схема, изходният сигнал на която е логическа функция на входния. От отделните логическите елементи се изграждат логически схеми.

Действието на логическият елемент се описва с правилата на "Булевата" алгебра, създадена от английският математик Джордж Бул. Основни понятия в алгебрата на логиката са:

– *логически константи*: 1-със смисъл "истина" и 0- "неистина".

Физическите аналози на тези стойности в електрониката са обикновено две напрежителни нива: на константата 1 съответствува високо напрежително ниво, а на константата 0- ниско ниво. Всяко твърдение в Булевата алгебра се нарича съждение. То може да заема само две стойности -1 и 0.

– *логически функции*: зависимости от вида:

$$y = f(x) = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n),$$

като функцията y и аргументите x_1, x_2, \dots, x_n могат да имат стойности 0 и 1.

– *набор от значения на променливите* се нарича всяка комбинация, която могат да образуват променливите.

Задаването /описването/ на една логическа функция може да стане по един от следните начини:

- описателно-с математически запис;
- с таблица на истинност;
- графично.

Таблица на истинност се нарича таблицата, в която се посочва стойността на функцията за всяка комбинация /всеки набор/ на стойностите на аргументите. Например, при един аргумент броят на възможните функции е 4, а при 2 броя аргументи различните функции са 16.

Основните логически функции, чрез които могат да се реализират логически схеми с произволна сложност са: логическо отрицание **НЕ (NOT)**, логическо произведение **И (AND)** и логическа сума **ИЛИ (OR)**. Таблицата на истинност на тези функции при две променливи е показана на Фиг.15-1. В таблицата са показани

примери за тяхната електрическа реализация, както и символните означения, приети за TTL схеми.

За обяснение действието на електрическата реализация на логически схеми се приемат следните символни означения – затворен ключ ($X = 1$), отворен ключ ($X = 0$), светеща лампа ($Y = 1$) и несветеща лампа ($Y = 0$).






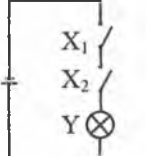
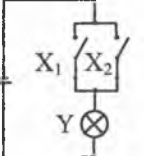
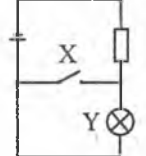
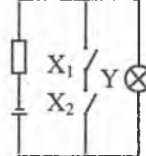
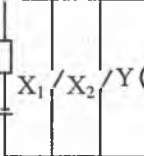
Логическото отрицание **НЕ** /NOT/ се нарича още инвертиране.

Логическата функция **И** /AND/ има стойност 1 само тогава, когато всички нейни променливи имат стойност 1 /в случая променливите са само две/.

В изхода на елемента **И** сигнал 1 ще има само тогава, когато на всички входове са подадени сигнали 1. Логическата функция **ИЛИ** /OR/ има стойност 1 когато поне една от нейните променливи има сигнал 1. Сигналът на изхода на такъв елемент е 1, ако поне на един от входовете има 1.

Операциите логическо сумиране и логическо умножение по смисъл си съвпадат със съответните операции в обикновената алгебра. Инвертирането обаче няма такъв аналог. Графически то се означава с черта над съответния запис на променливите.

Всички изброени елементи образуват пълен функционален набор, тъй като с тях може да се изрази произволна логическа функция. Пълен функционален набор се получава и само от един логически елемент, например **И-НЕ** или от елемента **ИЛИ-НЕ**.

Функция	И /AND/	ИЛИ /OR/	НЕ	И-НЕ /NAND/	ИЛИ-НЕ /NOR/								
		$y = x_1 \cdot x_2$	$y = x_1 + x_2$	$y = \bar{x}$	$y = \overline{x_1 \cdot x_2}$	$y = \overline{x_1 + x_2}$							
Означения													
Елек. реализация													
ТАБЛ. на логичност	X ₁	X ₂	Y	X	Y	X ₁	X ₂	Y	X	Y	X ₁	X ₂	Y
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0
	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

фиг. 15.1

Функциите, които реализират елементите **И-НЕ** и елемента **ИЛИ-НЕ** са (фиг. 15.1):

$$y = \overline{x_1 \cdot x_2} \quad y = \overline{x_1 + x_2}$$

От определението за логическо произведение, сумиране и инвертиране следва:

$$\begin{aligned} x_1 \cdot 0 &= 0 & x_1 + 0 &= x_1 & \overline{\overline{x_1}} &= x_1 \\ x_1 \cdot 1 &= x_1 & x_1 + 1 &= 1 & & \\ x_1 \cdot x_1 &= x_1 & x_1 + x_1 &= x_1 & & \end{aligned}$$

В сила са и следните тривиални равенства:

$$\overline{x_1 \cdot x_1} = 0 \quad \overline{x_1 + x_1} = 1$$

Според Теоремата на де Морган, в най-общия случай може да се запише:

$$\overline{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n} = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \dots \cdot \overline{x_n}$$

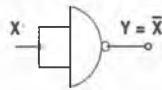
$$\overline{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_n} = \overline{x_1} + \overline{x_2} + \overline{x_3} + \dots + \overline{x_n}$$

$$\text{В сила е и: } x_1 + x_2 \cdot x_3 = (x_1 + x_2)(x_1 + x_3)$$

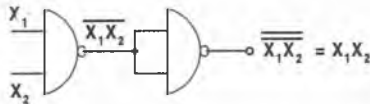
Следователно, с логически елемент **И-НЕ** може да се осъществи операция **НЕ** и операция **ИЛИ**. С логически елемент **ИЛИ-НЕ** – операция **НЕ** и **И**. Всеки един от тези елементи представлява универсална логическа среда. В най-разпространените TTL интегрални схеми основен елемент е **И-НЕ** с различен брой входове.

От логически елемент **И-НЕ** функция **НЕ** се реализира, като се свържат нахъсо входовете, т.е. когато $x_1 = x_2$ / изхода се явява инверсия на входа.

По същия начин се получава инвертор и от елемента **ИЛИ-НЕ**

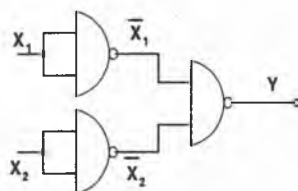


Функция **И** може да се реализира от два елемента **И-НЕ**, като втория само инвертира сигнала.



Функция **ИЛИ** се осъществява с три логически елемента **И-НЕ**, като се използва преобразуването:

$$y = \overline{\overline{x_1 + x_2}} = \overline{\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}}$$



За синтезиране на произволна комбинационна логическа схема, първо трябва да се състави таблицата на истинност според логическото действие на схемата. След това може да се направи развитие на функцията, например по нейните *единични значения*. Това става, като се направи логическо сумиране от толкова на брой събираеми, колкото са наборите, за които функцията има стойност 1. Събираемите се съставят от логически произведения на променливите по следния начин: Ако за конкретния набор променливата има стойност 1, тя се записва без инверсия. Ако тя участва с логическа 0, в произведението се записва нейната инверсия. С цел логическата функция да бъде реализирана с по-малък брой логически елементи на развитието на функцията може да бъде направена т.нар. минимизация /опростяване/, като се използват правилата на Булевата алгебра.

Казаното може да се обобщи в следното *правило*:

За всеки ред от таблицата на истинност, за който изходният сигнал има стойност логическа 1, се съставя логическо произведение **И** на входните сигнали и след това се сумират произведенията чрез схема **ИЛИ**. Ако някой от входните сигнали е логическа 0, то в произведенията участвуват техните инверсии.

Пример 1.

Да се синтезира логическа функция $y = f(x) = (x_1 = x_2)$.

Съставя се таблицата на истинност (фиг. 15.3). Функцията има стойност лог. 1 само за набор 0 и 3, където съжденията са истина, при тези комбинации $x_1 = x_2$. В развитието на функцията ще има само две събираеми представяне и е от вида:

$$y = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} + x_1 \cdot x_2$$

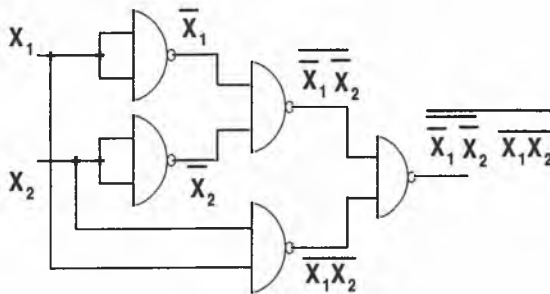
Набор №	x_1	x_2	y
0	0	0	1
1	0	1	0
2	1	0	0
3	1	1	1

фиг. 15.2

За набор 0, двете променливи x_1 и x_2 са представени с логическа нула и за това първото събираемо е от произведение на двете инвертирани променливи. За набор 3, двете променливи участват с логическа 1 и затова произведението е от двете неинвертирани променливи x_1 и x_2 . За реализирането на функцията само с логически

елементи И-НЕ е необходимо да се изключи логическата операция ИЛИ. Това става, като се инвертира два пъти функцията /за да не се измени/ и се приложи Теоремата на де Морган. Вече е възможно да се състави структурната схема.

$$y = \overline{\overline{x_1 \cdot x_2} + \overline{x_1 \cdot x_2}} = \overline{\overline{x_1 \cdot x_2}} + \overline{\overline{x_1 \cdot x_2}} = x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_2$$



Пример 2 .

Да се синтезира комбинационна логическа схема за сумиране на две еднобитови числа, с изработване на сигнал за евентуален пренос на по-старши разряд:

набор	x_1	x_2	y	C
0	0	0	0	0
1	0	1	1	0
2	1	0	1	0
3	1	1	0	1

фиг. 15.3

Ясно е, че логическата схема трябва да се изгради от две логически функции и ще има два входа и два изхода. Таблицата на истинност е показана на фиг. 15.3. Само за набор 3, когато и двете променливи имат лог. стойност 1, изхода y трябва да бъде 0 и едновременно с това изхода C трябва да има лог. стойност 1 /пренос/. Функцията y има стойност 1 за набори 1 и 2. Тогава развитието е :

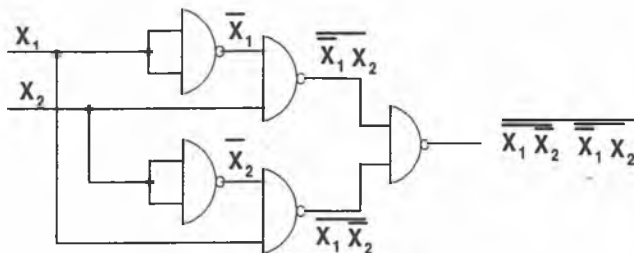
$$y = \overline{x_1 \cdot x_2} + \overline{x_1 \cdot x_2}$$

За първото събираемо x_1 е представено от 0, а x_2 - от 1. Затова x_1 участва в инверсна форма, а x_2 е без инверсия. Аналогично се съставя и второто събираемо. Вижда се, че изхода C има само едно единично значение за набор 3. Представянето му е:

$$C = \overline{\overline{x_1 \cdot x_2}} = \overline{x_1 \cdot x_2}, \text{ а структурната схема на тази функция вече беше показана.}$$

$$y = \overline{\overline{x_1 x_2} + \overline{x_1 x_2}} = \overline{\overline{x_1 x_2}} \cdot \overline{\overline{x_1 x_2}}$$

В тази форма, функцията y може да бъде реализирана само с използване на логика **И-НЕ**.



III. РЕД ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНАТА РАБОТА

1. Да се провери действието на основните логически елементи върху лабораторния макет, според таблицата на истинност (фиг. 15-1).

В макета са използвани интегрални TTL елементи, за които е прието лог. 0 да се задава с ниско напрежително ниво /около 0 V и лог. 1 с високо ниво - около 5 V/. Състоянието на изхода на лог. елементи, както и входните сигнали се наблюдава с помощта на логически пробник с индикация за двете възможни стойности 0 и 1. Да се измерят с цифров волтметър напреженията на състоянието 0 и 1. Резултатите да се запишат в следната таблица.

Напрежение на двете логически стойности	Лог. "1" - "TTL-схеми"	Лог. "0" - "TTL-схеми"
		[V]

2. Чрез използване на двуходови лог. елементи **И-НЕ** да се реализират схеми на лог. функция **И** и лог. функция **ИЛИ**. Да се провери тяхното действие.

3. Като се използват правилата за синтезиране на произволна лог. функция да се съставят таблиците на истинност и запишат изразите за реализиране с елементи **И-НЕ** на следните логически функции:

$$x_1 < x_2 \quad ; \quad x_1 \leq x_2 \quad ; \quad \overline{x_1 < x_2}$$

$$x_1 > x_2 \quad ; \quad x_1 \geq x_2 \quad ; \quad \overline{x_1 > x_2}$$

4. Да се реализира структурната схема на следната лог. функция:

$$y = x_1 x_2 + \overline{x_1} \overline{x_2} + \overline{x_1} x_2$$

IV. КОНТРОЛНИ ВЪПРОСИ

1. Кои са основните логически функции?
2. Какво изразяват логическите стойности 0 и 1?
3. С какви еднотипни логически елементи може да се реализира каквато и да е логическа функция?
4. По какви правила се развива една логическа функция като се изхожда от таблицата на истинност?

Приложение: ЛАБОРАТОРНИ ПРОТОКОЛИ.
ОБЩИ УКАЗАНИЯ ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНИТЕ УПРАЖНЕНИЯ
И ИЗГОТВЯНЕ НА ОТЧЕТНИТЕ ПРОТОКОЛИ

Всяка лабораторна работа се извършва с помощта на електроизмервателни уреди и спомагателни устройства, които се свързват по определена схема. Студентите са длъжни да се подготвят за предстоящата им лабораторна работа - да знаят основните теоретични положения и реда за провеждането ѝ.

Неподготвените не се допускат до работа !

След изсяняване на опитната постановка, както и използваните измервателни уреди, електрически машини и помощни съоръжения студентите свързват съответната електрическа схема.

Електрическата верига се свързва към източник на напрежение след проверка и разрешение от преподавателя.

Забранява се на студентите да включват под напрежение електрически вериги без разрешение от ръководителя на упражненията или с нарушение на правилата по техническа безопасност.

Схемата се включва внимателно към захранващата мрежа, като се следи за правилното отклонение на уредите. При всяко изменение на схемата е необходимо да се извърши нова проверка. Измерванията трябва да се провеждат с голямо внимание, прецизно и коректно. При отчитане на показанията на уредите наблюдението на стрелките трябва да бъде перпендикулярно на скалата, а при огледални скали стрелката трябва да покрива огледалния си образ. Резултатите от измерванията се записват в таблица съгласно указанията за съответното лабораторно упражнение.

След завършване на измерванията, студентите представят получените резултати за проверка от преподавателя. Ако те са добри, електрическата верига се изключва от напрежение и схемата се разкача.

Получените резултати се обработват частично в лабораторията, а в къщи окончателно завършват изчисленията и попълват протокола.

Протоколът трябва да съдържа следните части:

А. Заглавна страница

- Име, фамилия и факултетен номер на студента, номер на групата, специалност, курс.
- Тема: наименование на лабораторната работа.

Б. Съдържание

1. Цел на практическата работа.
2. Кратка теоретична част - кратко описание на теорията с необходимите изчислителни формули и изсяняване начина на работа.
3. Схема на изпълнение - изчертава се задължително с молив и с помощни материали (линийка, шаблон, пергел и т.н.). Всички условни изображения в схемите и надписите трябва да съответствуват на БДС.
4. Опис на използваните електроизмервателни уреди и спомагателни устройства.

За описание на номиналните данни се използва следната таблица:

№	Наименование на уреда	Фабр. №	Система	Клас на точност	Номинален обхват	Номин. брой скални дел.	Номин. константа

5. Резултати от измерванията и изчисления - нанасят се в съответни таблици.

6. Графики и векторни диаграми - графичните зависимости се изчертават на милиметрова хартия (8x8 cm или 10x10 cm), като при построяването им обикновено се използва декартова (правоъгълна) координатна система. Векторните диаграми се строят в подходящо избран мащаб.

7. Анализ на получените резултати, изводи.. Прави се анализ на получените резултати, като студентите ги сравняват с известни теоретични зависимости и се обясняват причините за различията. Необходима е критична оценка на резултатите.

Готовият протокол за всяко проведено упражнение задължително се представя и защитава пред ръководителя на следващото лабораторно занятие.

Отчета на проведените упражнения може да се направи и в приложените подолу образци на лабораторни протоколи, които се заверяват от преподавателя.

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 1

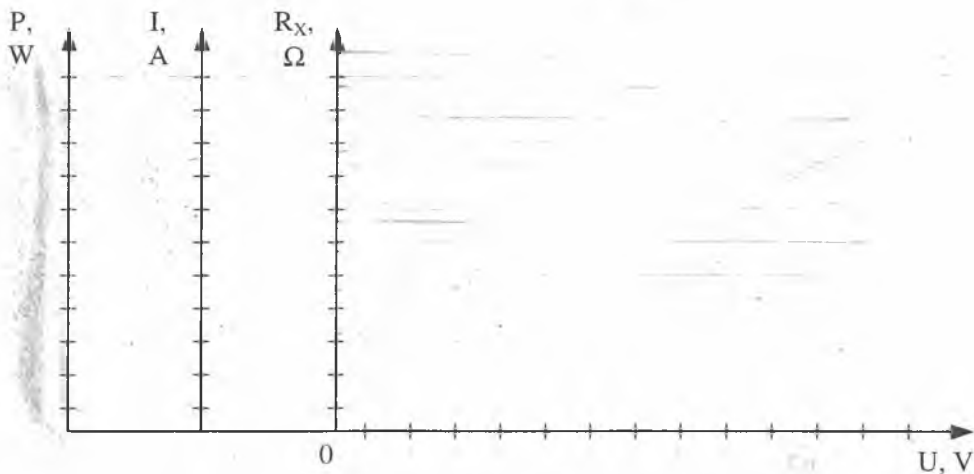
ИЗМЕРВАНЕ НА СЪПРОТИВЛЕНИЯ С ВОЛТМЕТЪР И АМПЕРМЕТЪР, С ОММЕТЪР И МЕГАОММЕТЪР (ЛОГОМЕР)

Протокол

Студент:		
(име, презиме, фамилия)		
Фак.№	Група	Курс
Форма на обучение	Семестър	
Дата:	Подпис:	

Дата:	Преподавател:	ЛР № 1
-------------	---------------------	--------

Графични зависимости $I = f(U)$, $P = f(U)$, $R_x = f(U)$



2. Измерване с омметър

$R_x = \dots\dots\dots \Omega$ (омметър с последователна схема)

$R_x = \dots\dots\dots \Omega$ (омметър с паралелна схема).

3. Измерване с мегаомметър

Таблица 1.2

№	Изоляция между	Съпротивление на izolацията, МΩ	
		кабел	двигател
1	фаза А и фаза В		
2	фаза А и фаза С		
3	фаза В и фаза С		
4	фаза А и корпус		
5	фаза В и корпус		
6	фаза С и корпус		

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 2

КОМПЕНСАЦИОНЕН МЕТОД ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ПОСТОЯННИ
НАПРЕЖЕНИЯ И ПРОПОРЦИОНАЛНИ НА ТЯХ ВЕЛИЧИНИ

Протокол

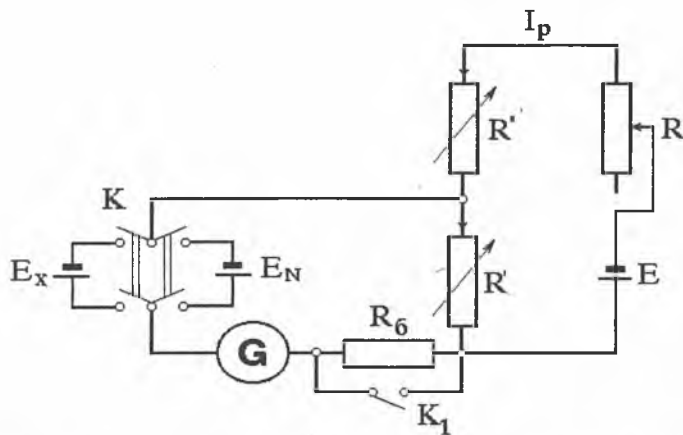
Студент:	(име, презиме, фамилия)	
Фак.№	Група	Курс
Форма на обучение	Семестър	
Дата:	Подпис:	

Дата:	Преподавател:	ЛР № 2
-------------	---------------------	--------

Описание на използваните уреди и спомагателни устройства.

№	Наименование	с-ма	фабр. №	обхват	брой ск. деления	констан-та	клас на точност

Опитни данни и резултати от изчисленията. Графики.



Фиг. 2.2. Принципна схема на компенсатор за постоянен ток

- По зададена стойност на работния ток I_p се определят стойностите на съпротивленията на декадните резистори R' и R'' :

$$I_p = \dots 5 \cdot 10^{-4} \dots \text{A}$$

$$R'_N = \frac{E_N}{I_p} = \frac{10183}{5 \cdot 10^{-4}} = 20366 \Omega$$

$$R''_N = 11111 - R'_N = 11111 - 20366 = 90744 \Omega$$

2. Установява се във веригата зададеният в предната точка ток I_p , в съответствие с описанието, направено в теоретичната част.
3. Изследването точността на волтметъра V , чрез измерване на показанията му и по компенсационния метод, се извършва като посредством реостата R_1 се задават 4-5 различни напрежения равномерно разпределени по скалата му.
4. Всяка от зададените и измерени с волтметъра V стойности, се измерват и с компенсатора по описания в теоретичната част начин. Показанието на волтметъра и стойностите на R_x' и R_x'' , при които е постигнато равенството, се отчитат и нанасят в таблица 1.

Таблица 1.

Измерени величини				Изчислени величини			
θ_v	U_v	R_x'	R_x''	U_x	β	β_H	c
дел	V	Ω	Ω	V	%	%	-

6. За всеки опит се изчисляват :

1) Измереното с компенсатора напрежение U_x

2) Относителната грешка на волтметъра

$$\beta\% = \frac{U_v - U_x}{U_x} \cdot 100$$

3) Приведената грешка на волтметъра

$$\beta_H\% = \frac{U_v - U_x}{U_{V_{ном}}} \cdot 100,$$

където $U_{V_{ном}}$ е номиналният обхват на волтметъра. На практика приведената грешка показва класа на точност на уреда.

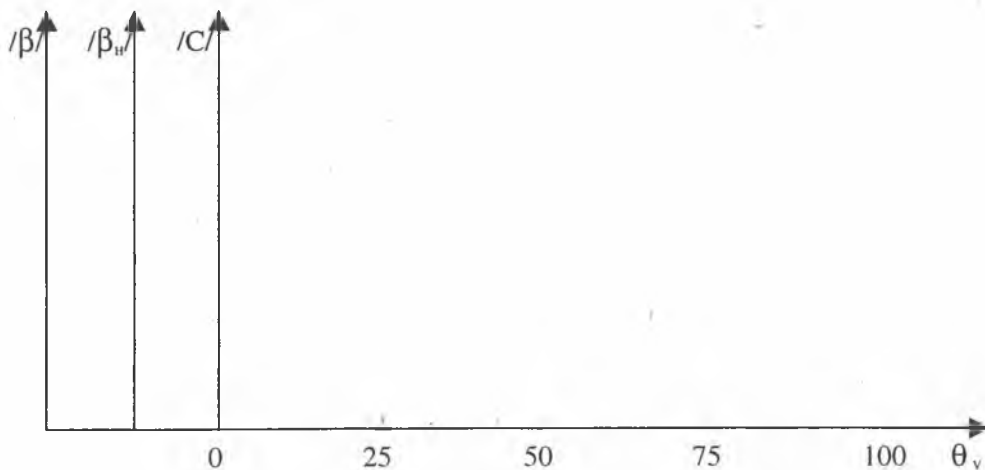
4) Корекционен фактор

$$c = \frac{U_x}{U_v}$$

7. Определя се класът на точност на волтметъра като максималната приведена грешка в проценти се сравнява със стандартните класове:

Средна стойност на приведената грешка β_H

8. Да се начертаят в една координатна система графиките на зависимостите $\beta(\theta_v)$, $\beta_H(\theta_v)$ и $C(\theta_v)$. β и β_H се вземат по абсолютна стойност.



ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 3

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОСЛЕДОВАТЕЛНА RLC ВЕРИГА
ЗА ПРОМЕНЛИВ ТОК

Протокол

Студент:	(име, презиме, фамилия)	
Фак.№	Група	Курс
Форма на обучение	Семестър	
Дата:	Подпис:	

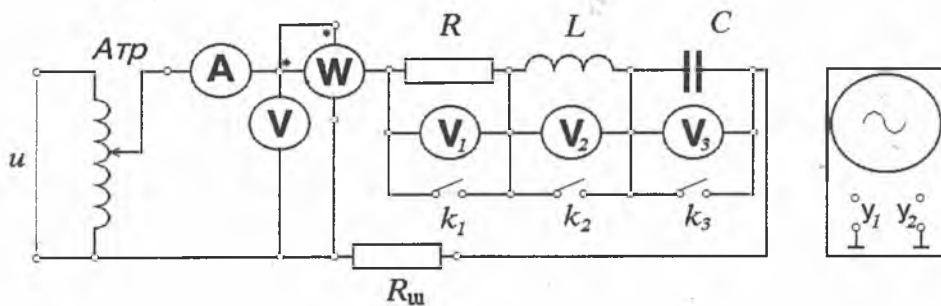
Дата:	Преподавател:	ЛР № 3
-------------	---------------------	--------

Описание на използваните уреди и спомагателни устройства.

№	Наименование	с-ма	фабр. №	обхват	брой ск. деления	констан-та	клас на точност

Опитни данни и резултати от изчисленията

Забележка: При всички опити входният ток се поддържа неизменен в границите 0,2 А - 0,25 А. Последователно се задават положенията на ключовете K_1 , K_2 и K_3 , записани в Таблица 1, където се нанасят резултатите от измерванията.



фиг. 3.6. Работна схема

Таблица 3.1.

Измерени величини						Изчислени величини							Положение на ключовете				
U	V	I	P	U ₁	U ₂	U ₃	R	Z ₆	R ₆	X _L	L	X _C	C	φ	K ₁	K ₂	K ₃
		A	W	V	V	V	Ω	Ω	Ω	Ω	H	Ω	μF	-			
					-	-		-	-	-	-	-	-		отв.	затв.	затв.
						-	-								затв.	отв.	затв.
							-	-	-	-	-	-	-		затв.	затв.	отв.
							-	-	-	-	-	-	-		отв.	отв.	затв.
							-	-	-	-	-	-	-		отв.	затв.	отв.
							-	-	-	-	-	-	-		отв.	отв.	отв.
							-	-	-	-	-	-	-		отв.	отв.	отв.

Векторни диаграми:

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 4

ИЗМЕРВАНЕ НА АКТИВНА МОЩНОСТ С ЕЛЕКТРОДИНАМИЧНИ
ВАТМЕТРИ

Протокол

Студент:
(име, презиме, фамилия)

Фак.№ Група Курс

Форма на обучение Семестър

Дата: Подпис:

Дата: Преподавател: ЛР № 4

Описание на използваните уреди и спомагателни устройства.

№	Наименование	с-ма	фабр. №	обхват	брой ск. деления	констан-та	клас на точност

Опитни данни и резултати от изчисленията.

Измерванията се извършват по указанията дадени в т. III на Лаб. работа № 4 по схемите от фиг. 4.11 и фиг. 4.12, а опитните данни се нанасят в следните таблици:

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 5

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕДНОФАЗЕН ИНДУКЦИОНЕН ЕЛЕКТРОМЕР
ЗА АКТИВНА ЕНЕРГИЯ**

Протокол

Студент:		
(име, презиме, фамилия)		
Фак.№	Група	Курс
Форма на обучение	Семестър	
Дата:	Подпис:	

Дата:	Преподавател:	ЛР № 5
-------------	---------------------	--------

Използвани измервателни уреди.

№	Наименование	с-ма	фабр. №	обхват	брой ск. деления	констан-та	клас на точност

Опитни данни и резултати от изчисленията

1. Проверка за точност.

Данни за използвания електромер:

Номинален ток $I_H = \dots\dots\dots A$

Номинално напрежение $U_H = \dots\dots\dots V$

Преводно число $N = \dots\dots\dots$

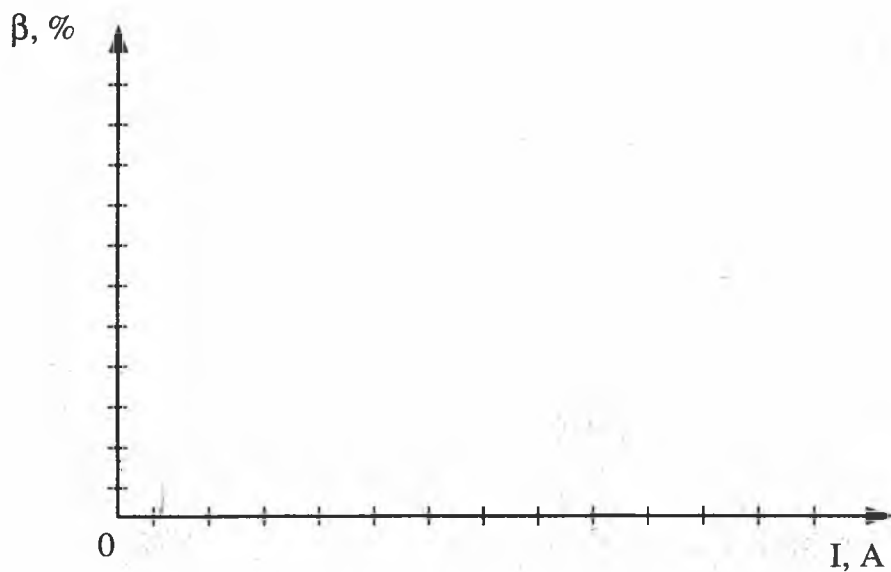
Константа $K = \dots\dots\dots$

2. Проверка за чувствителност.

$I_{\min} = \dots\dots\dots$

$\sigma\% = \dots\dots\dots$

Графична зависимост $\beta = f(I)$



ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 6

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДВИГАТЕЛ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК С ПАРАЛЕЛНО ВЪЗБУЖДАНЕ

Протокол

Студент:
(име, презиме, фамилия)

Фак.№ Група Курс

Форма на обучение Семестър

Дата: Подпис:

Дата: Преподавател: ЛР № 6

Описание на използваните уреди и спомагателни устройства.

№	Наименование	с-ма	фабр. №	обхват	брой ск. деления	констан-та	клас на точност
						-	

Опитни данни и резултати от изчисленията.

Измерванията се извършват съгласно указанията дадени в т. III на Лаб. работа № 6 по схемите от фиг. 6.2, а опитните данни се нанасят в следните таблици:

Таблица 6.1 /Данните от измерванията съгласно т. 4/

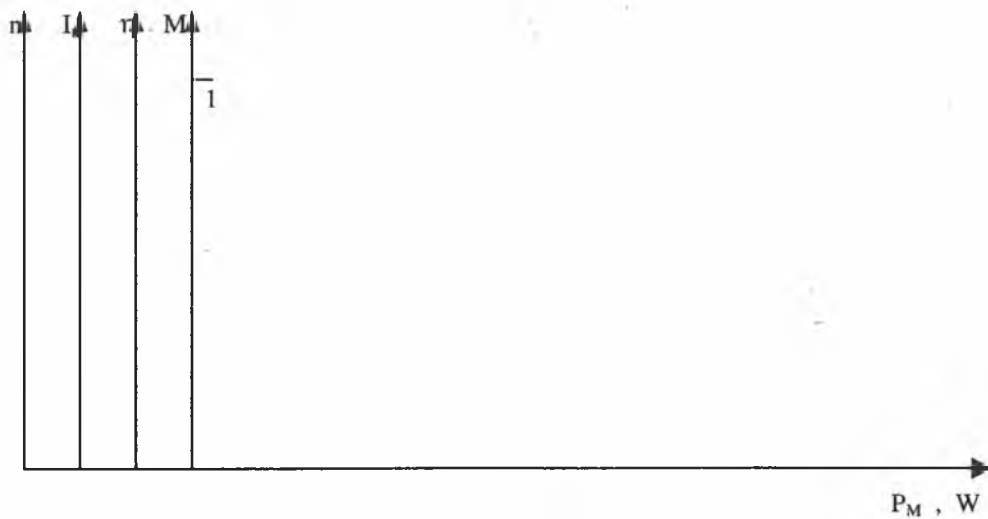
Резултати от измерванията								Резултати от изчисленията			
за двигателя				за генератора							
U	I _B	I _K	n	U _Г	I _Г	η _Г	P _{заг.}	P ₁	P _М	η	M
V	A	A	tr/min	V	A	-	W	W	W	-	Nm

Таблица 6.2 /Данните от измерванията съгласно т. 5/

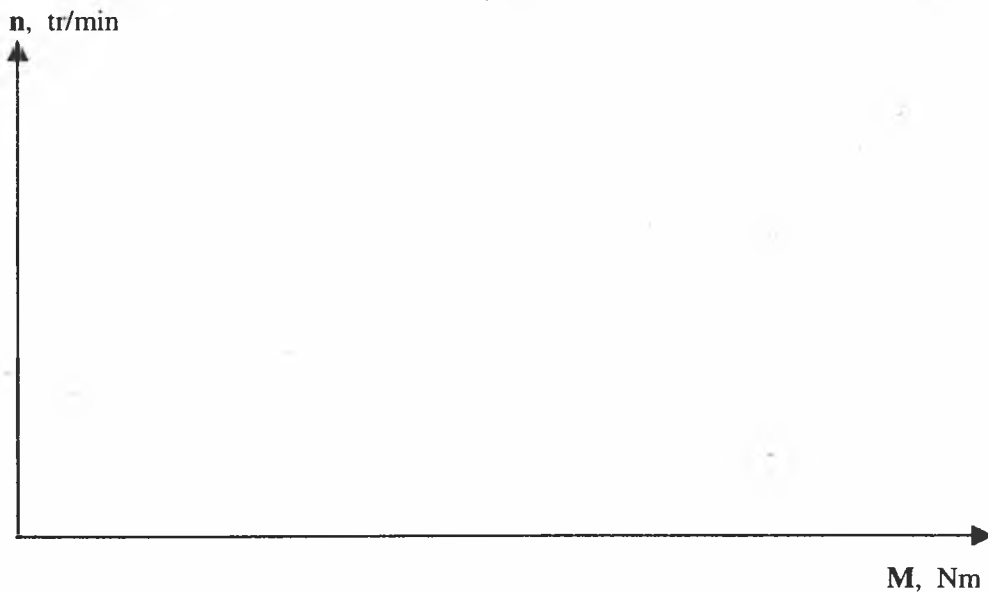
n	U _r	I _r	η _r	P _m	M
tr/min	V	A	–	W	Nm

Таблица 6.3 /Данните от измерванията съгласно т. 6/

n	U _r	I _r	η _r	P _m	M
tr/min	V	A	–	W	Nm



Механични характеристики на двигател за постоянен ток с паралелно възбуждане



ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 7

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕДНОФАЗЕН ТРАНСФОРМАТОР

Протокол

Студент:		
(име, презиме, фамилия)		
Фак.№	Група	Курс
Форма на обучение	Семестър	
Дата:	Подпис:	

Дата:	Преподавател:	ЛР № 7
-------------	---------------------	--------

Описание на използваните уреди и спомагателни устройства.

№	Наименование	с-ма	фабр. №	обхват	брой ск. деления	констан-та	клас на точност

Опитни данни и резултати от изчисленията.

Измерванията се извършват по схемата от фиг. 7.2, а опитните данни се нанасят в следващата таблица:

Забележка: Опитите при режимите на работа "Празен ход" и "Късо съединение" се правят в присъствието на преподавателя.

Работни характеристики на трансформатора.

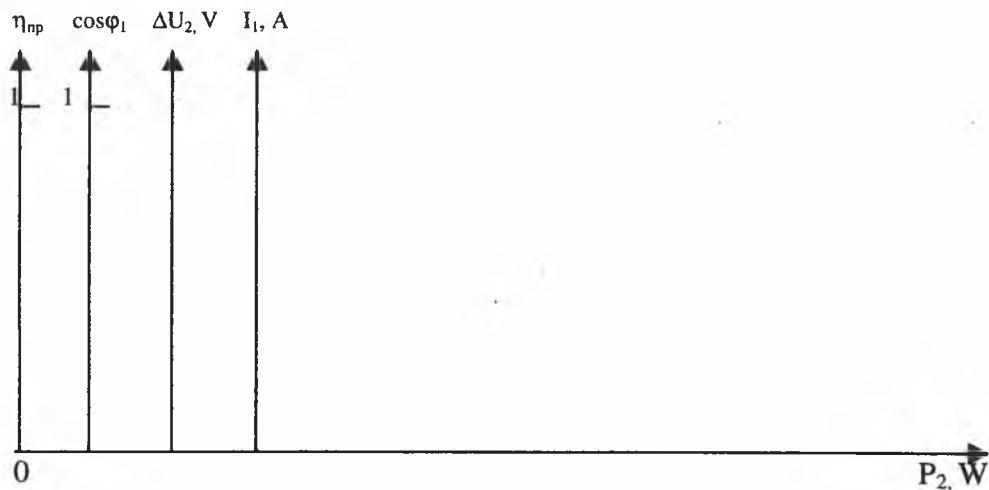


Таблица 7.1.

Измерени величини					Изчислени величини							
U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	P_2	$\cos\varphi_1$	$\eta_{пр}$	$P_{ст}$	P_m	η_k	ΔU_2	забележка
V	A	W	V	A	W	-	-	W	W	-	%	
				0					0			празен ход
												натоварване
			0					0				късо съединение

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 8

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТРИФАЗЕН АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ С РОТОР,
СЪЕДИНЕН НАКЪСО**

Протокол

Студент:		
(име, презиме, фамилия)		
Фак. №	Група	Курс
Форма на обучение	Семестър	
Дата:	Подпис:	

Дата:	Преподавател:	ЛР № 8
-------------	---------------------	--------

Описание на използваните уреди и спомагателни устройства.

№	Наименование	с-ма	фабр. №	обхват	брой ск. деления	констан-та	клас на точност

Опитни данни и резултати от изчисленията.

Измерванията се извършват съгласно указанията дадени в т. III на лабораторна работа № 8 по схемите от фиг. 8.1, а опитните данни се нанасят в следната таблица:

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 9

ПОДОБРЯВАНЕ ФАКТОРА НА МОЩНОСТТА
НА ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАЩИ ЛИНИИ

Протокол

Студент:	(име, презиме, фамилия)	
Фак.№	Група	Курс
Форма на обучение	Семестър	
Дата:	Подпис:	

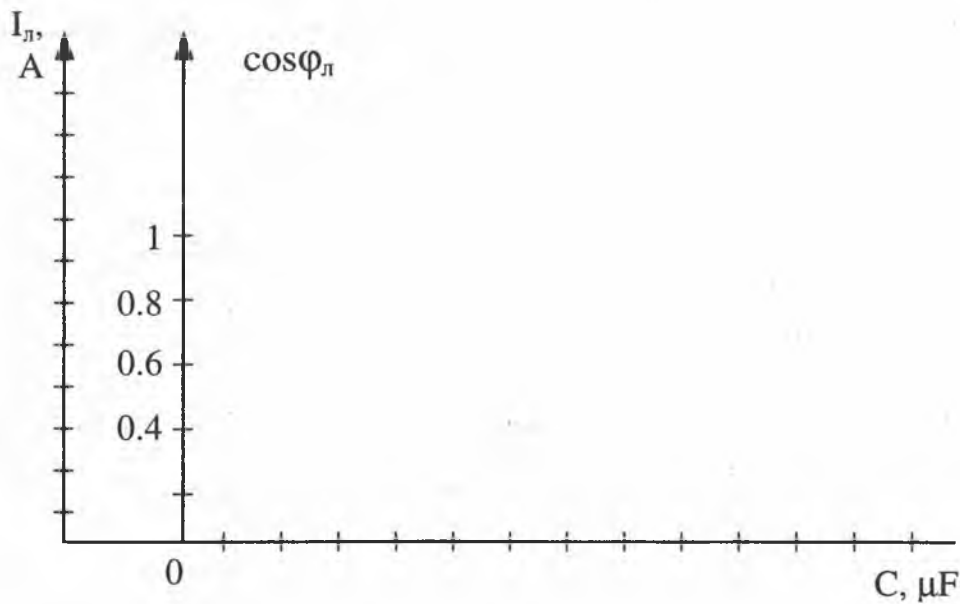
Дата:	Преподавател:	ЛР № 9
-------------	---------------------	--------

Използвани измервателни уреди.

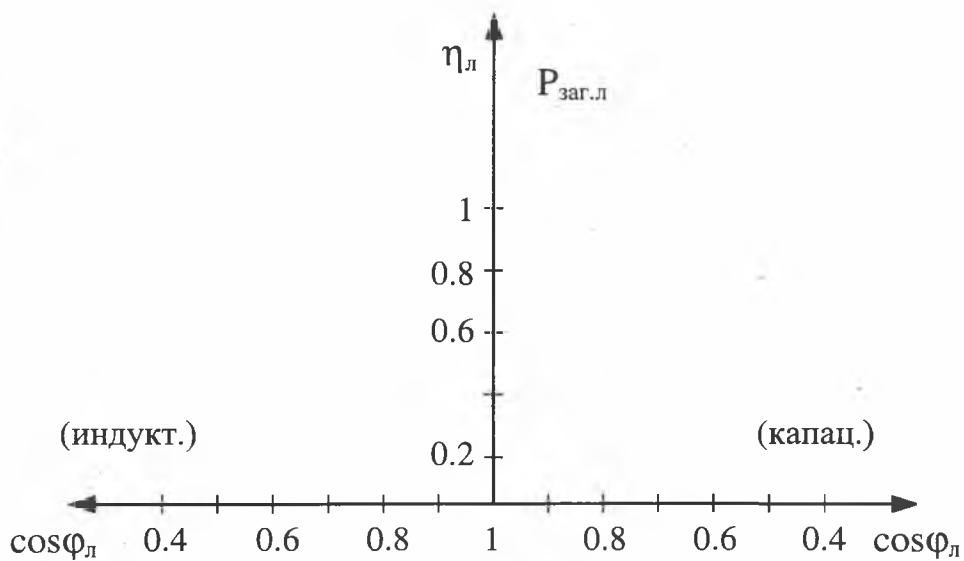
№	Наименование	с-ма	фабр. №	обхват	брой ск. деления	констан-та	клас на точност

Опитни данни и резултати от изчисленията.

Графични зависимости $I_n = f(C)$, $\cos \varphi_n = f(C)$



Графични зависимости $P_{\text{заг.л}} = f(\cos \varphi_{\text{л}})$, $\eta_{\text{л}} = f(\cos \varphi_{\text{л}})$



ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 10

ИЗСЛЕДВАНЕ ДЕЙСТВИЕТО НА ТОКОИЗПРАВИТЕЛНИ СХЕМИ
И ИЗГЛАЖДАЩИ ФИЛТРИ

Протокол

Студент:	(име, презиме, фамилия)	
Фак.№	Група	Курс
Форма на обучение	Семестър	
Дата:	Подпис:	

Дата:	Преподавател:	ЛР № 10
-------------	---------------------	---------

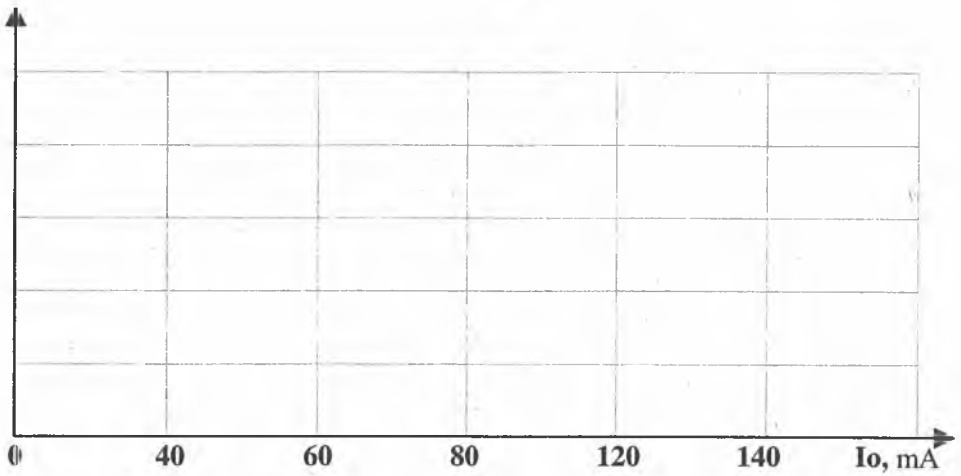
Таблица 10.3

Вид на схема	Вид на филтъра	без филтър			с филтър			К	Осцилограма
		U_0	U_{lmax}	q	U_0	U_{lmax}	q		
		V	V	-	V	V	-		
Еднофазна	L								
	C								
	L - C								
	C-L-C								
Двухфазна	L								
	C								
	L - C								
	C-L-C								

Таблица 10.4

U_o	V								
I_o	mA	0	40	60	80	100	120	140	

Товарна характеристика (фиг. 10.14):

U_o, V

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 11

ИЗСЛЕДВАНЕ ДЕЙСТВИЕТО НА УПРАВЛЯЕМИ
ТОКОИЗПРАВИТЕЛНИ СХЕМИ

Протокол

Студент:		
(име, презиме, фамилия)		
Фак.№	Група	Курс
Форма на обучение	Семестър	
Дата:	Подпис:	

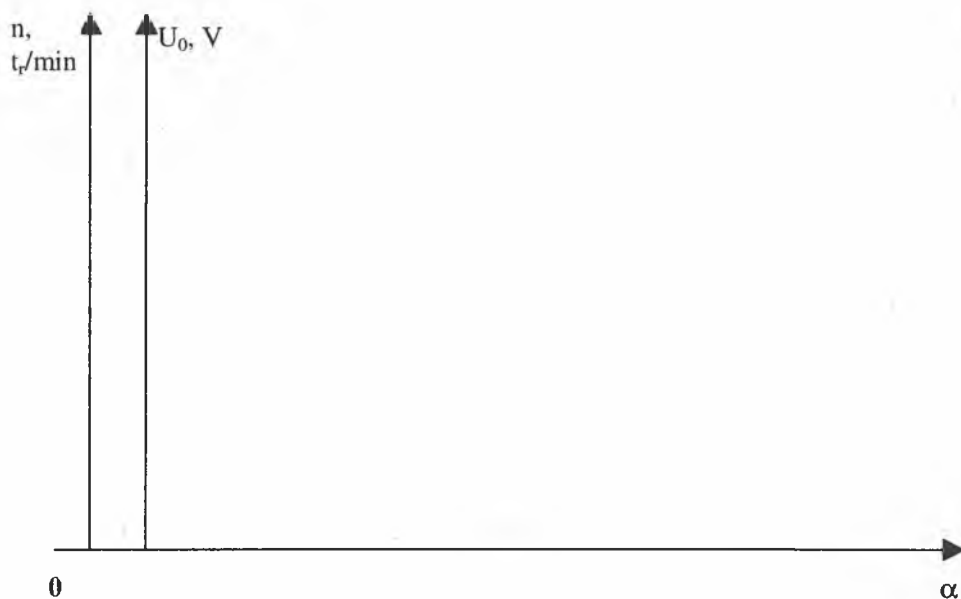
Дата:	Преподавател:	ЛР № 11
-------------	---------------------	---------

Опитни данни и резултати от изчисленията. Графики.

Измерванията се извършват съгласно указанията дадени в т. III на лабораторна работа № 11, а опитните данни се нанасят в следната таблица:

№	α	U_1	I_1	U_0	I_0	n	η
	°	V	A	V	A	tr/min	—

Графики.



ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 12

МНОГОСТЪПАЛЕН НИСКОЧЕСТОТЕН УСИЛВАТЕЛ -
ПОЛУЧАВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА АМПЛИТУДНО-ЧЕСТОТНАТА
ХАРАКТЕРИСТИКА

Протокол

Студент:	(име, презиме, фамилия)	
Фак.№	Група	Курс
Форма на обучение	Семестър	
Дата:	Подпис:	

Дата:	Преподавател:	ЛР № 12
-------------	---------------------	---------

Опитни данни и резултати от изчисленията.

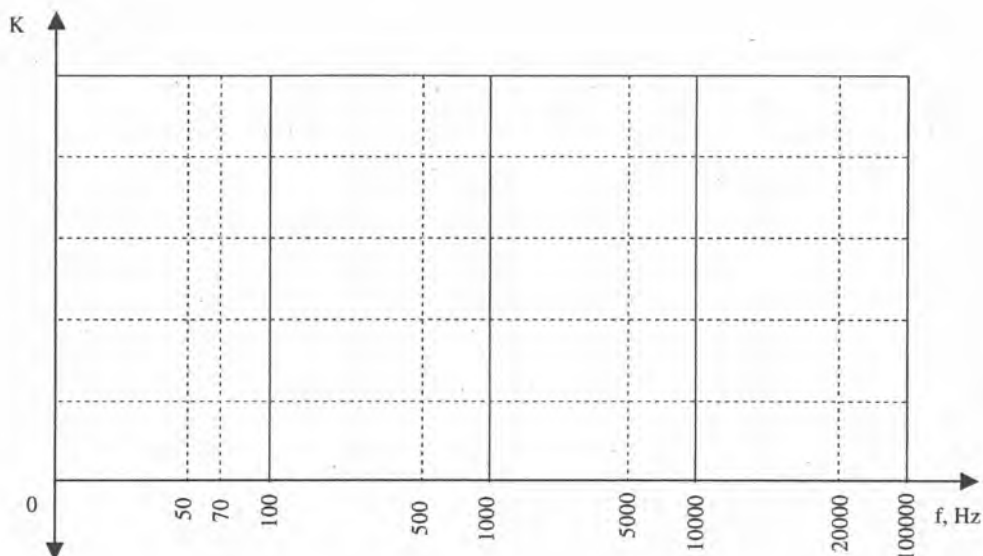
Графика /честотна характеристика на нискочестотен усилвател/

1. По зададена стойност на $P_{\text{изх}}$, се определя изходното напрежение $U_{\text{изх}}$. (товарният резистор е със съпротивление $R_T = 4 \Omega$):

$$U_{\text{изх}} = \sqrt{P_{\text{изх}} \cdot R_T} = \sqrt{\dots \times 4} = \dots \text{ mV}$$

2. Опитно се определя стойността на входното напрежение $U_{\text{вх}}$, която се записва над таблица 12.1. Напрежението се поддържа неизменно за всички честоти.

3. Построява се честотната характеристика:



ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 13

ИЗСЛЕДВАНЕ ДЕЙСТВИЕТО НА ИМПУЛСНИ СХЕМИ -
ТРАНЗИСТОРЕН МУЛТИВИБРАТОР, ДИФЕРЕНЦИРАЩА ВЕРИГА
И ТРАНЗИСТОРЕН ТРИГЕР

Протокол

Студент:	(име, презиме, фамилия)	
Фак.№	Група	Курс
Форма на обучение	Семестър	
Дата:	Подпис:	

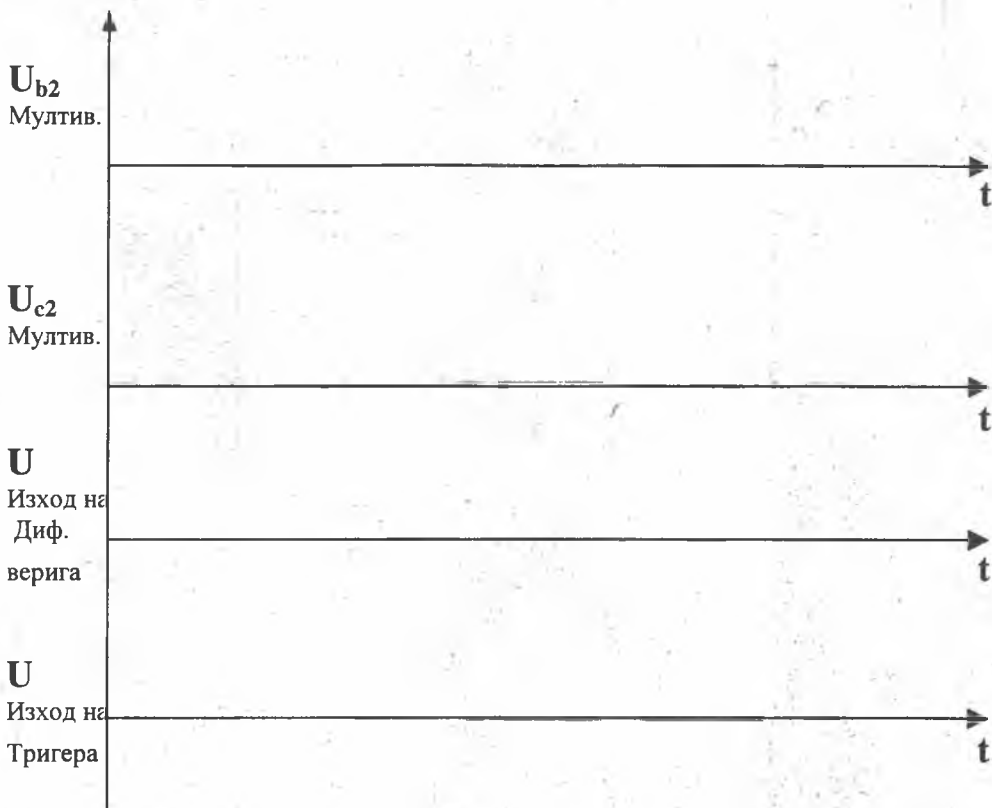
Дата:	Преподавател:	ЛР № 13
-------------	---------------------	---------

Опитни данни и резултати от изчисленията. Осцилограми и графики.

$$R_{b1} = R_{b2} = \quad C_1 = C_2 =$$

Изчислено: $t_1 = t_2 =$ $T =$ $f =$

Графики



ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 14

ОПЕРАЦИОНЕН УСИЛВАТЕЛ: ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОСНОВНИТЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ И РАЗУЧАВАНЕ НА НЯКОИ ПРИЛОЖЕНИЯ

Протокол

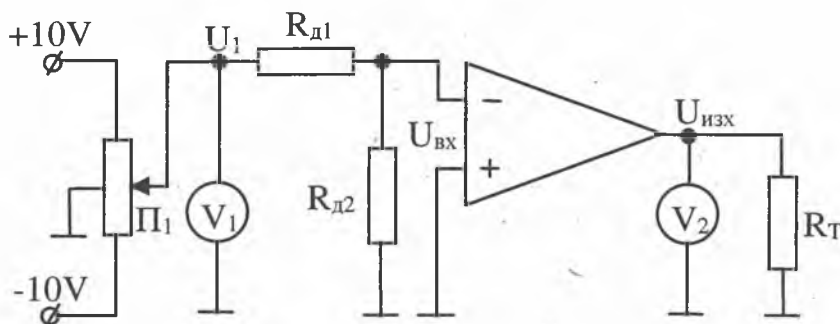
Студент:	(име, презиме, фамилия)	
Фак.№	Група	Курс
Форма на обучение	Семестър	
Дата:	Подпис:	

Дата:	Преподавател:	ЛР № 14
-------------	---------------------	---------

Опитни данни и резултати от изчисленията.

1. С помощта на схемата от фиг. 14.8, която се реализира върху лабораторния макет, се определя коефициентът на усилване на усилвателя без обратна връзка и се снима амплитудната характеристика на операционен усилвател

Пояснение: променяйки стойността на напрежението U_1 се постига нулева (или близка до нея) стойност на изходното напрежение $U_{изх}$. При $U_{изх}=0$ се определя входното напрежение на несиметрия с помощта на волтметър V_1 и резисторния делител, вграден в макета ($R_{д1} - R_{д2}$):



Фиг. 14.8

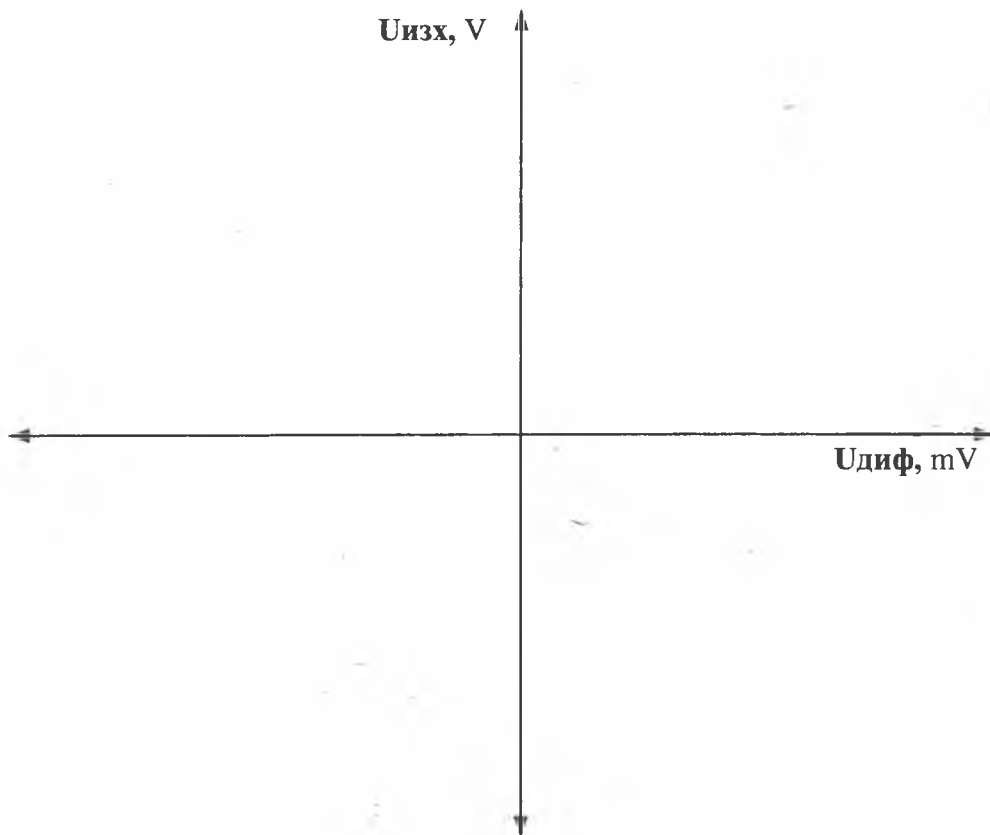
$$U_{вх.нес.} = U_1 \frac{R_{д2}}{R_{д1} + R_{д2}} = 0,001 \cdot U_1,$$

където $\frac{R_{д2}}{R_{д1} + R_{д2}} = 0,001$

е коефициентът на предаване на делителя. Резултатите се нанасят в табл.14.1. Коефициентът на усилване на усилвателя без обратна връзка се определя като средна стойност $K_{ср}$. от четири стойности:

Построява се графиката на **амплитудната характеристика** на усилвателя и върху нея се означават входното напрежение на несиметрия $U_{вх.нес.}$, както и допустимите работни стойности на входното и изходното напрежение $\pm U_{вх.max}$ и $\pm U_{изх.max}$.

Амплитудна характеристика на операционен усилвател



2. Да се изчисли коефициентът на предаване по напрежение на стабилизиращата верига на отрицателната обратна връзка β , който обезпечава остатъчно изходно напрежение $U_{изх.ост.}$ на операционния усилвател не повече от $0,1 V$. За целта да се използват резултатите, получени в предната точка и изразите 14.3 и 14.4.

$K_{ов} =$.

$\beta =$.

3. Да се реализира схемата за събиране и промяна на знака (фиг.14.6) и се провери действието ѝ за три различни стойности на събираемите. Резултатите да се поместят в табл.14.2.

4. Да се свърже схемата на генератор на синусоидално напрежение с мост на Вин във веригата на положителната обратна връзка (фиг.14.7). Предварително се изчислява честотата на изходното напрежение на генератора (формула 14.9) със стойностите на предоставените резистори и кондензатори. Опитно се проверява резултата с помощта на включен на изхода на генератора осцилоскоп. Данните от изчислението и измерването се поместват в протокола:

f - честота на генератора с мост на Вин	
Изчислена, Hz	Измерена, Hz

ЛАБОРАТОРНА РАБОТА № 15

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЛОГИЧЕСКИ ЕЛЕМЕНТИ И СХЕМИ

Протокол

Студент:		
(име, презиме, фамилия)		
Фак.№	Група	Курс
Форма на обучение	Семестър	
Дата:	Подпис:	

Дата:	Преподавател:	ЛР № 15
-------------	---------------------	---------

Опитни данни и резултати от изчисленията.

1. Измерване напрежението на логическата стойности "0" и "1":

Напрежение на двете логически стойности	Лог. "1" - "ТТЛ-схеми"	Лог. "0" - "ТТЛ-схеми"
	[V]	[V]

2. Реализиране на логически функции с двувходови ТТЛ "И-НЕ" (NAND).

3. Таблицы на истинност и схемна реализация на зададена от преподавателя логическа функция.

Функция "И"(AND) - фиг. 15.2				Функция "ИЛИ" (OR) - фиг. 15.3				
X_1	X_2	$\overline{X_1 X_2}$	Y	X_1	X_2	$\overline{X_1}$	$\overline{X_2}$	Y
0	0			0	0			
0	1			0	1			
1	0			1	0			
1	1			1	1			

Литература

1. И. Тонев, В. Буцев, К. Куртев - "Електротехника и електроника", изд. "Техника", София, 1991.
2. Ръководство за лаб. у-ния по "Електротехника и електроника" за ВХТИ - София, Печатна база към МНП, 1989 г., София.
3. Ръководство за лаб. у-ния по "Електротехника, електрически измервания и електроника" за ВХТИ - София, Печатна база към МНП, 1984 г., София.
4. Ръководство за лаб. у-ния по "Приложна електротехника и електроника" за ВХТИ - София, Печатна база към МНП, 1979 г.
5. Ръководство за лаб. у-ния по "Приложна електротехника и електроника" за ВХТИ - София, Печатна база към МНП, 1975 г.

Ръководство
за лабораторни упражнения
по електротехника и електроника

Автори: доц. д-р Асен Гадавелов, гл. ас. Антон Андонов, ст. ас. В. Тодоров,
доц. д-р Андрей Мирев, гл. ас. Емилия Евлогиева, ас. Румен Бъчварски

Пето преработено и допълнено издание

Формат 70x100/16

Печатни коли 11

ISBN 954-9740-20-X

Издателство •НОВИ ЗНАНИЯ•

1797 София

бул. "Климент Охридски" № 1А

тел.: 02/73-76-43, факс: 02/971-36-00

E-mail: bcteling@mgu.bg