

Ц. Върбов  
Д. Петров

П. Петров  
Г. Велев

***ПРАКТИКУМ  
ПО  
ЕЛЕКТРОТЕХНИКА  
И ЕЛЕКТРОНИКА***

Първо издание

ГАБРОВО  
2021

## **АВТОРСКИ КОЛЕКТИВ**

**гл. ас. д-р инж. Цвятко Колев Върбов**  
**доц. д-р инж. Петър Колев Петров**  
**доц. д-р инж. Георги Цонев Велев**  
**доц. д-р инж. Димитър Петков Петров**

© Авторски колектив, 2021

© Университетско издателство

„Васил Априлов“, 2021

**ISBN 978-954-683-652-6**

## ПРЕДГОВОР

Настоящото учебно пособие е предназначено за студентите от неелектротехническите специалности на Техническия университет - Габрово.

Тематиката на лабораторните упражнения съответства на учебната програма по дисциплината “Електротехника и електроника”.

В ръководството е отделено внимание на организацията на работата в лабораторията и реда при провеждане на лабораторните занятия и са изложени основните изисквания по техническа безопасност при работа с електрически съоръжения.

В съдържателно отношение лабораторните упражнения са еднакви и съдържат следните основни раздели: цел на упражнението, основни теоретични положения, схеми на опитните постановки, програма на работа и контролни въпроси.

В първия раздел са формулирани целите, които трябва да се постигнат с изпълнението на съответното упражнение.

Отделните упражнения съдържат теоретична част, чието изучаване ще спомогне за затвърждаване и разширяване на знанията, получени от лекциите и насочва студентите към онези въпроси, които се изследват експериментално. Тук са дадени формулите, чрез които се обработват резултатите от експерименталните изследвания.

В третия и четвъртия раздел са дадени схемите на опитните постановки, посочени са реда и начините за провеждане на изследванията, а също така и указания за обработка на получените резултати.

Предложените контролни въпроси, в края на всяко упражнение, ще подпомогнат студентите при подготовката им за провеждане на лабораторните занятия.

Възприетото в ръководството изложение на материала, по наше мнение, способства за засилване на теоретичната подготовка на студентите, а изпълнението на упражненията ще доведе до придобиване от тях на навици за самостоятелно изследване на електрически вериги, измерване на електрически, магнитни и неелектрически величини, изследване на трансформатори, електрически машини и електронни схеми и устройства.

Участието на авторите при разработването на лабораторните и семинарните упражнения е, както следва: доц. д-р инж. Д. Петров - общите въпроси и лабораторни упражнения №5, №7, №8, №13, №14 и съвместно с гл. ас. д-р инж. Ц. Върбов - №6, №9 и №11; гл. ас. д-р инж. Ц. Върбов – от №1 до №4, №10, №12, №16, №17 и съвместно с доц. д-р инж. Г. Велев - №15; доц. д-р инж. П. Петров съвместно с доц. д-р инж. Г. Велев - семинарни упражнения от №1 до №6.

Авторите ще приемат с благодарност всички забележки, мнения и препоръки по съдържанието на учебното пособие, като молят те да се изпращат на адрес: 5300, Габрово, Технически университет, катедра “Основи на електротехниката и електроенергетиката”.

Авторите



## **ОРГАНИЗАЦИЯ НА РАБОТАТА В ЛАБОРАТОРИЯТА И УКАЗАНИЯ ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА УПРАЖНЕНИЯТА**

Лабораторните упражнения по дисциплината “Електротехника и електроника” имат за цел студентите да затвърдят теоретичните си знания и да придобият определени практически навици. Основните задачи, които се поставят пред студентите, са:

1. Изучаване и изследване на явленията и процесите, протичащи в електрическите и магнитните вериги, и създаване на навици за осъществяване на експериментални изследвания.

2. Запознаване с конструкцията, принципа на действие и основните характеристики на електроизмервателните уреди, електрическите машини и трансформаторите и тяхното практическо приложение.

3. Изучаване на основните полупроводникови елементи и тяхното практическо приложение.

4. Прилагане на методите за измерване на електрически, магнитни и някои неелектрически величини, както и запознаване с начините за оценка на точността от измерването.

5. Обработка на получените резултати, изобразяване на графични зависимости, построяване на векторни диаграми, анализ на резултатите от експерименталните изследвания.

За провеждане на лабораторните занятия се формират подгрупи, състоящи се от няколко студента. Най-добри резултати се постигат, когато тези подгрупи включват 2-3 студента.

На първото занятие преподавателят разпределя студентите по подгрупи, съобщава им реда за провеждане на лабораторните упражнения, препоръчва им необходимата литература, запознава ги с методиката на провеждане на занятията, дава указания за специфичните особености на работата в лабораторията и ги запознава с изискванията по техническа безопасност.

Всеки студент е длъжен внимателно да се запознае с правилата за безопасна работа в лабораторията и да удостовери със своя подпис в дневника за техника на безопасност, че е поел задължението да ги съблюдава при провеждане на занятията в лабораторията.

Студентите предварително се подготвят за изпълнението на съответното лабораторно упражнение. Подготовката включва: изучаване на съответните раздели от теоретичния курс, изложен в лекциите и в учебната литература, запознаване със съдържанието на лабораторното упражнение от настоящото учебно пособие, начертаване на схемите на опитните постановки и записване на основните пунктове от програмата за работа в бланката за протокол, изясняване как ще се провеждат лабораторните изследвания по предложените схеми, кои величини ще се получат експериментално, кои ще се изчислят и по какви зависимости.

Всяко упражнение започва с проверка на готовността на студентите за предстоящото лабораторно упражнение и даване на съответни указания от страна на преподавателя. Неподготвените студенти не се допускат до изпълнение



на упражнението, а се задължават по време на занятието в лабораторията да изучат материала, който не са усвоили и след това допълнително да проведат упражнението.

Изпълнението на всяко лабораторно упражнение започва с осъществяване на електрическите вериги, съгласно схемите на опитните постановки. При това отначало се свързва последователната (токовата) верига, като се използват едноцветни проводници с подходящо сечение. Започва се от единия извод на захранващия източник и се завършва на другия му извод. След това, също с едноцветни проводници, се реализират напрехителните вериги, които се свързват към съответните точки на последователната верига. Навсякъде трябва да се използват проводници с подходяща дължина и да се избягва свързването към даден извод на голям брой проводници.

Преди включването на схемата под напрежение, регулируемите елементи (автотрансформатори, потенциометри, реостати) трябва да са в такова положение, че да осигуряват минимално (нулево) напрежение и ток към измервателната схема. При уреди с поляритет и фазочувствителни уреди (ватметри и др.) трябва да се съблюдава правилното свързване на изводите.

**Включването на електрическата верига под електрическо напрежение може да стане само след като тя бъде проверена от преподавателя.**

При провеждане на експериментални изследвания студентите трябва да избират подходящи обхвати на измервателните уреди, така че относителната грешка е най-малка. Студентите внимателно отчитат показанията на уредите и записват резултатите в тетрадките си. След приключване на работата по определена схема на опитната постановка те представят получените резултати на преподавателя. Ако той ги одобри, студентите разсъединяват схемата и осъществяват следващата. След завършване на предвидения обем експериментална работа в лабораторното упражнение, всички проводници се поставят на определеното за тях място, подреждат се уредите и работните места.

Преди изключването на схемата, регулируемите елементи (автотрансформатори, потенциометри, реостати) се поставят в положение на минимално (нулево) напрежение и ток към измервателната схема.

**При използване на автотрансформатори, разсъединяване на електрическата верига на схемата се извършва след изключване на автотрансформатора от захранващата мрежа.**

Получените резултати студентите обработват частично в лабораторията, а като самостоятелна работа завършват изчисленията и оформят протокола.

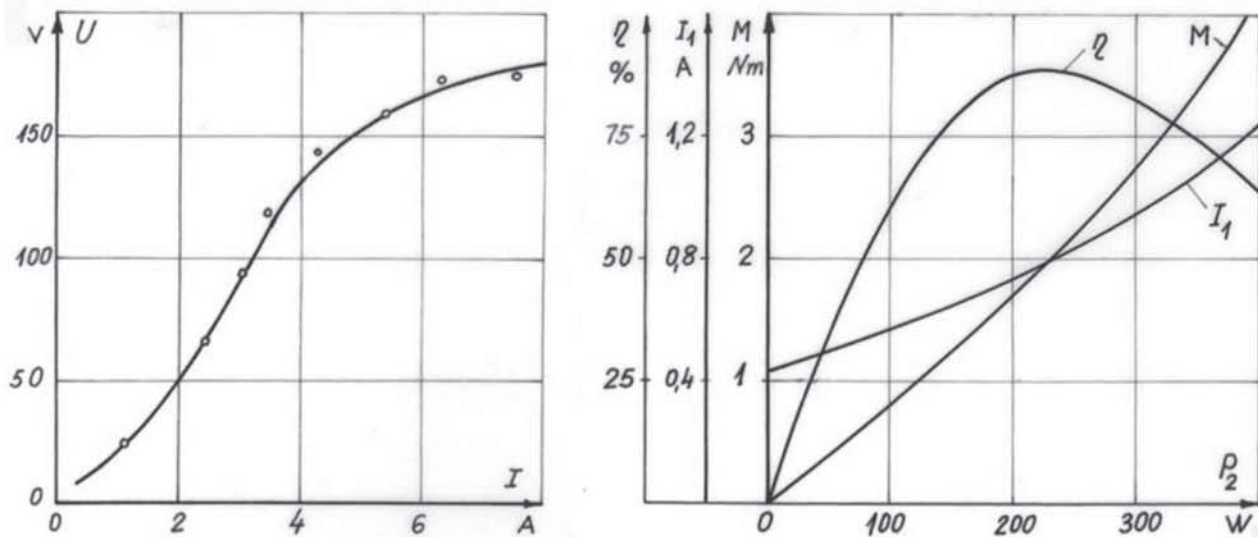
При оформянето на протокола схемите на опитната постановка, графичните зависимости и векторните диаграми трябва да се начертаят с молив и чертожни принадлежности. Когато в една координатна система трябва да се изобразят няколко графични зависимости, то те могат да се начертаят, за по-голяма прегледност, с различни цветове.

Когато се изобразяват графични зависимости трябва най-напред да се избере подходяща дължина на координатните оси и до всяка ос до се означи с буква изобразяваната величина и нейната дименсия. Осите се разграфяват с подходящ мащаб, като около всяко деление се поставя съответстващата му числена



стойност. След това се изобразяват с помощта на точки получените резултати и с плавна линия, прекарана възможно най-близко до точките, се построява съответната зависимост (фиг. 1а). Само в случаите, когато изследваната зависимост не изразява определен закон на изменение, то точките се съединяват помежду си с права линия (например, когато се чертаят графики на грешки).

Ако в една координатна система трябва да се изобразят няколко графични зависимости, представляващи функция на една и съща променлива, то за всяка величина се построява отделна ординатна ос (фиг. 1б) със съответен мащаб.



а/

б/

фиг. 1б

При оформяне на протоколите студентите трябва да отделят особено внимание на анализа на получените резултати, като ги сравнят с известните теоретични зависимости и обяснят причините за различията.

Напълно завършен протоколът се представя за проверка от преподавателя на следващото занятие. Студентите, не представили протоколи, не се допускат до изпълнение на следващите упражнения.

## ИЗИСКВАНИЯ ПО ТЕХНИЧЕСКА БЕЗОПАСНОСТ ПРИ РАБОТА С ЕЛЕКТРИЧЕСКИ СЪОРЪЖЕНИЯ

Електрическите съоръжения в лабораторията по електротехника и електроника, при определени условия могат да предизвикат поражение от електрически ток, а също така наранявания от въртящите се части на електрическите машини. Тъй като човешкото тяло е електропроводимо, то при съприкосновение с неизолирани части на електрическите съоръжения, които са под напрежение, през тялото на човека ще протече електрически ток. Той може да предизвика изгаряне на кожата или да нанесе тежки поражения на нервната, сърдечната и дихателната система (електрически удар). Установено е, че както постоянен, така и променлив ток с големина по-голяма от 0,03 А е опасен, а при протичане през човешкия организъм на ток 0,1 А изходът е смъртоносен.



За да може да се оцени какво напрежение е безопасно за човешкия организъм, трябва да се знае неговото съпротивление. То е много променливо, тъй като зависи от състоянието на кожата, психологическото състояние и други причини. При определяне на тока през човешкото тяло е прието да се използва стойност от 1000 ома. Ясно е, че при неблагоприятни условия напрежение по-голямо от (40 - 60) V може да предизвика електрически удар.

За да се осигури безопасна работа при изпълнението на упражненията в лабораторията, студентите трябва да съблюдават следните изисквания:

1. При работа с електрически съоръжения, намиращи се под напрежение, трябва да се помни за опасността от поражение от електрически ток и да се работи с необходимата предпазливост и повишено внимание.

2. Изключените кондензатори могат да съхраняват опасен заряд. Затова преди всяко включване или след изключването им е необходимо те да се разредят.

3. Не се допуска при осъществяването на схемите да се използват проводници с повредена изолация или без крайници. Проводниците трябва така да се съединят към изводите на измервателните уреди и електрическите съоръжения, че да не съществува опасност при работа да се прекъсне електрическата верига.

4. Включването на електрическите вериги под напрежение от страна на студентите се извършва с разрешение и в присъствие на преподавателя. Не се допуска студентите да включват прекъсвача на главното табло.

5. При провеждане на измервания не се допуска студентите да извършват под напрежение каквито и да са изменения в схемите или да се докосват до неизолирани проводници и изводи.

6. Не трябва да се прекъсва веригата на вторичната намотка на токовите трансформатори, когато през първичната протича електрически ток, тъй като при това ще се индуцират напрежения, които са опасни както за хората, така и за изолацията на намотките.

7. С особено внимание трябва да се работи при изследване на електрически машини, като не се допуска съприкосновение с въртящите им се части.

8. Разсъединяването на електрическите вериги и промяна във схемата на свързване се извършва след като е изключено захранването им, а роторите на електрическите машини са неподвижни. При използване на автотрансформатори, разсъединяване на електрическата верига на схемата се извършва след изключване на автотрансформатора от захранващата мрежа.

9. При откриване на неизправност в измервателните уреди или в електрическите съоръжения трябва да се изключи незабавно напрежението и да се съобщи на ръководителя на упражненията.

10. При поражение от електрически ток незабавно да се изключи напрежението на електрозахранващата мрежа чрез прекъсвача на главното табло и на пострадалия да се окаже първа медицинска помощ. Телефон 112 приема спешни и аварийни обаждания при необходимост от спешна медицинска помощ, помощ при пътно-транспортни произшествия, пожари, аварии, кризи и други инциденти с човешки и материални загуби.



## КРАТКИ СВЕДЕНИЯ ЗА ИЗМЕРВАНИЯТА И ЗА ИЗМЕРВАТЕЛНИТЕ УРЕДИ

Измервателните методи могат да бъдат преки и косвени. При преките методи стойността на измерваната величина се определя непосредствено като се отчита от измервателния уред или се сравнява с еднородна на нея величина. Косвените методи се характеризират с това, че стойността на величината се определя чрез измерване на други величини, като се вземат предвид съотношенията между тях (например определяне на съпротивление чрез показанията на волтметър и амперметър).

Електроизмервателните уреди се делят на две основни групи - аналогови и цифрови. При аналоговите уреди показващото устройство следи непрекъснато изменението на измерваната величина. В зависимост от принципа на действие те се разделят на няколко вида, чиито основни характеристики са дадени в таблица 1.

При цифровите уреди стойностите на измерваната величина се получават в дискретна форма - във вид на числа. Тяхното регистриращо устройство ще покаже нова стойност на измерваната величина само, ако нейното изменение превиши определена стойност ( $\Delta X$ ) или след изтичането на определен интервал от време ( $\Delta t$ ).

Върху измервателните уреди (най-често върху скалата им) се нанасят редица характерни данни. Най-ясно от всички се означава величината, която се измерва, напр. амперметър (A), ватметър (W). Означава се вида на тока, който може да се измерва с уреда - постоянен (—), променлив (~), класът на точност, измервателната система, означена символично (както е дадено в таблица 1), обхвати, работно положение на уреда, фабричен номер, изпитвателното напрежение на изолацията на уреда. В зависимост от вида на уреда се означават и някои други данни (честотен диапазон, собствено съпротивление на уреда и др.).

За да се отчете от даден аналогов уред стойността на измерваната величина, е необходимо да се определи константата му. Тя представлява стойността на измерваната величина, съответстваща на едно скално деление и може да се изрази с отношението на обхват на който работим към общия брой скални деления.

Стойността на величината се определя като произведение от константата на уреда  $k$  и броят на деленията  $\theta$ , съответстващи на отклонението на стрелката, т.е.  $X = k \theta$ .

За измервателните уреди се дефинират следните видове грешки:

1. Абсолютна грешка  $\Delta X$  се нарича разликата между измерената с уреда стойност  $X$  и действителната стойност  $X_0$  на величината.

$$\Delta X = X - X_0 .$$

2. Относителна грешка  $\varepsilon$  се нарича отношението на абсолютната грешка  $\Delta X$  към действителната стойност на измерваната величина, изразено в проценти:

$$\varepsilon \% = \frac{X - X_0}{X_0} 100 = \frac{\Delta X}{X_0} 100.$$

Таблица 1

Система на уреда	Графично означение	Приложение	Вид на тока	Най-висок клас на точност	Честотен обхват
Магнитоелектрическа		A, V, $\theta$ , $\Omega$	—	0,05	—
Магнитоелектрически логометър		$\Omega$	⊔	1,5	—
Термоелектрическа		A, V	⊔	0,5	10Hz + 100MHz
Детекторна		V, A, $\Omega$	⊔	1,0	10Hz + 20kHz
Електромагнитна		A, V	⊔	0,2	40Hz + 10kHz
Електродинамична		A, V, VV, $\cos \varphi$	⊔	0,1	40Hz + 20kHz
Феродинамична		A, V, VV	⊔	0,5	10Hz + 1,5kHz
Индукционна		VV, kVVh	~	1,0	50Hz
Електростатична		V	⊔	0,05	20Hz + 30MHz
Вибрационна		Hz, V	~	0,2	10Hz + 1,5kHz

3. Приведена относителна грешка  $\varepsilon_H$  се нарича отношението на абсолютната грешка  $\Delta X$  към обхвата  $X_H$  на уреда, изразено в проценти:

$$\varepsilon_H \% = \frac{X - X_0}{X_H} 100 = \frac{\Delta X}{X_H} 100.$$

От максималната стойност на приведената грешка се определя класът на точност на уреда. Аналоговите уреди имат следните класове на точност : 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1,0 ; 1,5 ; 2,5 ; 4,0. При аналоговите уреди, класът на точност на уреда е показан на самия уред. При цифровите мултиметри, класът на точност на уреда на различните обхвати е даден в паспорта на уреда.

Относителната грешка обикновено е по-голяма от приведената, понеже  $X_H \geq X$ . Следователно, за повишаване на точността на измерването е необходимо да се работи с подходящ обхват на измервателния уред, така че отчитането да става в края на скалата или обхвата.



## ЛАБОРАТОРНИ УПРАЖНЕНИЯ

### ЛАБОРАТОРНО УПРАЖНЕНИЕ №1

## ИЗМЕРВАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКО НАПРЕЖЕНИЕ И ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТОК

### *Цел на упражнението*

Електрическите величини напрежение и ток са най-често използваните за анализ на процесите при производството, преноса и потреблението на електрическа енергия. Много често в ежедневието се налага тяхното измерване и анализ. Целта на упражнението е запознаване с правилата за работа с амперметър и волтметър и възможностите за разширяване на обхватите им.

### *Основни теоретични положения*

**Измерване с амперметър и волтметър.** Амперметрите са предназначени за измерване големината на електрическия ток в даден клон на електрическата верига. Те се свързват последователно на консуматора, чийто ток измерват. Амперметрите имат много малко вътрешно съпротивление.

Волтметрите са предназначени за измерване на електрическо напрежение. Свързват се паралелно на консуматора или в точките, между които е необходимо да се измери напрежението. Волтметрите имат много голямо вътрешно съпротивление.

В електротехниката токът се разделя на постоянен и променлив, според начина, по който той се изменя във времето. Постоянно протичащия в една посока ток се нарича постоянен ток (*DC — Direct Current*), а когато посоката на протичане на тока се променя периодично, той е променлив ток (*AC — Alternating Current*). Променливият ток се влияе от електрически свойства, които не засягат постоянния ток, като индуктивност и електрически капацитет.

Непосредственото измерване на електрически ток или напрежение се извършва с цифрови или аналогови измервателни уреди.

Отчитането измерваната величина от аналогов /стрелкови/ уред, притежаващ един измервателен обхват се извършва непосредствено от скалата му. Голяма част от измервателните уреди обаче са многообхватни а имат само една скала. За да се определи измерваният ток или напрежение, необходимо е да се пресметне константа на уреда за съответния обхват. За амперметър

константата е  $k_A = \frac{I_H}{\theta_H}$ , а за волтметър -  $k_V = \frac{U_H}{\theta_H}$ , където  $I_H$  и  $U_H$  са съответните

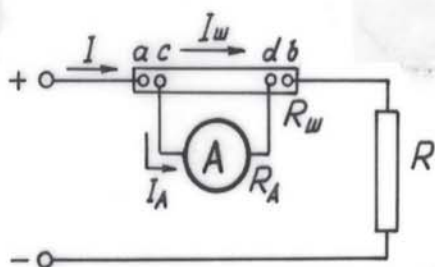
обхвати за ток и напрежение, а  $\theta_H$  е общият /номинален/ брой скални деления. Константите трябва да се изразяват със съответни единици, например  $\frac{A}{\text{дел.}}$ ,  $\frac{mA}{\text{дел.}}$ ,  $\frac{\mu A}{\text{дел.}}$ ,  $\frac{V}{\text{дел.}}$  и т.н. Измерваният ток или напрежение се намират като се

умножи така получената константа по броя на деленията  $\theta$  на показващия елемент /стрелката/, т.е.

$$I = k_A \cdot \theta, \text{ A} \quad \text{или} \quad U = k_V \cdot \theta, \text{ V}.$$



**Разширяване обхвата на амперметри.** За амперметрите, с които се измерва постоянен ток, разширяването на обхвата се извършва с шунт, както е показано на фиг.1.1. Шунт  $R_{ш}$  е резистор с малко съпротивление, който има две двойки изводи - токови и потенциални. Първите от тях /a,b/ се свързват в клоната



Фиг. 1.1

с измервания ток  $I$ , а към вторите /c,d/ се свързва амперметърът, чийто обхват се разширява. През шунта трябва да протича ток  $I_{ш}$ , такъв че токът през амперметъра  $I_A$  да не бъде по-голям от обхвата му  $I_H$ .  $R_A$  и  $R$  са съответно съпротивленията на амперметъра и на консуматора.

Отношението  $n$  на разширения обхват  $I'_H$  към номиналния /неразширения/ обхват се нарича кратност на разширяването на обхвата по ток или шунтов множител, т.е.

$$n = \frac{I'_H}{I_H} = \frac{I}{I_A}, \quad \text{или} \quad I = I_A \cdot n \quad (1.1)$$

Имайки предвид

$$I_A \cdot R_A = I \cdot \frac{R_A \cdot R_{ш}}{R_A + R_{ш}},$$

следва 
$$n = \frac{I}{I_A} = \frac{R_A + R_{ш}}{R_{ш}} = 1 + \frac{R_A}{R_{ш}}$$

или 
$$R_{ш} = \frac{R_A}{n-1}, \Omega. \quad (1.2)$$

Константата на амперметър с разширен обхват е

$$k'_A = \frac{I'_H}{\theta_H} = n \cdot \frac{I_H}{\theta_H} = n \cdot k_A, \frac{A}{\text{дел}}. \quad (1.3)$$

Разширяването на обхватите на амперметрите за променлив ток се извършва с помощта на токови измервателни трансформатори. Схемата е показана на фиг.1.2. Първичната намотка на трансформатора, означена с  $L_1$ - $L_2$ , се свързва в клоната, чийто ток се измерва. Към вторичната намотка, означена с  $I_1$ - $I_2$ , е свързан амперметърът, чийто обхват се разширява. Отношението на тока в първичната намотка към тока във вторичната намотка се нарича коефициент на трансформация /преводно отношение/ на токовия трансформатор, което показва колко пъти е разширен обхвата на амперметъра, т.е.

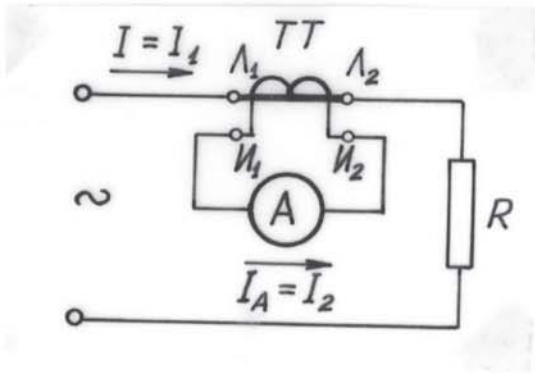
$$k_I = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I'_H}{I_H}, \quad (1.4)$$

където  $I'_H$  е разширеният обхват на амперметъра. Константата на аналогов амперметър в този случай е

$$k'_A = \frac{I'_H}{\theta_H} = k_I \frac{I_H}{\theta_H} = k_I \cdot k_A, \frac{A}{\text{дел}} \quad (1.5)$$

Токът отчетен от свързания към вторичната намотка амперметър се умножава по коефициент на трансформация  $k_{IH}$  за да получим токът  $I_1$ .

$$I_1 = I_2 \cdot k_I \quad (1.6)$$



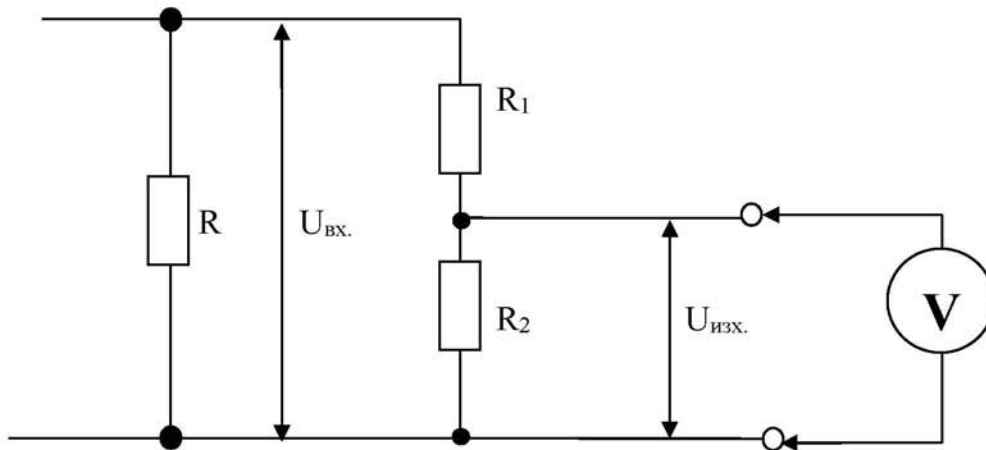
Фиг. 1.2

При работа с токов измервателен трансформатор трябва да се има предвид, че работния режим на вторичната му намотка е близък до режима на късо съединение /свързаните в нея амперметри или токови намотки на други измервателни уреди имат незначителни съпротивления/. Затова, когато през първичната намотка на трансформатора протича ток, вторичната не трябва да се оставя отворена, понеже това може да доведе до повреждане на намотката му, а от друга страна крие опасност и за работещите с него. По тази причина във вторичната намотка на токовите трансформатори се свързва на късо, когато към нея няма измервателен уред.

Съществуват токови трансформатори във вид на клещи, магнитопроводът, на които се състои от две шарнирно свързани части, които обхващат тоководещия проводник. Обхванатият проводник се явява първична намотка на трансформатора, а вторичната е навита по подходящ начин върху магнитопровода. По този начин токът се измерва без прекъсване на тоководещия проводник.

**Разширяване на обхватите на волтметрите.** Най-удобно е това да се извършва с допълнителни резистори, тъй като те могат да се използват при волтметри за постоянно и променливо напрежение. Чрез резисторите се реализира делител на напрежение, с който се понижава измерваното напрежение до желана стойност. Чрез коефициента на делителя се коригира отчетената на уреда стойност и се получава търсеното измервано напрежение. На фиг.1.3 е показана такава схема. Чрез резисторите  $R_1$  и  $R_2$  се реализира делителя на напрежение. Напрежението върху резистора  $R_2$  не трябва да надвишава обхвата на волтметъра. При реализиране на делителя на напрежение се използват резистори с голямо съпротивление и необходимата мощност. Трябва да се има предвид и вътрешното съпротивление на волтметъра трябва да бъде много по-голямо от съпротивлението на резистора  $R_2$  (съвременните цифрови волтметри имат вътрешно съпротивление  $\sim 10\text{M}\Omega$ ). Числото  $m$ , показващо колко пъти е увеличен обхвата на волтметъра, се нарича кратност на разширение на обхвата по напрежение или множител за напрежение

$$m = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{U_{\text{вх.}}}{U_{\text{изх.}}}, \quad (1.7)$$



Фиг. 1.3

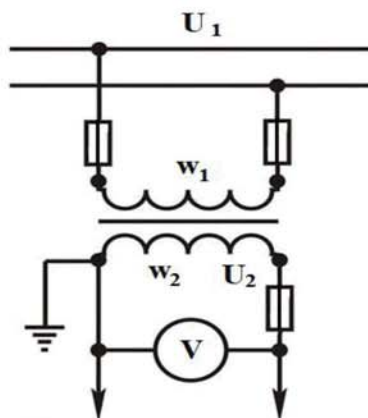
От формула (1.7) следва:

$$U_{вх.} = U_{изх.} \cdot m = U_V \cdot m \quad (1.8)$$

Константата на волтметра с разширен обхват е

$$k_V' = \frac{U_n'}{\theta_n} = m \cdot \frac{U_n}{\theta_n} = m \cdot k_V, \quad \frac{V}{дел.} \quad (1.9)$$

При измерване на променливи напрежения, по-високи от 1000 V обикновено се използват напреженови измервателни трансформатори. По принцип на действие и режим на работа те не се различават от останалите трансформатори. При използване на напрежителен измервателен трансформатор обхватът и константата на волтметра се увеличават толкова пъти, колкото е коефициента на трансформация  $k_U = \frac{U_1}{U_2}$  на трансформатора.



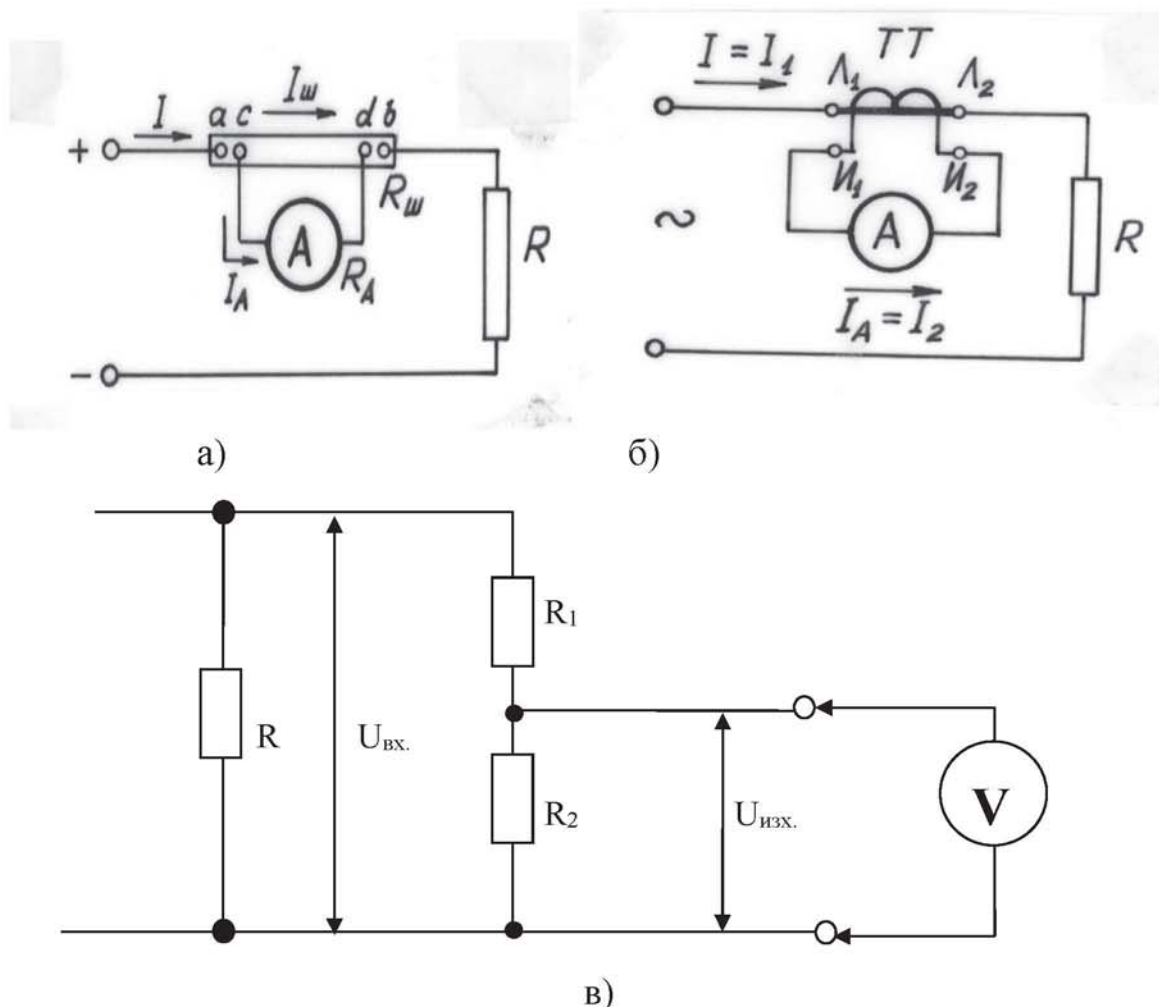
Фиг. 1.4

С  $U_1$  и  $U_2$  са означени напреженията в първичната и вторичната намотки на трансформатора. Поради работа с опасно високо напрежение, се поставят предпазители на първичната и вторична намотка и се заземява вторичната намотка.

$$U_1 = U_2 \cdot k_U \quad (1.10)$$



Схеми на опитните постановки



в)  
Фиг. 1.4

Програма на работа

1. Да се разшири обхвата на амперметър с шунт съгласно схемата от фиг.1.4а, в която последователно на съпротивлението  $R$  да се включи контролен амперметър. При различни стойности на  $n$  да се направят няколко измервания. Резултатите да се нанесат в таблица 1.1.

Таблица 1.1

№	$I_H =$			
	$I_A$	$n$	$R_{ш}$	$I$
	А	-	$\Omega$	А

2. Да се разшири обхватът на амперметър за променлив ток посредством токов измервателен трансформатор съгласно схемата от фиг.1.4б, в която последователно на съпротивлението  $R$  да се включи контролен амперметър. Да

се направят измервания при различни коефициенти на трансформация. Резултатите да се нанесат в таблица 1.2.

Таблица 1.2

№	$I_H =$		
	$I_A$	$k_1$	$I$
	A	-	A

3. Да се разшири обхватът на волтметър чрез делител на напрежение, реализиран с резисторите  $R_1$  и  $R_2$ , съгласно схемата от фиг.1.4в. При различни стойности на  $m$  (различни стойности на  $R_1$  и  $R_2$ ) да се направят няколко измервания. Резултатите да се нанесат в таблица 1.3.

Таблица 1.3

№	$U_H =$		$R_V =$	
	$U_V$	$R_1$	$R_2$	$m$
	V	$\Omega$	$\Omega$	-

### **Контролни въпроси**

1. По какъв начин се свързват амперметрите и волтметрите?
2. Какво е вътрешното съпротивление на амперметри и волтметри?
3. Какво представлява константата на аналоговите уреди и как се определя?
4. По какъв начин се разширява обхватът на амперметри за постоянен ток?  
Как се определя константата при разширяване обхвата на амперметъра?
5. По какъв начин се разширява обхватът на амперметрите за променлив ток? Как се определя константата на амперметъра в този случай?
6. По какъв начин се разширява обхватът на волтметрите? Как се определя константата при разширяване обхвата на волтметъра?
7. Какви са режимите на работа на токовия и напреженовия измервателни трансформатори?

## ИЗМЕРВАНЕ НА АКТИВНИ СЪПРОТИВЛЕНИЯ

### Цел на упражнението

Измерването на активни съпротивления е най-развитата област от електроизмервателната техника. В инженерната практика се измерват съпротивления в много широк обхват - от  $10^{-8}$  до  $10^{16}$   $\Omega$ . Целта на упражнението е студентите да се запознаят с трите основни метода за измерване на съпротивления, а именно:

1. Измерване посредством уреди за непосредствена оценка.
2. Измерване с приложение на косвени методи.
3. Измерване с приложение на методи и средства за сравнение.

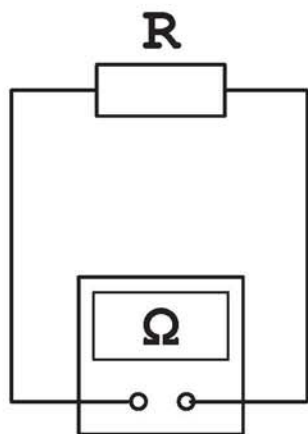
Използването на един или друг от гореизброените методи зависи от редица фактори: порядъка на измерваното съпротивление, необходимата точност на измерването, уредите с които разполагаме, работните условия и т.н.

### Основни теоретични положения

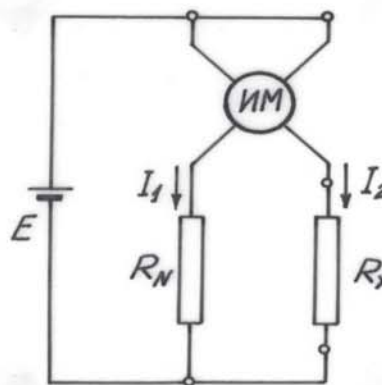
Електрическото съпротивление е противодействието, което оказва електрическа верига на движещите се в нея заряди. То се измерва с единицата **ом** ( $\Omega$ ) или с кратните единици килоом ( $k\Omega$ ), мегаом ( $M\Omega$ ) и т.н.. Съпротивлението на електрическата верига е един ом, ако към нея се приложи напрежение един волт и предизвика протичането на ток един ампер. Когато съпротивлението е свързано с преобразуване на електрическа енергия в друг вид енергия (топлинна, механична и др.) това съпротивление се нарича активно.

### Измерване посредством уреди за непосредствена оценка.

При монтаж, ремонт и експлоатация на електрически и електронни устройства, се използва **омметър** – уред за измерване на електрическо съпротивление. Начинът на свързване на омметър е показан на фиг.2.1. В омметъра има източник на постоянно напрежение, който е необходим при измерването. В практиката се използват цифрови мултиметри, които имат функция и на омметри.



Фиг. 2.1



Фиг. 2.2



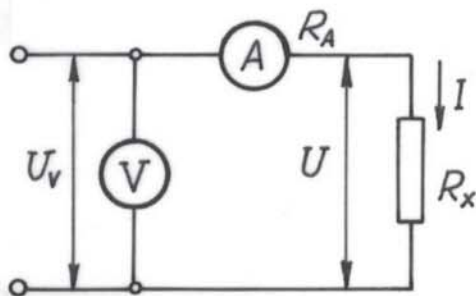
При електрическите устройства и съоръжения се използват електроизолационни материали за осигуряване на нормалната им работа и за осигуряване на електробезопасност. За проверка състоянието на електроизолацията се използват мегаомметри за измерване на съпротивления от порядъка на мегаом  $M\Omega$  и гигаом  $G\Omega$ . При извършване на измерването трябва да се работи с напрежение, което превишава работното напрежение на изолацията. При работа с мегаомметри трябва да се спазват допълнителни правила за електробезопасност свързани с напрежението на изводите на уреда.

В лабораторията ще бъде използван мегаомметър снабден с ръчно задвижван генератор (индуктор), вграден в кутията на уреда. Напрежението, което се получава от такъв генератор е от 500 до 2500 V. Принципната схема на този логотричен мегаомметър е показана на фиг. 2.2. Отклонението  $\alpha$  на подвижната част на логомера зависи от отношението на токовете  $I_1$  и  $I_2$ , протичащи съответно през образцовото и измерваното съпротивление  $R_N$  и  $R_X$ , т.е.

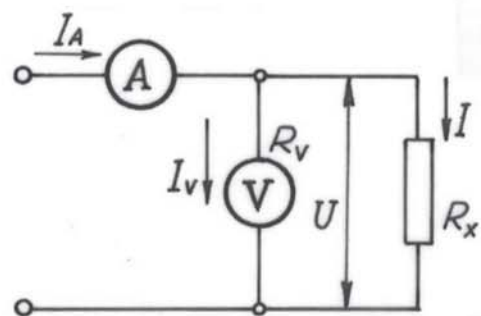
$$\alpha = F \cdot \left(\frac{I_1}{I_2}\right) = F \cdot \left(\frac{R + R_X}{R + R_N}\right) = f(R_X) \quad (2.3)$$

или в крайна сметка отклонението  $\alpha$  зависи от измерваното съпротивление  $R_X$ . В горния израз с  $R$  са означени съпротивленията на подвижните бобини /прието е, че бобините имат еднакви съпротивления/.

**Косвени методи за измерване.** Сред тези методи най-разпространен е методът с амперметър и волтметър, който може да се осъществи при два вида свързвания: V - A (фиг.2.3а) и A - V (фиг.2.3б). Означението на схемите по този начин е в съответствие с реда на свързването на уредите в последователност източник - консуматор (т.е. от ляво на дясно). Ако съпротивлението  $R_X$  се изчислява непосредствено от показанията на двата уреда, получава се не действителната, а неговата приблизителна стойност. Причина за това е собственото съпротивление на уредите, което има крайни стойности (съпротивлението на амперметъра не е нула, а на волтметъра не е безкрайно голямо, както се приема в редица случаи). И при двете схеми вторият уред измерва действителната стойност на съответната величина (ток или напрежение), а първият - показва по-голяма стойност, което се дължи на наличието на втория уред.



а)



б)

Фиг. 2.3

В съответствие с казаното, при схема V - A амперметърът измерва действителния ток  $I$  през съпротивлението, а волтметърът - напрежението  $U_V$ , по-високо от действителното  $U$  поради пада на напрежение  $I.R_A$  върху собственото съпротивление на амперметъра; при схема A - V волтметърът измерва действителното напрежение  $U$  върху измерваното съпротивление, а амперметърът - ток  $I_A$ , по-голям от действителния  $I$ , което се дължи на тока  $I_V$ , протичащ през волтметъра.

Измерената стойност е:

$$R_{VA} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_V}{I} = \frac{U + IR_A}{I} = R_X + R_A, \quad (2.5)$$

$$R_{AV} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U}{I_A} = \frac{U}{I + I_V} = \frac{U}{\frac{U}{R_X} + \frac{U}{R_V}} = \frac{R_X R_V}{R_X + R_V}. \quad (2.6)$$

Относителната грешка, характеризираща точността на измерването е:

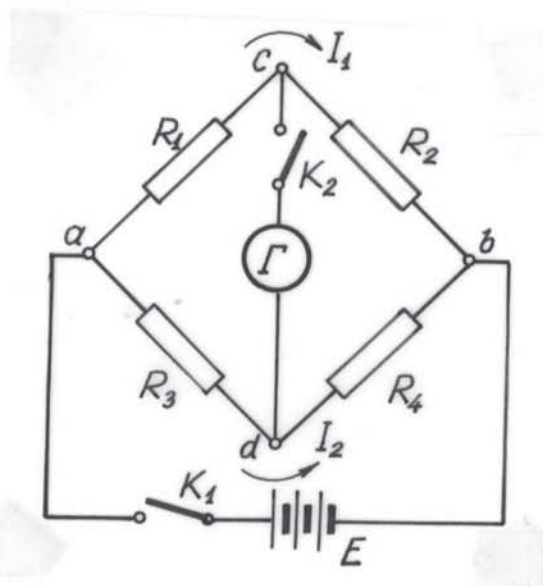
$$\varepsilon_{VA} \% = \frac{R_{VA} - R_X}{R_X} \cdot 100 = \frac{R_A}{R_X} \cdot 100, \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_{AV} \% = \frac{R_{AV} - R_X}{R_X} \cdot 100 = \frac{1}{1 + \frac{R_V}{R_X}} \cdot 100. \quad (2.8)$$

От последните изрази следва, грешката, допускана при схема V - A, е по-малка при измерване на големи съпротивления, а грешката при схема A - V е по-малка при измерване на малки съпротивления. От тези съображения трябва да се избира едната или другата схема.

### Измерване с приложение на методи и средства за сравнение.

Мостовите методи представляват най-важният и най-разпространеният случай на приложение на сравнителните методи. Едновременно с това те осигуряват и най-голяма точност на измерването. За измерване на съпротивления от  $0,1$  до  $10^6 \Omega$ , които се срещат най-често в инженерната практика, се използва единичен (четирираменен) мост, наречен мост на Уитстон. Принципната схема на този мост е показана на фиг.2.4.



Фиг. 2.4



Състои се от четири клона, наречени рамена на моста, в които са включени съпротивленията  $R_1, R_2, R_3, R_4$ . В другите два клона ( $ab$  и  $cd$ ), наречени диагонали на моста, са включени съответно източникът на напрежение  $E$  и индикаторът на равновесие (гальванометърът  $\Gamma$ ), вследствие на което първият диагонал се нарича захранващ, а вторият - измервателен (индикаторен). Гальванометърът е уред за измерване на малки електрични токове. Мостът е в равновесие, когато гальванометърът показва нула, т.е. когато потенциалите в т.  $c$  и  $d$  са равни. Гальванометърът е уред за откриване, сравняване или измерване на малки електрични токове. В този случай, в съответствие с означенията на фиг.2.4, може да се запише

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_3,$$

$$I_1 \cdot R_2 = I_2 \cdot R_4.$$

След почленно разделяне на горните равенства се получава

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{или} \quad R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3.$$

Ако едно от съпротивленията (например  $R_1$ ) е измерваното и го означим с  $R_X$ , следва, че

$$R_X = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}. \quad (2.9)$$

От последното равенство се вижда, че мостът може да се уравни чрез изменение на  $R_2$  при постоянно отношение  $\frac{R_3}{R_4}$  или чрез изменение на отношението  $\frac{R_3}{R_4}$  при постоянно  $R_2$ . В първия случай мостът се нарича магазинен, а във втория - линеен. В действителност чрез изменение на  $\frac{R_3}{R_4}$  при магазинните и  $R_2$  при линейните мостове се изменя обхвата им, което се осъществява чрез стъпално (през един порядък) изменение на посочените величини. Магазинните мостове са значително по точни и точността им е най-голяма, когато съпротивленията  $R_3$  и  $R_4$  са от същия (или най-близък) порядък с измерваното съпротивление.

Кога използваме гореизброените методи:

- Най-удобно и най-често използвано е измерването с омметър (например измерване на съпротивлението на резистори).

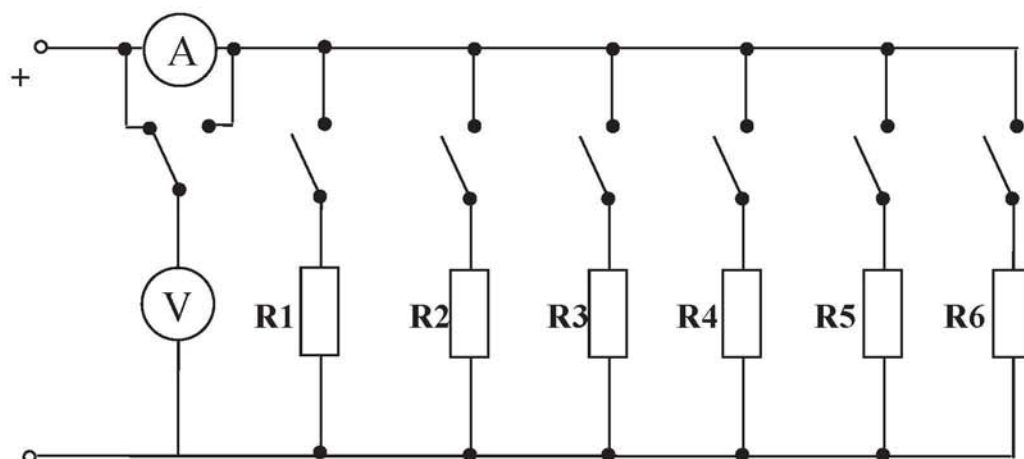
- При измерване с мегаомметър се работи с напрежение превишаващо работното напрежение на изолацията на консуматорите и това позволява нейната вярна проверка (например проверка на изолацията на статорните намотки на трифазен асинхронен двигател).

- При косвените методи можем да измерим съпротивлението на консуматорите в работни условия (например как се променя съпротивлението на електрическа лампа при различни напрежения).

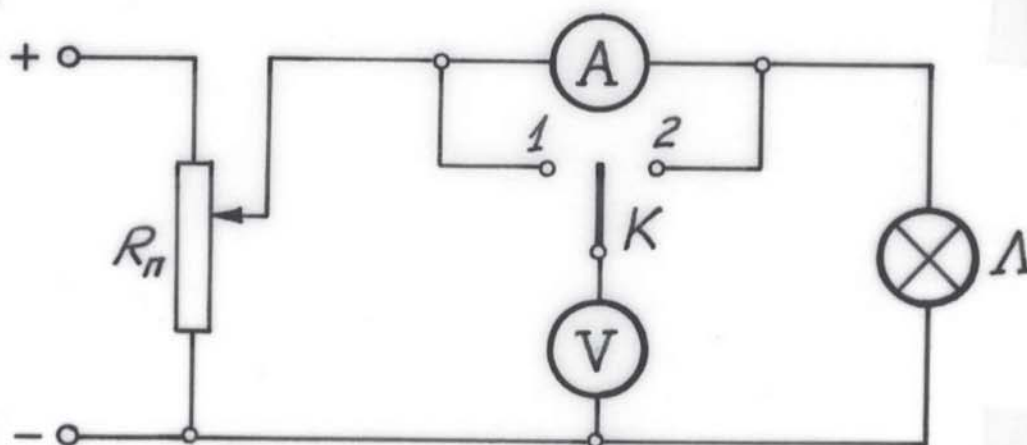
- Измерването с мост на Уитстон позволява много точното измерване на съпротивления и намира приложение при калибриране и настройка на апаратура.



### Схеми на опитните постановки



Фиг. 2.5



Фиг. 2.6

### Програма на работа

1. Да се реализира схемата от фиг.2.5. По метода с непосредствена оценка с омметър да се измерят съпротивленията на резисторите  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  и  $R_6$  и резултатите да се запишат в колонката  $R$  с омметър на таблици 2.1 и 2.2 . Да се направят измервания по косвен метод чрез схемата  $V - A$  или  $A - V$  и попълнят останалите позиции на таблици 2.1 и 2.2. Да се сравнят резултатите от измерванията от двата метода.

Схема  $V - A$

Таблица 2.1

№	$I$	$U_V$	$R_A$	$R_{VA}$	$R_X$	$\varepsilon_{VA}$	$R$	с омметър
	A	V	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	%	$\Omega$	

Схема А - V

Таблица 2.2

№	$U$	$I_A$	$R_V$	$R_{AV}$	$R_X$	$\varepsilon_{AV}$	$R$	$c$
	V	A	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	%	$\Omega$	омметър

- за схема V - A  $R_X = R_{VA} - R_A, \Omega;$

- за схема А - V  $R_X = \frac{R_V \cdot R_{AV}}{R_V - R_{AV}}, \Omega.$

2. Да се снее волт-амперната характеристика на лампа с нажежаема спирала  $I=f(U)$ . За целта да се зададат различни стойности на напрежението до достигане на номиналното напрежение на лампата. Резултатите да се нанесат в таблица 2.3. На координатна система да се построи зависимостта на  $I$  от напрежението  $U$  и да се направи извод.

Таблица 2.3

№	$I$	$U$	$R$
	A	V	$\Omega$

3. Да се измерят няколко съпротивления с Уитстонов мост, към който се свързват захранващ източник и галванометър. Измерването се извършва в следната последователност:

а/ Към съответните клеми се включва измерваното съпротивление  $R_X$ .

б/ Задават се подходящи стойности на отношението  $\frac{R_3}{R_4}$ , съобразени с порядъка на измерваното съпротивление.

в/ Превключвателите на батерията и галванометъра се поставят на позиция "5000 $\Omega$ ". Задават се последователно минималната и максималната възможни стойности на съпротивлението  $R_2$ . Ако при тези две стойности на  $R_2$  отклоненията на показващото устройство (светлинния лъч) на галванометъра са еднопосочни (от едната страна на нулевото деление), това означава, че мостът не може да се уравни и трябва да се търси ново отношение  $\frac{R_3}{R_4}$ , докато се получат две разнопосочни отклонения, което означава, че отношението е добре подбрано и мостът може да се уравни.

г/ При установено отношение  $\frac{R_3}{R_4}$  се регулира съпротивлението  $R_2$ , започвайки от най-старшия разряд към по-младшите, докато се нулира галванометъра.

д/ Двата превключвателя се поставят на позиция "фино" и посредством малко изменение на  $R_2$  мостът се уравни окончателно.

е/ Определя се съпротивлението  $R_X$  съгласно формула (2.9). Резултатите от проведените измервания се нанасят в таблица 2.4.



Таблица 2.4

Съпротивление №				1	2	3	4	5	6
Измерено с:	мост на Уитстон	$R_3/R_4$	--						
		$R_2$	$\Omega$						
		$R_X$	$\Omega$						
	омметър	$R$	$\Omega$						

5. Да се измерят същите съпротивления с омметър.

Резултатите от измерванията се нанасят в таблица 2.4.

6. Да се направи извод за точността на измерванията, осъществени с мост на Уитстон и омметър .

7. С мегаомметър да се измери съпротивлението на изолацията на статорната намотка на трифазен асинхронен двигател. Измерването се извършва в следния ред:

а/ Предварително се проверява установяването на стрелката на деление 0 и  $\infty$  като в първия случай изводите на уреда се свързват накъсо, а във втория се оставят отворени. Едновременно с това посредством ръкохватката трябва да се завърти вградения в уреда генератор за постоянен ток (този генератор се завърта и по нататък при всяко измерване);

б/ Измерва се съпротивлението на изолацията между всяка фазова намотка и корпуса на статора на трифазен асинхронен двигател, а също и съпротивлението на изолацията между всеки две фазови намотки. Получените резултати да се нанесат в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Съпротивление на изолацията в $M\Omega$					
между намотка и корпус			между намотките		
I	II	III	I - II	II - III	III - I

8. От резултатите в таблица 2.5 да се направи извод за изправността на статорната намотка на двигателя.

### **Контролни въпроси**

1. Кои са основните методи за измерване на съпротивления? Какви реализации на тези методи познавате?

2. Какво представляват мегаомметрите?

3. Каква е разликата между схемите  $V - A$  и  $A - V$  и от какво се определя използването на едната или другата схема?

4. По какъв начин могат да се определят действителните стойности на тока, напрежението и измерването съпротивление при схемите  $V - A$  и  $A - V$ ?

5. Какво е устройството и за какво се използва мостът на Уитстон?

6. Какво е условието за равновесие на Уитстоновия мост и какви са неговите разновидности?

## ИЗМЕРВАНЕ НА АКТИВНА МОЩНОСТ ПРИ ПОСТОЯНЕН И ЕДНОФАЗЕН ПРОМЕНЛИВ ТОК

### Цел на упражнението

Измерването на мощност е една от най-често срещаните задачи в електроизмервателната техника. Целта на упражнението е да се запознаят студентите с величината активна мощност. Да се изучат най-разпространените методи и средства за измерване на постоянноотокова и активна мощност в еднофазни променливотокови вериги, а именно:

1. Непосредствено измерване с помощта на електродинамичен ватметър.
2. Посредством ватметър с разширен обхват.

### Основни теоретични положения

Мощността в постоянноотокови вериги се определя с израза

$$P = U \cdot I, \quad (3.1)$$

а активната мощност в еднофазна променливотокова верига при синусоидален режим - с израза

$$P = UI \cos \varphi \quad (3.2)$$

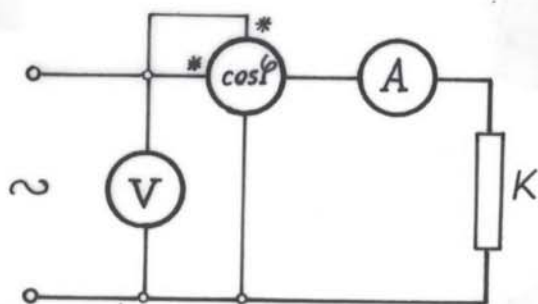
Активната мощност е свързана с преобразуване на електрическа енергия в друг вид енергия (топлинна, механична и др.).

За да се характеризира състоянието на променливотоковите вериги в синусоидален режим е въведена и така наречената реактивна мощност. Тя се определя с израза

$$Q = UI \sin \varphi \quad (3.3)$$

Реактивната мощност е свързана с енергията необходима за създаване на магнитни и електрически полета.

В горните изрази  $U$  и  $I$  са ефективните стойности съответно на напрежението и тока във веригата, а  $\varphi$  - фазовият ъгъл между тях.



Фиг. 3.1

От израза (3.1) следва, че мощността в постоянноотокова верига може да се измери с волтметър и амперметър по схеми V - A или A - V (виж упр. №2), а активната мощност при променлив ток - посредством волтметър, амперметър и

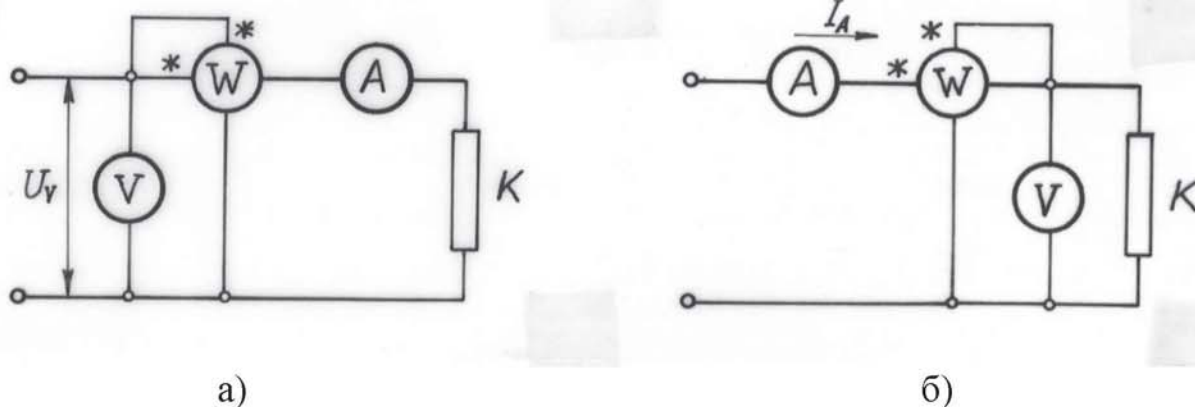


$\cos\varphi$  -мер (фиг. 3.1) съгласно израза (3.2). Точността на последния метод не е висока, затова той почти не се използва.

**Измерване на мощност с ватметър.** За измерване на мощността (понататък се има предвид само активната мощност) най-широко приложение са намерили електромеханичните ватметри от електродинамичната система, в които непосредствено се реализира изразът (3.2), т.е. последните се явяват умножаващи уреди.

При постоянен ток  $\cos\varphi=1$ , от което следва, че те реализират и израза (3.1), т.е. електродинамичните ватметри се използват за измерване на мощност, както при променлив, така и при постоянен ток. Тези уреди имат две независими една от друга намотки - токова и напрежителна. Токовата се свързва последователно на консуматора (както амперметър), а напрежителната - паралелно (както волтметър). Свързването на намотките се осъществява по две схеми със символични означения V - A и A - V (виж упр. №2), показани съответно на фиг.3.2а и 3.2б.

За да се получи правилно отклонение на стрелката на ватметъра, необходимо е да се спазва последователността на свързване на изводи-те на двете намотки. Така наречените "генераторни изводи" на токовата и напрежителната бобини трябва да се свържат към захранващия източник (генератора). Те се отбелязват със специален знак (обикновено  $\downarrow$  или \*). Ако включението към даден консуматор ватметър дава обратно отклонение, необходимо е да се разменят местата на проводниците, свързващи едната намотка (обикновено напрежителната). Свързването на ватметрите трябва да се извършва съвместно с амперметри и волтметри така, както е показано на фиг.3.2. Това се прави, за да се контролират тока и напрежението в съответните намотки, имащо за цел да се избягнат възможните им претоварвания.



Фиг. 3.2

Константата на ватметъра се определя с формула

$$k_W = \frac{P_H}{\theta_H} = \frac{I_H \cdot U_H}{\theta_H} \cdot \cos\varphi_H, \frac{W}{\text{дел}} \quad (3.4)$$

където  $P_H$  е номиналният обхват на ватметъра, който се определя като произведение от номиналните обхвати по ток  $I_H$  и напрежение  $U_H$  на

съответните намотки, и номиналния фактор на мощност  $\cos \varphi_H$ , означен върху скалата на ватметъра. В случай, че такова означение липсва, тогава  $\cos \varphi_H = 1$  и

$$k_W = \frac{I_H \cdot U_H}{\theta_H}, \frac{W}{\text{дел}} \quad (3.5)$$

Ватметрите, свързани по показаните две схеми, измерват недействителната мощност на консуматора К, а по-голяма мощност, което се дължи на собствената консумация  $\Delta P$  на вторите уреди и намотки.

За схема V - A действителната мощност  $P$  се определя с израза

$$P = P_{VA} - \Delta P = P_{VA} - I^2(R_A + R_{WT}), \quad (3.6)$$

където  $P_{VA}$  е отчетената от ватметъра мощност,  $I$  - действителния ток на консуматора, отчетен от амперметъра, а  $R_A$  и  $R_{WT}$  - съответно съпротивленията на амперметъра и токовата намотка на ватметъра.

За схема V - A действителната мощност се определя с израза

$$P = P_{AV} - \Delta P = P_{AV} - U^2\left(\frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_{WU}}\right), \quad (3.7)$$

където  $P_{VA}$  е отчетената от ватметъра мощност,  $U$  - действителното напрежение върху консуматора, което се отчита от волтметъра, а  $R_V$  и  $R_{WU}$  съответно съпротивленията на волтметъра и напрежителната намотка на ватметъра.

**Разширяване на обхвата на ватметри.** Ако при измерване на мощността на даден консуматор обхватите по ток или напрежение на ватметъра са по-ниски от необходимите, тогава се налага разширяване на обхватите му по ток или напрежение (а може и едновременно по ток и напрежение). На фиг.3.4 е показана схема за разширяване на обхвата на ватметър за променлив ток. Обхватът на токовата намотка е разширен с токов трансформатор, а на напрежителната - с допълнителен резистор. Показаната схема е V - A, но може да се реализира и схема A - V.

Трябва да се има предвид, че при съвместното свързване на измервателен трансформатор с фазочувствителен уред, какъвто е ватметъра, трябва да се следи за правилното свързване на генераторните изводи на намотките на трансформатора. Изводът  $L_1$  на първичната намотка на токовия трансформатор трябва да се свърже към захранващия източник, а към извода на вторичната намотка, означен с  $I_1$ , се свързва генераторният край на токовата намотка на ватметъра.

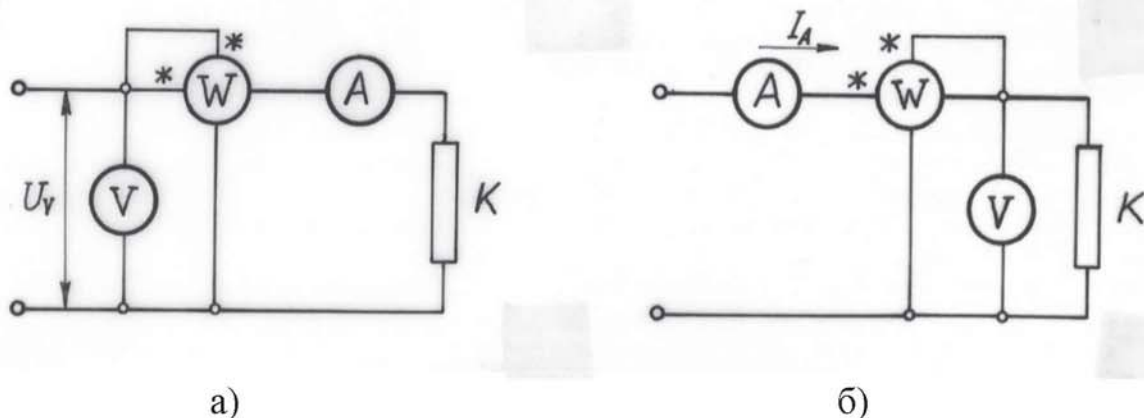
Константата на ватметъра за обхват, разширен по показания на фиг.3.4 начин, е

$$k'_W = \frac{P'_H}{\theta_H} = k_I \cdot m \cdot \frac{I_H \cdot U_H}{\theta_H} \cdot \cos \varphi_H = k_I \cdot m \cdot k_W, \frac{W}{\text{дел}}, \quad (3.8)$$

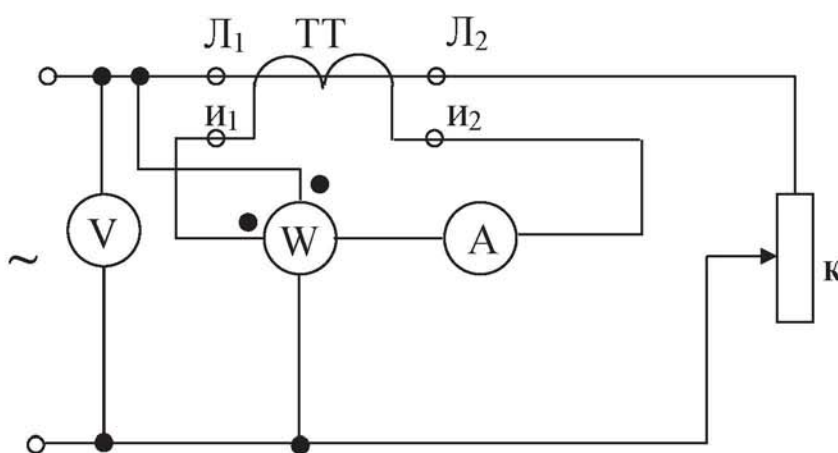
където  $k_I$  и  $m$  се определят по формули (1.4) и (1.7) /виж упр. №1/.



**Схеми на опитните постановки**



Фиг. 3.3



Фиг. 3.4

**Програма на работа**

1. Да се реализират схемите V - A и A - V, показани на фиг.3.3, като захранването им се осъществи от регулируем автотрансформатор, посредством който последователно се задават няколко стойности на тока по схема V - A и на напрежението по схема A - V. Резултатите да се нанесат в таблица 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1

№	$I$	$U_V$	$P_{VA}$	$R_A$	$R_{WI}$	$\Delta P$	$P$	$\varepsilon$
	A	V	W	$\Omega$	$\Omega$	W	W	%

Консумацията на уредите  $\Delta P$  и действителната мощност  $P$  се определят по формули (3.6) и (3.7). Относителната грешка, дължаща се на собствената консумация на уредите, се определя с формулата

$$\varepsilon \% = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100, .$$

Таблица 3.2

№	$I_A$	$U$	$P_{AV}$	$R_A$	$R_{WU}$	$\Delta P$	$P$	$\varepsilon$
	A	V	W	$\Omega$	$\Omega$	W	W	%

2. На обща координатна мрежа да се построят графиките на грешките  $\varepsilon = f(P)$  за двете схеми.

3. Да се разшири обхватът на ватметър с помощта на токов трансформатор и допълнителен резистор съгласно схемата от фиг.3.3. Захранването на схемата да се осъществи от регулируем автотрансформатор. Да се получат разширени обхвати по ток  $I'_H$  и по напрежение  $U'_H$ . Резултатите да се нанесат в таблица 3.3.

Таблица 3.3

$I_H =$	$U_H =$	$\theta_H =$	$k_W =$	$R_{WU} =$					
№	$I'_H$	$U'_H$	$P'_H$	$k_I$	$m$	$R_d$	$k'_W$	$\theta$	$P$
	A	V	W	-	-	$\Omega$	W/дел	дел	W

Необходимото допълнително съпротивление се определя по формулата  $R_d = R_{WU}(m - 1)$ . Измерената мощност на консуматора е  $P = k'_W \cdot \theta$ , където  $\theta$  е отчетеното от ватметъра отклонение на стрелката.

### Контролни въпроси

1. По какъв начин може да се измери мощността при постоянен и еднофазен променлив ток?

2. Какво представлява ватметъра? Как се определят неговия обхват и константа?

3. Какви правила трябва да се спазват при свързването на ватметър в дадена електрическа верига?

4. На какво се дължи по-голямата мощност, която измерва един ватметър? Как се определя действителната мощност на консуматора?

5. Как може да се разшири обхвата на един ватметър? Какви правила трябва да се спазват при използването на токов трансформатор? По какъв начин се изменят обхвата и константата на ватметъра с разширен обхват?



## ИЗМЕРВАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ С ЕДНОФАЗЕН ЕЛЕКТРОМЕР

### *Цел на упражнението*

Студентите да се запознаят с величината електрическа енергия и как се изчислява консумираната електрическа енергия от консуматорите. Да придобият умения за свързване на еднофазен електромер и разширяване на обхвата му.

Студентите да изучат как се извършва проверка на еднофазен електромер, която се състои в следното:

1. Опитно определяне на относителната грешка на електромера за различни стойности и характер на товара.
2. Проверка срещу самоход.

### *Основни теоретични положения*

Електромерите са най-широко разпространените електрически измервателни уреди. С тях се измерва консумираната от потребителите електрическа енергия. В днешно време променливотоковата електрическа енергия се измерва с електромери, които могат да бъдат за активна или реактивна енергия. Вторите се използват значително по-рядко. Освен това електромерите могат да бъдат еднофазни и трифазни.

От практическа гледна точка най-голям интерес представляват еднофазните електромери за активна енергия. Електромерът притежава: токови изводи (с малко вътрешно съпротивление между тях), които се свързват последователно на консуматора и напрежителни изводи (с много голямо вътрешно съпротивление между тях), които се свързват паралелно на консуматора.

Според принципа на действие електромерите за търговско измерване са индукционни или статични.

Еднофазните индукционни електромери притежават: токова бобина (токов електромагнит) с малък брой навивки от дебел проводник, която се свързва последователно на консуматора; напрежителна бобина (напрежителен електромагнит) с голям брой навивки от тънък проводник, която се свързва паралелно на консуматора; алуминиев диск, закрепен на ос, свързана с броячния механизъм; постоянен магнит, между полюсите на който се движи алуминиевият диск и устройства за регулиране, които са различни при различните конструкции.

Електромерите, които са от статичен тип, измерват и записват количествата активна и реактивна енергия през определени интервали от време и ги регистрират в независима памет. Електромерите, които са от статичен тип, имат дисплей за изобразяване на всички интегрирани количества.



Класът на точност на електромерите трябва да отговаря на изискванията, посочени в Наредбата за средствата за измерване, които подлежат на метрологичен контрол.

Преди да започне проверката на един индукционен електромер, необходимо е да се определи неговата константа  $k$  в  $\frac{J}{tr}$  ( $\frac{Ws}{tr}$ ). Тя показва каква енергия съответства на един оборот на диска. Определянето на константата се извършва от преводното число  $N$ , означено на табелката на електромера в  $\frac{tr}{kWh}$  и показващо колко оборота на диска съответстват на един киловатчас електроенергия, т.е.

$$k = \frac{1}{N}, \quad \frac{kWh}{tr} = \frac{3600 \cdot 10^3}{N}, \quad \frac{Ws}{tr}. \quad (4.1)$$

Константата на електромера може да се намери и чрез изброяване на оборотите на диска  $n$ , за които броячният механизъм отчита определена енергия  $W$ , kWh. Определената по този начин константа е

$$k = \frac{W \cdot 3600 \cdot 10^3}{n}, \quad \frac{Ws}{tr}. \quad (4.2)$$

Относителната грешка на електромера се определя с формулата

$$\varepsilon \% = \frac{W_E - W}{W} \cdot 100, \quad (4.3)$$

където  $W_E$  е измерената от електромера енергия, а  $W$  - действително консумираната.

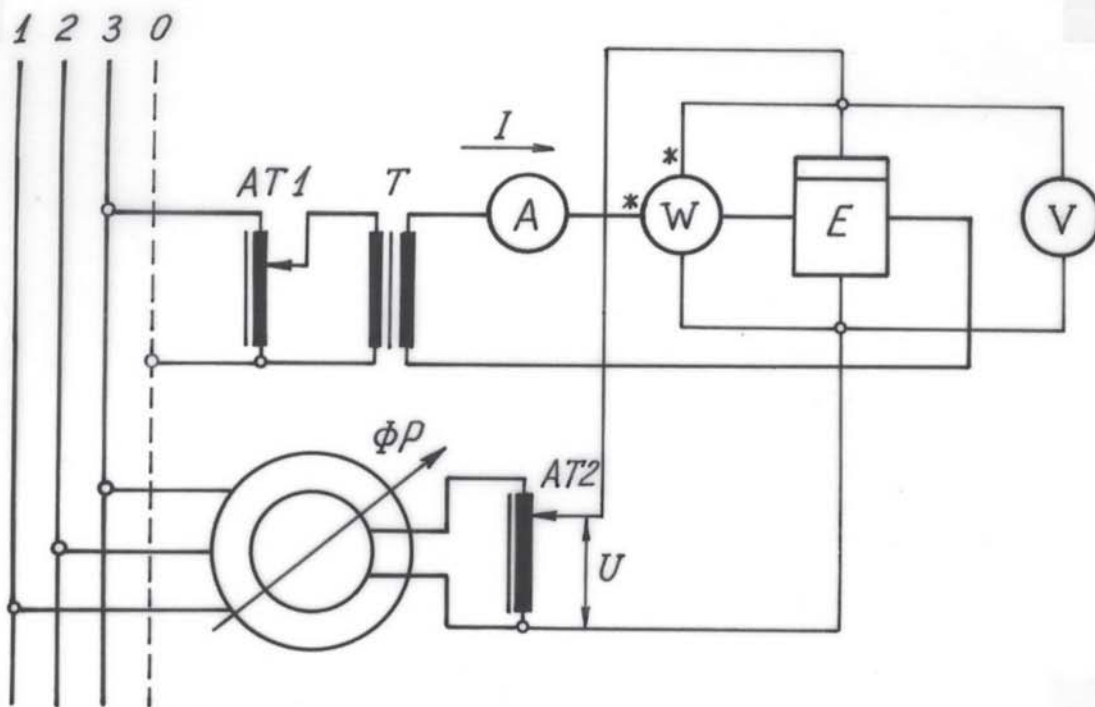
При статичните електромери е дадена константа на електромера (показваща броя на премигванията на светодиода за 1 kWh) в имп/ kWh.

Точността с която трябва да работят електромерите, не е висока – (1-2)% за битови цели и трябва да се запазва и при претоварване 4, 6 или 8 пъти.

В лабораторни условия за проверка на работата на еднофазен електромер се използва схемата от фиг. 4.1.

Токовата верига, състояща се от амперметъра и токовите бобини на ватметъра и електромера, се захранва посредством регулируем автотрансформатор АТ1 и понижаващ трансформатор Т с ниско вторично напрежение. Напрежителната верига, състояща се от волтметъра и напрежителните бобини на ватметъра и електромера, се захранва от фазорегулатор ФР и регулируем автотрансформатор АТ2. Фазорегулаторът служи за създаване на напрежение  $U$  с различна фаза. Той представлява специален трифазен асинхронен двигател с навит ротор, който е застопорен и може да се завърта /ръчно или автоматично/ на различен ъгъл. По този начин фазовият ъгъл може да се изменя от 0 до  $2\pi$  радиана /в някои конструкции фазорегулаторът и автотрансформаторът АТ2 са вградени в един корпус, което осигурява значително удобство в регулирането /.





Фиг. 4.1

Схемата с фиктивен товар има следните предимства:

- а) регулирането на величината /ток или напрежение / в едната верига не влияе върху стойността на величината напрежение или ток / в другата верига;
- б) независимостта на тока и напрежението в двете вериги дава възможност за просто и удобно регулиране на фазовата разлика между тях, което практически се реализира с фазорегулатора;
- в) консумираната от мрежата мощност е много малка - равна е на собствената консумация на свързаните в схемата уреди.

Грешката на електромера се изчислява по формула (4.3) , където

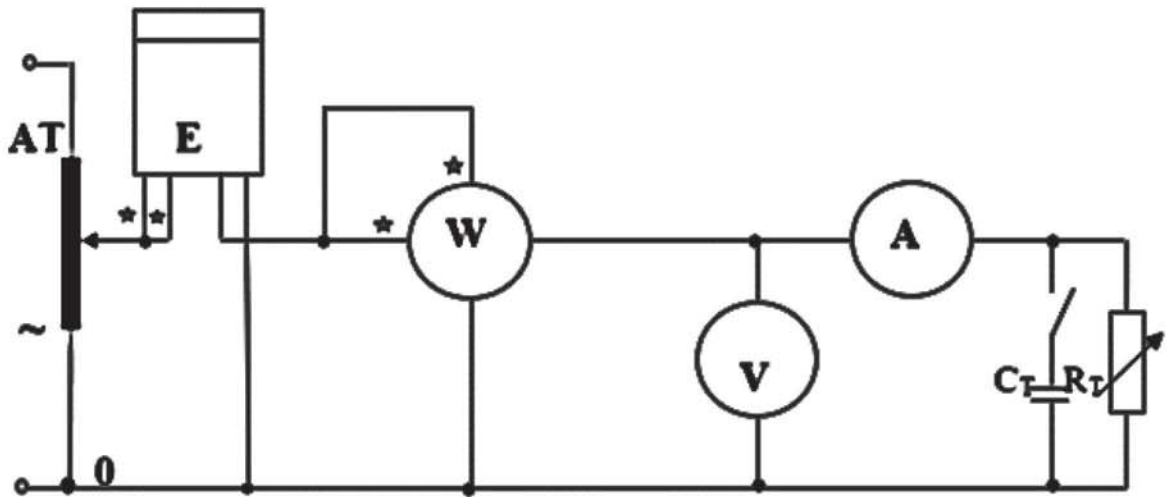
$$W_E = k \cdot n ; \quad W = P \cdot t . \quad (4.4)$$

Означенията по-горе са следните:

- $k$  - константа на електромера;
- $n$  - отброени обороти на диска на електромера;
- $P$  - отчетената от ватметъра мощност;
- $t$  - времето, необходимо за извършване на  $n$  оборота; броят на оборотите се задава така, че това време да бъде не по-малко от една минута.

#### **Схема на опитната постановка**

Проверката на електромера се извършва по схема с реален товар, показана на фиг. 4.2. Както се вижда от фигурата, уредите за проверка на работата на електромера са след него.



Фиг. 4.2

### Програма на работа

1. Да се реализира схемата от фиг. 4.2. Да се зададат номиналните стойности на тока и напрежението на електромера и да се остави да работи в продължение на 10-15 минути, за да се установи номинален температурен режим.
2. Да се изчисли константата на електромера.
3. Да се провери електромера срещу самоход при напрежение с 10 % по-високо от номиналното.
4. Да се определи относителната грешка на електромера за  $\cos\varphi=1$  и за  $\cos\varphi\neq 1$ . Резултатите да се нанесат в табл. 4.1.

Таблица 4.1

№	$\cos \varphi$	$(I / I_N) \cdot 100$	$U$	$I$	$P$	$n$	$t$	$W_E$	$W$	$\varepsilon$
		%	V	A	W	tr	s	J	J	%

5. Да се разгледа касов бон на електроразпределително дружество и се запишат данните за цена на електроенергията за дневна и нощна зона.

дневна ..... лв. за 1 kWh

нощна ..... лв. за 1 kWh

6. Да се изчисли стойността на консумираната електроенергия от консуматор, посочен от таблица 4.4, за определен интервал от време и попълни таблица 4.3.

Таблица 4.2

Месеци	Дневна	Нощна
януари, февруари, март, ноември и декември	6:00-22:00	22:00-6:00
април, май, юни, юли, август, септември и октомври	7:00-23:00	23:00-7:00



Таблица 4.3

Консуматор	Мощност	Интервал време, ч.(h)		Сума
	kW	Дневна	Нощна	лв.

Таблица 4.4

Консуматор	Мощност
Готварска печка	2-6 kW
Аспиратор	0,2-0,4 kW
Пералня	2-3 kW
Радиатор	2-3 kW
Телевизор	0,1-0,2 kW
Монитор TFT на компютър	0,12 - 0,26 kW
Хладилник	0,09-0,2 kVA
Телевизор	0,06-0,15 kVA
Стерео уредба	0,3 kVA
Бойлер обикновен	2-3 kW
Бойлер проточен	5-9 kW
Циркулационна помпа на централно парно	40 -120 W

### *Контролни въпроси*

1. Как се свързва електромер?
2. Какво представлява и как се определя константата на електромера?
3. Защо при проверката за осигуровка срещу самоход напрежението е с 10 % по-високо от номиналното?

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЛИНЕЙНА НЕРАЗКЛОНЕНА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ВЕРИГА ПРИ ПРОМЕНЛИВ ТОК

### Цел на упражнението

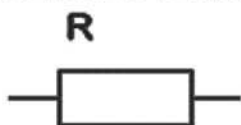
1. Да се определят параметрите на елементите на електрическа верига за променлив ток.
2. Да се изследва верига от последователно съединени активно съпротивление, бобина и кондензатор.
3. Да се построи векторна диаграма за веригата.

### Основни теоретични положения

В нашето ежедневие използваме различни консуматори на електрическа енергия. В тях електрическата енергия се преобразува в друг вид енергия. Например в електрически бойлери, електрически готварски и отоплителни печки имаме преобразуване в топлинна енергия. Чрез електрическите двигатели имаме преобразуване на електрическа енергия в механична енергия. В осветителните тела имаме преобразуване на електрическа енергия в светлинна енергия. При зареждане на акумулатори и мобилни телефони имаме преобразуване на електрическа енергия в химическа енергия.

Преобразуването на електрическа енергия в друг вид енергия се отразява с параметъра  $R$  – активно съпротивление и графичното означение на фиг.5.1. Единицата за активно съпротивление е  $\Omega$ (ом).

Преобразуваната електрическа енергия в друг вид енергия за определен интервал от време отнесена към големината на този интервал се явява величината активна мощност  $P$ . Единица за активна мощност е  $W$  (ват).



Фиг.5.1



Фиг.5.2

В някои консуматори се създава магнитно поле, например електрически двигатели, трансформатори, релета и др. Създаването на магнитно поле се отразява с параметъра  $L$  – индуктивност и графичното означение на фиг.5.2.

При електрически изчисления се използва параметъра реактивно индуктивно съпротивление  $X_L$ . Единицата за реактивно съпротивление е  $\Omega$ (ом).

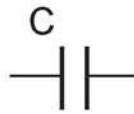
$$X_L = \omega L; \omega = 2\pi f, \quad (5.1)$$

където  $f$  е честота в  $Hz$ (херц), а  $\omega$  е ъглова честота в единица  $rad/s$ (радиан за секунда).

Електрическата енергия, която се колебае между източника и магнитното поле на консуматора за определен интервал от време отнесена към големината на този интервал се явява величината реактивна мощност  $Q$ . Единицата за реактивна мощност е  $VAr$  (вар).



Има консуматори, в които се създава електрическо поле, например кондензатори, микровълнови фурни и др. Създаването на електрическо поле се отразява с параметъра  $C$  – капацитет и графичното означение на фиг.5.3.



фиг.5.3

При електрически изчисления се използва параметъра реактивно капацитивно съпротивление  $X_C$ .

$$X_C = \frac{1}{\omega C}; \omega = 2\pi f, \quad (5.2)$$

Електрическата енергия, която се колебае между източника и електрическото поле на консуматора за определен интервал от време отнесена към големината на този интервал се явява величината реактивна мощност  $Q$ .

Когато в консуматора има преобразуване на електрическа енергия в друг вид енергия и това преобразуване е свързано с електрически и магнитни полета се използват обобщаващи пълно съпротивление и пълна мощност:

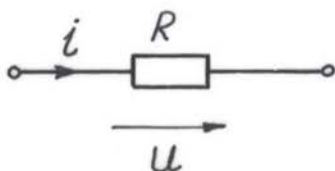
$$z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}; S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (5.3)$$

Единицата за пълно съпротивление  $z$  е  $\Omega$ (ом), а за пълна мощност  $S$  е VA (волтампер).

При изчисленията на електрически вериги се използват активно съпротивление, реактивно съпротивление и пълно съпротивление.

За да бъде електрическата верига линейна, трябва параметрите на нейните елементи да не зависят от протичащия през тях ток или от приложеното напрежение.

За анализ на електрическите вериги се съставят заместващи схеми, съдържащи идеални елементи, т.е. такива, които се характеризират само с активно съпротивление, индуктивност или капацитет. Предполага се, че в активното съпротивление електрическата енергия се превръща в топлина, в индуктивността е съсредоточена енергията на магнитното поле, а в капацитета - енергията на електрическото поле.



Фиг. 5.4

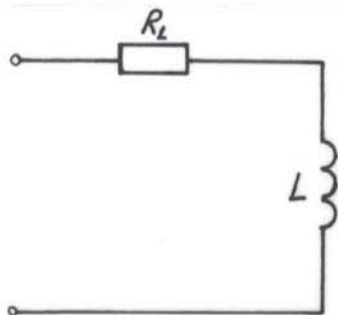
Ако даден елемент от електрическата верига притежава само активно съпротивление  $R$  (фиг. 5.4), то може да се определи по косвен път като се измерят ефективните стойности на тока  $I$  и напрежението  $U$  или на консумираната мощност  $P$  и тока  $I$ . Активно съпротивление притежават реостатите, различните електронагревателни

уреди, лампите с нажежаема спирала и други.

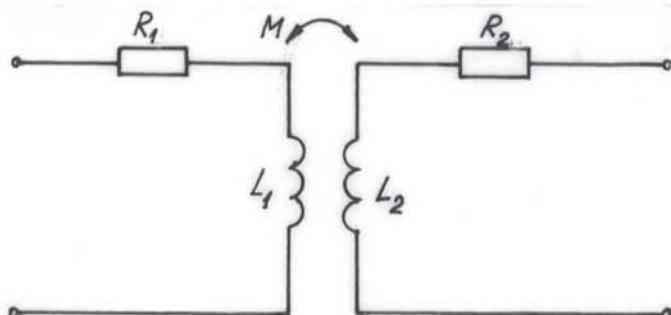
$$R = \frac{U}{I} = \frac{P}{I^2}. \quad (5.4)$$

Реалните бобини имат както индуктивност  $L$ , така и активно съпротивление. Заместващата схема на реалната бобина е показана на фиг. 5.5.

Съпротивлението  $R_L$  отразява активното съпротивление на проводниците на



Фиг. 5.5



Фиг. 5.6

бобината, а  $L$  - нейната индуктивност. Такова заместване на бобината е приемлива при ниски честоти (например 50 Hz).

За заместващата схема на бобината може да се напише

$$z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2}; X_L = \omega L, \quad (5.5)$$

където  $z$  е пълното съпротивление,  $X_L$  е реактивното индуктивно съпротивление и  $\omega$  е ъгловата честота.

По опитен път параметрите на бобината се определят като се измерят ефективните стойности на протичащия ток  $I$  и на приложеното напрежение  $U$ , както и на консумираната активна мощност  $P$ .

$$z_L = \frac{U}{I}; \cos\varphi_L = \frac{P}{UI}; R_L = \frac{P}{I^2}; X_L = \sqrt{z_L^2 - R_L^2}; L = \frac{X_L}{\omega}. \quad (5.6)$$

Когато две бобини са поставени така, че намотките им да обхващат общ магнитен поток, те се наричат индуктивно свързани. В заместващата схема това се отразява чрез включване на параметъра взаимна индуктивност  $M$  (фиг. 5.6). Тя характеризира свойството протичащият ток през една от бобините да създава пълен поток на взаимната индукция с другата бобина. При това

$$M = M_{12} = M_{21} = \frac{\Psi_{1M}}{i_2} = \frac{\Psi_{2M}}{i_1}. \quad (5.7)$$

Тук  $\Psi_{1M}$ ,  $\Psi_{2M}$  са пълните магнитни потоци на взаимната индукция, предизвикани съответно от токовете  $i_2$  и  $i_1$ .

Когато магнитният поток от взаимната индукция съвпада по посока със собствения магнитен поток на всяка от бобините, то те се наричат съгласувано свързани, а когато тези потоци са противоположни - несъгласувано.

Ако две индуктивно свързани бобини се съединят последователно (фиг. 5.7), то еквивалентният им импеданс е

$$Z_e = Z_1 + Z_2 \pm 2 Z_M = R_1 + j\omega L_1 + R_2 + j\omega L_2 \pm j2\omega M,$$



$$Z_e = R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 \pm 2M) = R_e + j\omega L_e, \quad (5.8)$$

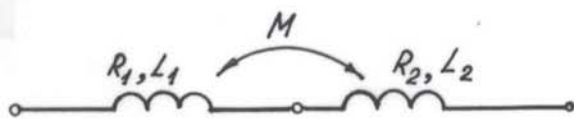
където  $R_e = R_1 + R_2$ ,  $L_e = L_1 + L_2 \pm 2M$ .

Ако свързването е съгласувано, то  $L_{ec} = L_1 + L_2 + 2M$ , а при несъгласувано -  $L_{en} = L_1 + L_2 - 2M$ . От тези изрази за взаимната индуктивност се получава

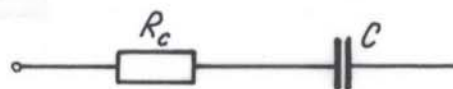
$$M = \frac{X_{ec} - X_{en}}{4\omega} = \frac{L_{ec} - L_{en}}{4}. \quad (5.9)$$

Формулата (5.9) позволява да се изчисли взаимната индуктивност  $M$ , след като се определят  $X_{ec}$  и  $X_{en}$  или  $L_{ec}$  и  $L_{en}$ .

При кондензатор също може да се използва последователна заместваща схема (фиг. 5.8). Активното съпротивление отразява загубите на енергия в



Фиг. 5.7



Фиг. 5.8

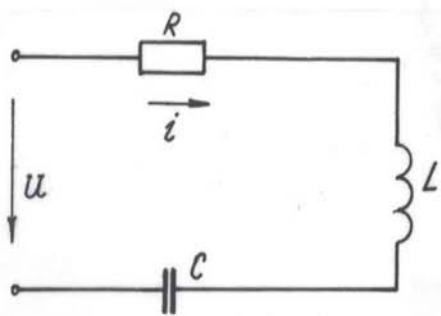
металните части и в диелектрика на кондензатора.

Основните съотношения за схемата от фиг. 5.8 са :

$$z_c = \sqrt{R_c^2 + X_c^2}; X_c = \frac{1}{\omega C}. \quad (5.10)$$

При определена честота  $\omega$  параметрите на кондензатора  $R_c$  и  $C$  могат да се изчислят чрез измерване на напрежението, тока и активната мощност, консумирана от кондензатора

$$z_c = \frac{U}{I}; \cos \phi_c = \frac{P}{UI}; R_c = \frac{P}{I^2}; X_c = \sqrt{z_c^2 - R_c^2}; C = \frac{1}{\omega X_c}. \quad (5.11)$$



Фиг. 5.9

Замествашата схема на верига от последователно съединени активно съпротивление, бобина и кондензатор (фиг.5.9) се характеризира с параметрите  $R$ ,  $L$  и  $C$ . Ако на входа на веригата е приложено синусоидално напрежение

$$u = U_m \sin \omega t, \quad (5.12)$$

то във веригата ще се установи също синусоидален ток

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi). \quad (5.13)$$

Тук  $u$  и  $i$  са моментните, а  $U_m$  и  $I_m$  - максималните стойности на напрежението и тока;  $\varphi$  - фазовата разлика между тях. При това

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{X}{R}. \quad (5.14)$$

Величината  $X = X_L - X_C$  се нарича реактивно съпротивление,  $X_L$  - реактивно индуктивно съпротивление, а  $X_C$  - реактивно капацитивно съпротивление. В зависимост от съотношението между  $X_L$  и  $X_C$  веригата може да има индуктивен, капацитивен или чисто активен характер. Когато  $X_L = X_C$  във веригата съществува електрически резонанс.

При известна ефективна стойност на напрежението  $U$  на входа на веригата, ефективната стойност на тока е

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{U}{z}, \quad (5.15)$$

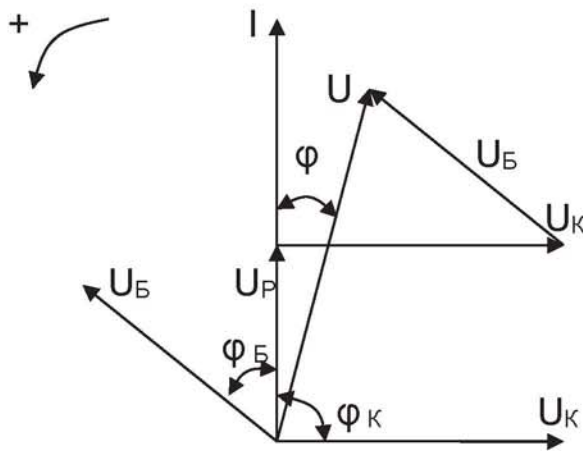
където  $z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$  е пълното съпротивление на веригата.

Ефективните стойности на напреженията върху отделните елементи са:

$$U_R = IR; \quad U_L = I \omega L; \quad U_C = I \frac{1}{\omega C}. \quad (5.16)$$

Векторната диаграма за верига, състояща се от активно съпротивление, бобина и кондензатор (фиг. 5.9), може да се построи чрез измерените стойности на напреженията  $U_R$ ,  $U_B$  и  $U_C$ .

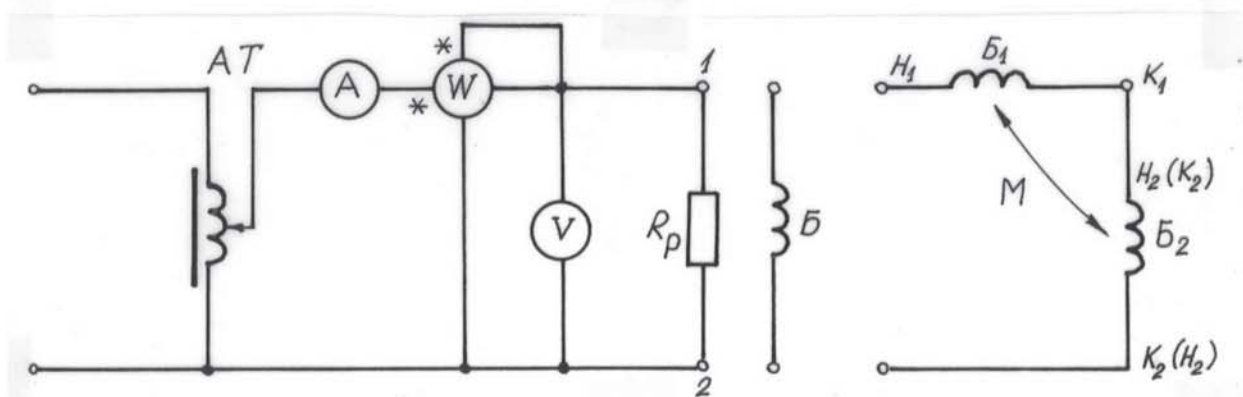
На фиг. 5.10 е показана векторната диаграма за случая  $\varphi < 0$ .



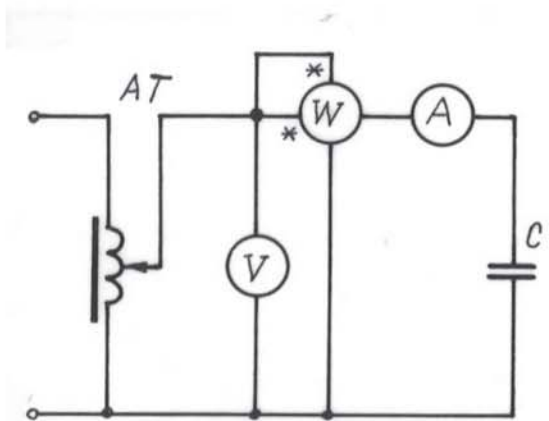
Фиг.5.10



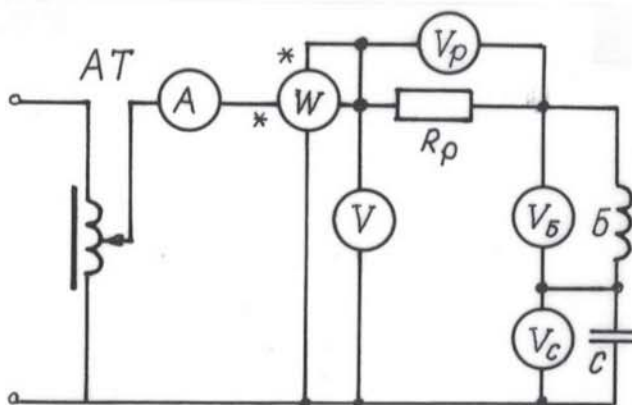
Схеми на опитните постановки



Фиг. 5.11



Фиг. 5.12



Фиг. 5.13

Програма на работа

Таблица 5.1

№	$I$	$U$	$P$	$R$	$R_{cp}$
	A	V	W	$\Omega$	$\Omega$
1					

1. Да се осъществи схемата от фиг. 5.11, като към точките 1-2 се свърже реостатът  $R_p$ . Чрез авто-трансформатора да се зададат три стойности на тока, за които да се отчетат показанията на уредите. Резултатите да се нанесат в таблица 5.1.

От получените данни по формула (5.4) да се изчисли съпротивлението  $R$  за отделните измервания, а  $R_{cp}$  е средноаритметичното от трите измервания.

2. Към изводите 1-2 да се включи бобината Б. Да се извършат измерванията както в т. 1. Получените данни да се запишат в таблица 5.2. Чрез тях да се изчислят параметрите на бобината  $R_{cp}$  и  $L_{cp}$ , като се използват формулите (5.6).

Таблица 5.2

№	$I$	$U$	$P$	$f$	$z$	$\cos \varphi_B$	$\varphi_B$	$R$	$X$	$L$	$R_{cp}$	$L_{cp}$
	A	V	W	Hz	$\Omega$	-	$^\circ$	$\Omega$	$\Omega$	H	$\Omega$	H
1												
2												

3. Към точките 1-2 да се включат две последователно съединени индуктивно свързани бобини. Чрез автотрансформатора да се зададе указаната от ръководителя на упражнението стойност на тока. Да се отчетат показанията на уредите и се нанесат в табл. 5.3. След това да се изключи напрежението и се разменят местата на изводите на една от бобините. Чрез автотрансформатора да се установи стойността на тока от предния опит. Резултатите да се нанесат в таблица 5.3.

Таблица 5.3

№	$I$	$U$	$P$	$f$	$\omega$	$z_e$	$R_e$	$X_e$	$M$
	A	V	W	Hz	s <sup>-1</sup>	Ω	Ω	Ω	mH
1									
2									

От получените резултати да се изчислят  $z_e$ ,  $R_e$  и  $X_e$  като се използват формулите (5.6) и след това от (5.9) да се определи  $M$ .

4. Да се осъществи схемата от фиг.5.12. Поради незначителната консумация на активна мощност да се включи ватметър с номинален  $\cos\varphi = 0,1$ . Да се зададат последователно три стойности на напрежението с помощта на автотрансформатора, като получените резултати се нанесат в таблица 5.4.

Таблица 5.4

№	$I$	$U$	$P$	$f$	$\omega$	$z_c$	$\cos\varphi_k$	$\varphi_k$	$R$	$X_c$	$C$	$R_{cp}$	$C_{cp}$
	A	V	W	Hz	s <sup>-1</sup>	Ω	-	граду с	Ω	Ω	μF	Ω	μF
1													
2													
3													

По данните от табл. 5.4 да се изчислят параметрите на кондензатора, като се използват формулите (5.11).  $R_{cp}$  и  $C_{cp}$  се изчисляват като средноаритметични стойности от трите измервания.

5. Да се осъществи схемата от фиг. 5.13. С помощта на авто-трансформатора АТ да се зададе определена стойност на входното напрежение. Отчитат се показанията на уредите и се нанасят в таблица 5.5.

Таблица 5.5

№	$I$	$U$	$P$	$U_P$	$U_B$	$U_C$	$z$	$R$	$X$	$\cos\varphi$	$\varphi$
	A	V	W	V	V	V	Ω	Ω	Ω	-	градус
1											

6. Да се изчислят параметрите  $z$ ,  $R$ ,  $X$  и фазовата разлика  $\varphi$  по формулите  $z = \frac{U}{I}$ ,  $\cos\varphi = \frac{P}{UI}$ ,  $R = \frac{P}{I^2}$ ,  $X = \sqrt{z^2 - R^2}$ ,  $\varphi = \arccos(\cos\varphi)$ .



По данните от табл. 5.5 да се построи в машаб векторна диаграма за веригата и да се определи знакът на  $X$  и  $\varphi$ .

7. Да се направят изводи относно параметрите на реалните елементи и тяхната големина, както и за характера на веригата при последователно съединение на активно съпротивление, бобина и кондензатор.

### ***Контролни въпроси***

1. Кои са параметрите на бобините и кондензаторите и от какво зависят? Как могат да се определят тези параметри по опитен път?

2. Как може да се определи по експериментален път взаимната индуктивност?

3. Коя величина се нарича пълно съпротивление? От кои величини зависи фазовата разлика?

4. Как се строи векторната диаграма при последователно свързани активно съпротивление, бобина и кондензатор?

5. Какво е взаимното разположение на векторите на тока и напрежението, когато характерът на веригата е : а) чисто активен; б) индуктивен ; в) капацитивен.

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТРИФАЗНА ВЕРИГА С КОНСУМАТОРИ СВЪРЗАНИ В ЗВЕЗДА

### *Цел на упражнението*

1. Да се изучи начина за свързване на консуматори в звезда и се определи по опитен път зависимостта между линейните и фазовите напрежения.
2. Да се изследва влиянието на прекъсването на нулевия или линейния проводник върху работата на консуматорите.
3. Да се построят векторни диаграми за напреженията и токовете при различни режими на натоварване.
4. Да се изучат начините за измерване на активна мощност в трифазни вериги.

### Основни теоретични положения

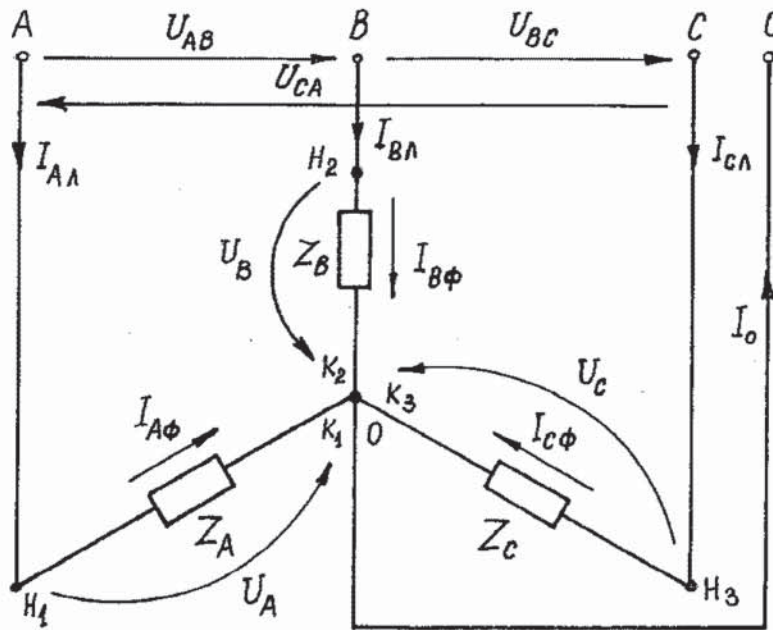
В трифазните електрически вериги консуматорите се свързват в звезда или в триъгълник. При свързване в звезда изводите на консуматорите, означени с  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  (фиг. 6.1) се свързват в една обща точка  $O$ , наречена нулева или звезден център. Другите изводи, означени с  $H_1$ ,  $H_2$  и  $H_3$  се свързват към трите фази  $A$ ,  $B$  и  $C$  на захранващата мрежа. Към нулевата точка на звездата може да се свърже нулевият проводник на мрежата.

При трифазните електрически вериги съществуват фазови и линейни напрежения и токове. Фазовите напрежения са между краищата на съответните фази на генератора или консуматора (изводите  $H - K$ ), а фазовите токове протичат през тях. При свързване в звезда фазовите напрежения са между началата на фазите и нулевата точка - на фиг. 6.1 те са означени с  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ . Линейни са напреженията между всеки два проводника от линията, свързваща източника с консуматора. На фиг. 6.1 те са означени с  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$ . Линейните токове протичат по проводниците на линията (на фиг. 6.1 те са означени с  $I_{Al}$ ,  $I_{Bl}$ ,  $I_{Cl}$ , а фазовите - с  $I_{A\phi}$ ,  $I_{B\phi}$ ,  $I_{C\phi}$ ). Счита се, че напреженията и токовете образуват симетрична трифазна система токове или напрежения, когато са с равни амплитуди и са изместени по фаза на еднакви ъгли ( $120^\circ$ ). Ако съпротивленията на консуматора  $Z_A$ ,  $Z_B$  и  $Z_C$  (фиг. 6.1) са равни по големина

$$Z_A = Z_B = Z_C = Z \quad (6.1)$$

и са с еднакъв характер, т. е.  $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$ , то такъв товар се нарича симетричен. В този случай токовете в консуматора образуват симетрична система, а токът в нулевия проводник е нула -  $I_o = 0$ , което позволява да се използва трипроводна линия.





Фиг. 6.1

При свързване на консуматорите в звезда, линейните и фазовите токове са равни  $I_{л} = I_{\phi}$ . За случая на симетричен товар, фазовият ток се определя от фазовото напрежение  $U_{\phi}$  и пълното съпротивление  $z$  на консуматора, включен във фазата.

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{z} \quad (6.2)$$

Дефазирането между напрежението  $U_{\phi}$  и тока  $I_{\phi}$  се определя от съотношението между реактивната  $X$  и активната съставляща  $R$  на съпротивлението на консуматора.

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} \quad (6.3)$$

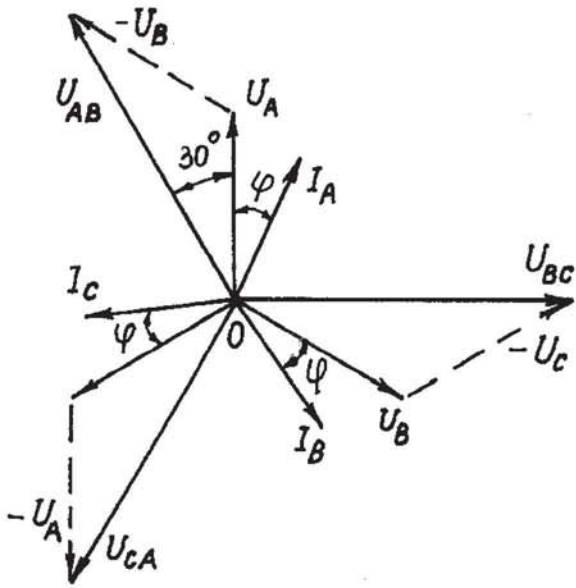
На фиг. 6.2 е построена векторната диаграма за случая, когато товарът е симетричен. Ако се разгледа равнобедрения триъгълник с основа  $U_{AB}$  и бедра  $U_A$  и  $U_B$ , се получава връзката между линейните и фазовите напрежения.

$$U_{AB} = U_A 2 \cos 30^{\circ} = \sqrt{3} U_A, \quad \text{т. е. } U_{л} = \sqrt{3} U_{\phi}. \quad (6.4)$$

При несиметричен товар по нулевия проводник протича токът

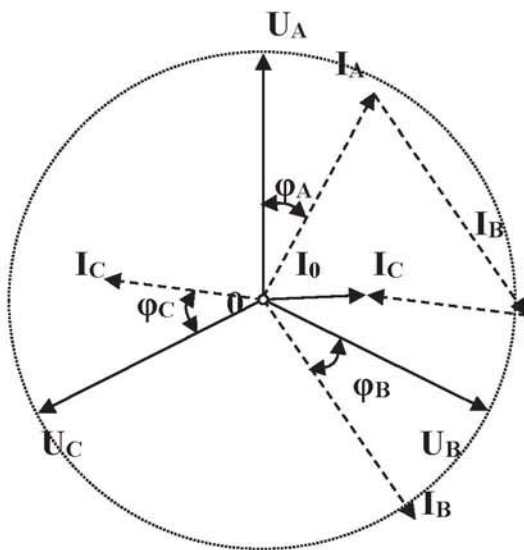
$$i_o = i_A + i_B + i_C, \quad (6.5)$$

а ъглите на дефазирание между фазовите напрежения и токове за отделните фази са различни.

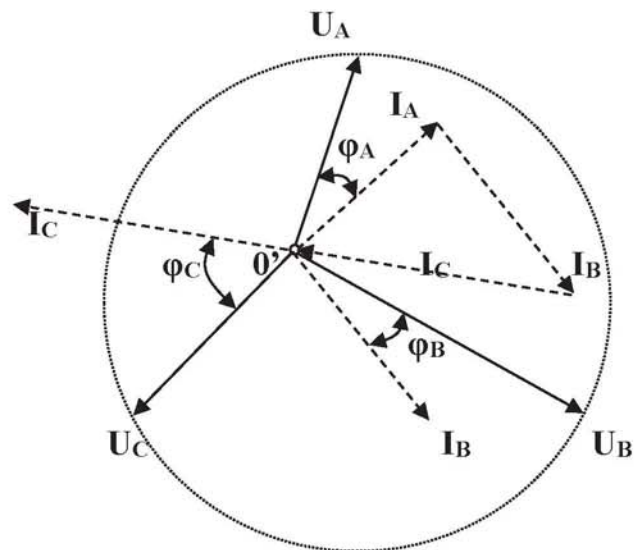


Фиг.6.2

Напряженията върху консуматорите са еднакви и са равни на фазовите. Векторната диаграма за този случай е показана на фиг. 6.3.



Фиг.6.3



Фиг.6.4

Когато товарът е несиметричен и се прекъсне нулевият проводник, се изменят фазовите напряжения, тъй като сумата на токовете трябва да бъде нула. В този случай консуматорите в отделните фази са подложени на различни напряжения, които могат да превишат допустимото за тях. Затова този режим е недопустим и не се разрешава включването във веригата на нулевия проводник на електрически апарати, които биха предизвикали неговото прекъсване. На фиг.



6.4 е изобразена векторната диаграма за случая, когато товарът е несиметричен и е прекъснат нулевия проводник.

При прекъсване на линеен проводник консуматорите в съответната фаза остават без енергия, а другите две фази са захранени чрез неповредените линейни проводници. Когато нулевият проводник е свързан, не настъпват съществени изменения в режима на работещите консуматори. Ако се прекъсне нулевият проводник, токът се определя от линейното напрежение и последователно свързаните съпротивления на консуматорите. Тогава могат да настъпят резонансни явления, предизвикващи повишаване на напрежението върху консуматорите и увеличаване на тока във веригата.

Активната мощност, консумирана в дадена трифазна верига, е сума от мощностите на отделните фази. Тя се определя от израза

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C . \quad (6.6)$$

От (6.6) следва, че активната мощност може да се измери с три ватметъра, включени по схемата показана на фиг. 6.5а. Ако се измерят с амперметър, волтметър и ватметър съответните величини за дадена фаза, то факторът на мощността  $\cos \varphi$  се определя по формулата

$$\cos \varphi = \frac{P}{U_{\Phi} I_{\Phi}} . \quad (6.7)$$

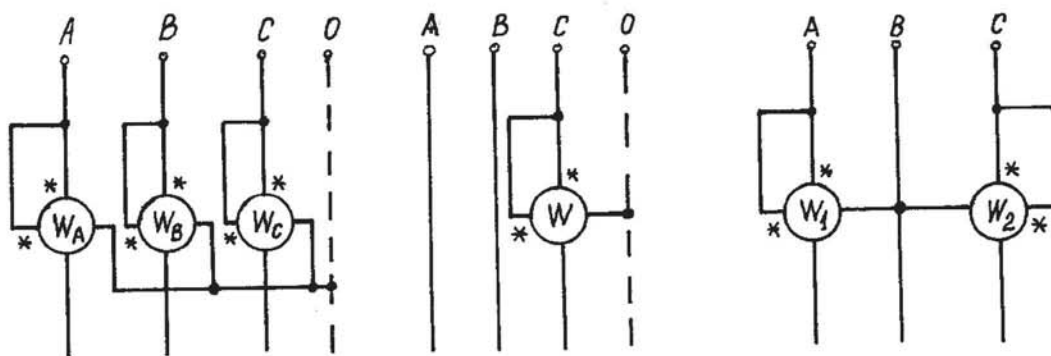
При симетрична трифазна верига консумираните активни мощности в отделните фази са еднакви и трифазната мощност е

$$P = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi . \quad (6.8)$$

Следователно, в този случай активната мощност може да се измери с помощта на един ватметър, включен по схемата на фиг. 6.5б.

При трипроводна захранваща мрежа активната мощност може да се определи от израза

$$P = P_1 + P_2 = U_{AB} I_A \cos(\hat{U}_{AB}, I_A) + U_{CB} I_C \cos(\hat{U}_{CB}, I_C) . \quad (6.9)$$



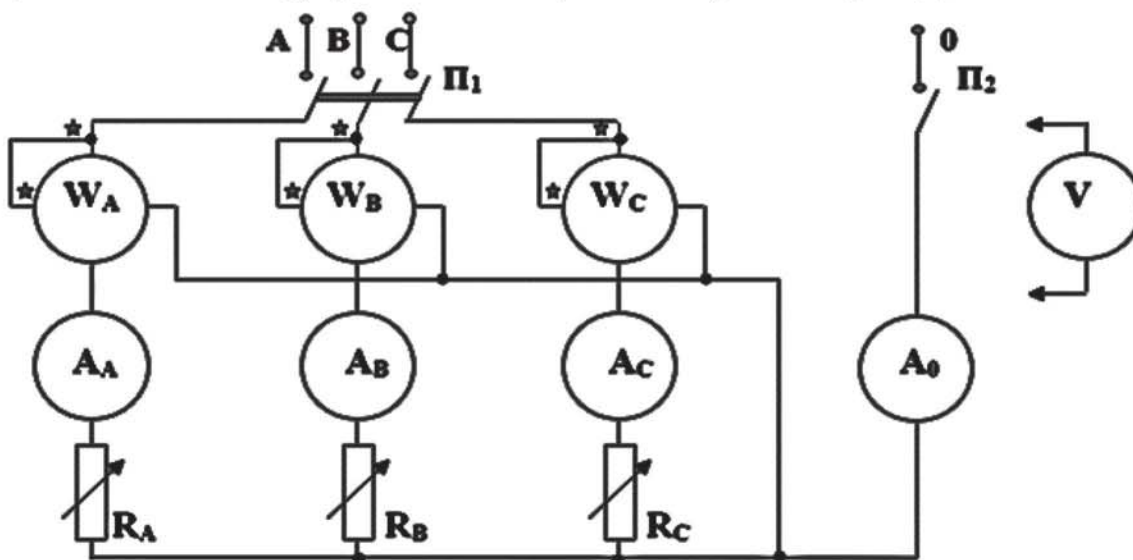
Фиг. 6.5

В този случай тя може да се измери с помощта на два ватметъра свързани по схемата, показана на фиг. 6.5в. Трябва да се съблюдава правилното включване на ватметрите, т.е. изводите на намотките означени с (\*) да се свържат в една и съща точка за всеки ватметър. В някои случаи, при правилно свързване на ватметрите, единият от тях може да се отклони наляво. Тогава трябва да се измени посоката на тока в токовата или напреженовата намотка на този ватметър,

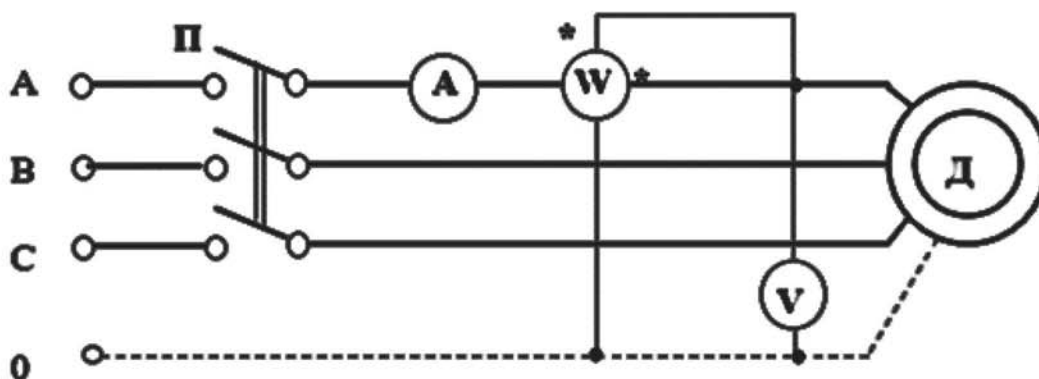
като се разменят местата на съединителните проводници, а измерваната трифазна мощност се изчислява като разлика от показанията на двата ватметъра.

### Схеми на опитните постановки

Схемата на опитната постановка, дадена на фиг. 6.6, се включва към захранващата мрежа чрез прекъсвача  $\Pi_1$ . Консуматорът е свързан в звезда, като във всяка фаза са включени стъпално регулируеми активни съпротивления  $R$ , реализирани с помощта на трифазна електрическа печка. В схемата е включен превключвателя  $\Pi_2$ , чрез който се прекъсва нулевия проводник.



Фиг. 6.6



Фиг. 6.7

### Програма на работа

Да се осъществи схемата показана на фиг. 6.6. Да се извършат измервания в следната последователност, отговаряща на редовете в таблица 6.1.:

1. При включен прекъсвач  $\Pi_1$ , да се включи прекъсвачът  $\Pi_2$ . Като се изменят съпротивленията  $R$ , да се установят еднакви стойности на токовете в трите фази, които се контролират с амперметрите  $A_A$ ,  $A_B$  и  $A_C$ . С помощта на волтметър с крайници да се измерят фазовите и линейните напрежения. Получените резултати да се нанесат в съответните графи на първия ред на таблица 6.1.



Таблица 6.1

№	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_0$	$P_A$	$P_B$	$P_C$
	V	V	V	V	V	V	A	A	A	A	W	W	W
1. Симетричен консуматор с нулев проводник													
2. Симетричен консуматор без нулев проводник													
3. Несиметричен консуматор с нулев проводник													
4. Несиметричен консуматор без нулев проводник													
5. Консуматор при прекъснат фазов проводник с нулев проводник													
6. Консуматор при прекъснат фазов проводник без нулев проводник													

2. При изключен прекъсвач  $\Pi_1$  да се прекъсне нулевият проводник с превключвателя  $\Pi_2$ . Включва се  $\Pi_1$  и се повтарят измерванията, като данните се записват на втория ред на таблица 6.1.

3. Да се изключи прекъсвачът  $\Pi_1$  и се включи  $\Pi_2$ . Да се изменят големините на съпротивленията  $R$  в отделните фази, така че да се получи несиметрия на трифазния консуматор. Отново се включва  $\Pi_1$  и се извършват измервания на величините, като данните се записват на третия ред в таблица 6.1.

4. При изключен прекъсвач  $\Pi_1$  да се прекъсне нулевият проводник с превключвателя  $\Pi_2$ . Включва се  $\Pi_1$  и се повтарят измерванията, като данните се записват на четвъртия ред на таблица 6.1.

5. При изключен прекъсвач  $\Pi_1$  се свързва нулевият проводник и се прекъсва произволен фазов проводник. Включва се превключвателят  $\Pi_1$  и се извършват измервания, като резултатите се нанасят на петия ред в таблица 6.1.

6. При изключен прекъсвач  $\Pi_1$  да се прекъсне нулевият проводник с превключвателя  $\Pi_2$ . Включва се  $\Pi_1$  и се повтарят измерванията, като данните се записват на шестия ред на таблица 6.1.

7. Да се построят в мащаб векторни диаграми за случаите на симетричен и несиметричен товар, при включен и изключен нулев проводник ( за случаите записани на 1, 3 и 4 ред от табл. 6.1 ).

8. Да се анализират получените резултати като се обърне внимание на измененията, които настъпват при прекъсване на нулевия или на линейния проводник.

9. Да се свърже трифазен асинхронен двигател по схемата от фиг. 6.7. Включва се П и се пуска асинхронния двигател. Проверява се посоката на въртене съвпада ли с необходимата. Ако не съвпада, се изключва П и се разменят местата на два от фазовите проводници захранващи статорната намотка. Да се попълни таблица 6.2.

Таблица 6.2

$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{AC}$	$I_A$	$P_A$
V	V	V	V	V	V	A	W

### **Контролни въпроси**

1. Как се осъществява свързването на консуматорите в звезда?
2. Какви са съотношенията между линейните и фазовите напрежения и токове при свързване в звезда на еднакви консуматори?
3. В кои участъци на трифазната верига действат линейните и фазовите напрежения и токове?
4. Кога може да не се използва нулев проводник?
5. Кой режим на работа на трифазната верига се нарича симетричен?
6. Как влияе прекъсването на нулевия проводник при различни режими на работа на веригата?
7. По какви начини може да се измери активната мощност в трифазна верига?



## ИЗСЛЕДВАНЕ НА БОБИНА С ФЕРОМАГНИТНА СЪРЦЕВИНА ПРИ СИНУСОИДАЛНО НАПРЕЖЕНИЕ

### Цел на упражнението

1. Да се изследва влиянието на захранващото напрежение и на големината на въздушната междина върху еквивалентните параметри на бобина с феромагнитна сърцевина.

2. Да се определят загубите в намотката и във феромагнитната сърцевина.

### Основни теоретични положения

Бобината с феромагнитна сърцевина представлява нелинеен елемент и се характеризира със следните особености:

1. Нелинейна зависимост между тока и напрежението.

2. Загуби във феромагнитната сърцевина вследствие на хистерезис и вихрови токове.

3. Зависимост на еквивалентните параметри на бобината от режима на работа.

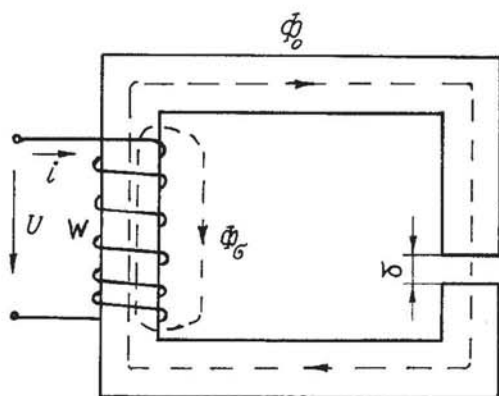
Процесите в една бобина с феромагнитна сърцевина (фиг. 7.1), при въздействието на променливо напрежение  $u$ , се описват с уравнението

$$u = R_o i + L_\sigma \frac{di}{dt} + u_o, \quad (7.1)$$

където  $R_o$  е активното съпротивление на намотката на бобината;  $L_\sigma$  - индуктивност, обусловена от потока на разсейване  $\Phi_\sigma$ ;

$u_o = -e = \omega_1 \frac{d\Phi_o}{dt}$  е напрежението уравниосяващо индуцираното е.д.н. в

намотката от основния магнитен поток  $\Phi_o$ .



фиг. 7.1

ще бъде една и съща.

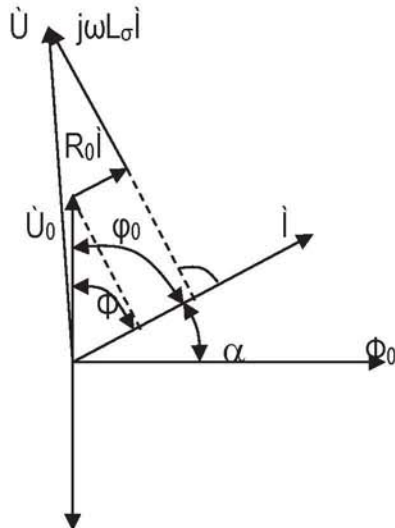
Уравнението (7.1) е нелинейно, тъй като токът  $i$  е несинусоидален когато приложеното напрежение е синусоидално. В този случай, за изследване на процесите в бобината, не може да се използва комплексният метод и изобразяването на величините посредством въртящи се вектори. Когато захранващото напрежение е синусоидално, несинусоидалният ток може да се замени с еквивалентен синусоидален, като се съблюдава равенството на ефективните им стойности. При това активната мощност, изразходвана в бобината

$$P_M = R_o I^2; \quad P_{cm} = P_x + P_{вт} = U_o I \cos \varphi_o. \quad (7.2)$$

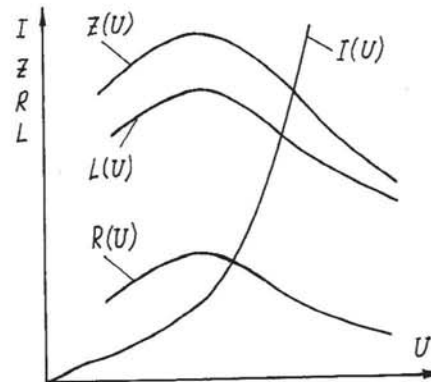
В (7.2) са възприети следните означения:  $P_M$  - загуби на мощност в активното съпротивление  $R_o$  на намотката;  $P_{cm}$  - загубите на мощност в магнитопровода, включващи загубите от хистерезис  $P_x$  и от вихрови токове  $P_{вт}$ ;  $\varphi_o$  е ъгълът на дефазирание между напрежението  $U_o$  и тока  $I$ .

Въвеждането на еквивалентен синусоидален ток позволява уравнението (7.1) да се запише в комплексна форма.

$$\dot{U} = R_o \dot{I} + j\omega L_\sigma \dot{I} + \dot{U}_o, \quad \dot{U}_o = j\omega w_1 \dot{\Phi}_o. \quad (7.3)$$



Фиг.7.2



Фиг.7.3

По уравнението (7.3) може да се построи векторна диаграма за бобината (фиг. 7.2). За основен вектор се приема магнитният поток  $\Phi_o$ . Векторът на напрежението  $\dot{U}_o$  ще изпреварва  $\Phi_o$  на ъгъл  $\frac{\pi}{2}$ . Като се прибавят към  $\dot{U}_o$  векторите на напреженията  $R_o \dot{I}$  и  $j\omega L_\sigma \dot{I}$  се получава захранващото напрежение  $\dot{U}$ .

Вследствие на загубите  $P_{cm}$  във феромагнитната сърцевина токът  $I$  изпреварва магнитния поток  $\Phi_o$  на ъгъл  $\alpha$ , който се нарича ъгъл на загубите. Очевидно е, че  $\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi_o$ , а загубите

$$P_{cm} = U_o I \cos \varphi_o = U_o I \sin \alpha. \quad (7.4)$$

От векторната диаграма се вижда, че  $\alpha = \arcsin \frac{U \cos \varphi - I R_o}{U_o}$ , а от (7.4) се

получава  $\alpha = \arcsin \frac{P_{cm}}{U_o I}$ .

Ако върху магнитопровода се постави измервателна намотка с  $w_2$  навивки и се измери индуцираното в нея е.д.н.  $E_2$ , то напрежението  $U_o$  ще бъде

$$U_o = \frac{w_1}{w_2} E_2. \quad (7.5)$$



От е.д.н.  $E_2$  може да се изчисли амплитудата на магнитния поток  $\Phi_{0m}$ , а след това и амплитудата на магнитната индукция  $B_m$ .

$$\Phi_{0m} = \frac{\sqrt{2} E_2}{\omega w_2}; \quad B_m = \frac{\Phi_{0m}}{S}. \quad (7.6)$$

Тук  $\omega = 2 \pi f$  е ъгловата честота, а  $S$  - сечението на магнитопровода.

Бобината с феромагнитна сърцевина се характеризира с еквивалентни параметри (пълно съпротивление  $z$ , активно  $R$  и индуктивно  $X$  съпротивления, и индуктивност  $L$ ), които зависят нелинейно от приложеното напрежение при неизменна честота. Те могат да се изчислят като се измерят ефективните стойности на приложеното напрежение  $U$ , тока  $I$  и консумираната мощност  $P$ .

$$z = \frac{U}{I}; \quad R = \frac{P}{I^2}; \quad X = \sqrt{z^2 - R^2}; \quad L = \frac{X}{\omega}. \quad (7.7)$$

### **Влияние на изменението на захранващото напрежение върху параметрите на бобината при $f = \text{const}$ .**

Ако в уравнение (7.1) се пренебрегнат първите два члена, то за връзката между ефективната стойност на захранващото напрежение и амплитудата на магнитната индукция се получава

$$U \approx 4,44 f w_1 S B_m \quad (7.8)$$

От (7.8) се вижда, че при неизменна честота  $f$  амплитудата на магнитната индукция  $B_m$  зависи от приложеното напрежение. От него зависят също така и загубите в магнитопровода. Еквивалентното активно съпротивление на бобината е:

$$R = R_o + R_{cm} = R_o + \frac{P_{cm}}{I^2} = R_o + \frac{B_m^2}{I^2} (k_x \cdot f + k_{вт} \cdot f^2), \quad (7.9)$$

където  $k_x$  и  $k_{вт}$  са коефициенти на пропорционалност, съответстващи на загубите от хистерезис и от вихрови токове.

Очевидно е, че при неизменна честота активното съпротивление  $R$  зависи от отношението  $\frac{B_m^2}{I^2}$ , което с увеличаването на напрежението отначало расте, а след това намалява (фиг. 7.3).

Индуктивността на бобината и пълното съпротивление имат сходен характер на изменение с  $R$  и се отличават само по своите максимуми.

Зависимостта между тока и напрежението (фиг. 7.3) е сходна по характер с основната крива на намагнитване  $B = f(H)$  на феромагнитната сърцевина.

### **Влияние на изменението на въздушната междина $\delta$ върху параметрите на бобината при $U = \text{const}$ и $f = \text{const}$ .**

От (7.8) следва, че при изменение на въздушната междина  $\delta$  в феромагнитната сърцевина и неизменно входно напрежение магнитната индукция няма да се измени.

Магнитното съпротивление  $R_m$  зависи както от тока през бобината, така и от големината на въздушната междина.

$$R_M = \frac{l_{cp}}{\mu S} + \frac{\delta}{\mu_0 S}. \quad (7.10)$$

Тук  $\mu$  е магнитната проницаемост на феромагнитната сърцевина,  $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7} \frac{H}{m}$  е магнитна константа, а  $l_{cp}$  и  $S$  са средната дължина и сечението на магнитопровода.

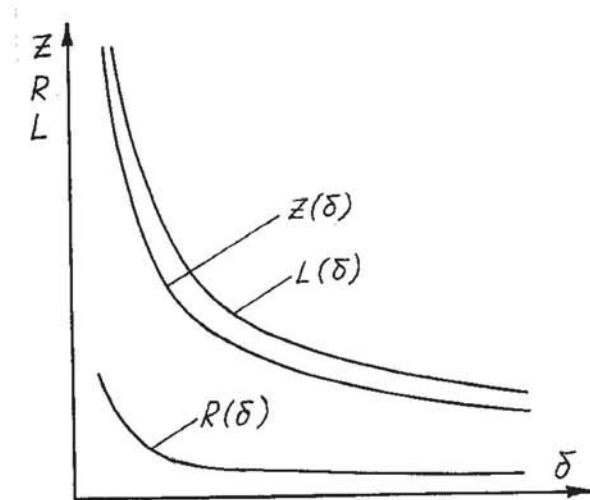
От (7.10) се вижда, че с увеличаването на  $\delta$  магнитното съпротивление расте.

Индуктивността на бобината с увеличаването на  $\delta$  намалява, което следва от израза

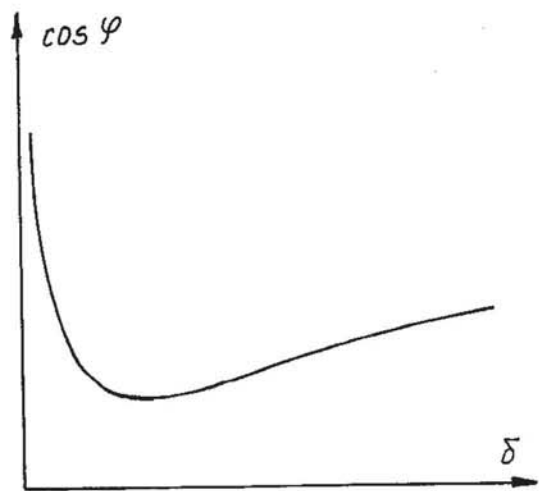
$$L = \frac{w_1 \Phi_o}{i} = \frac{w_1^2}{R_M}, \quad (7.11)$$

като зависимостта  $L = f(\delta)$  представлява хипербола.

Еквивалентното активно съпротивление  $R$  се изменя незначително при изменението на  $\delta$  и затова зависимостта  $z = f(\delta)$  е подобна на  $L = f(\delta)$ , тъй като  $X \gg R$ . Зависимостите на еквивалентните параметри от големината на въздушната междина са показани на фиг. 7.4.



Фиг.7.4



фиг.7.5

Зависимостта на фактора на мощността на бобината от изменението на въздушната междина  $\cos \varphi = f(\delta)$  може да се изследва от израза

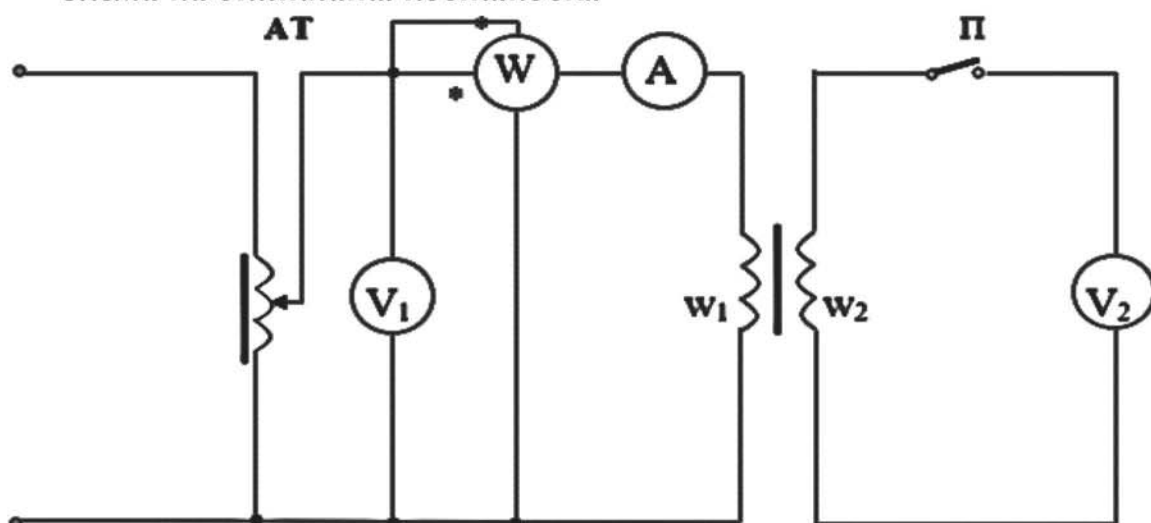
$$\cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{P_{cm}}{UI} + \frac{P_M}{UI}. \quad (7.12)$$

Първият член на (7.12) при увеличаване на  $\delta$  намалява, а вторият - расте. При това за малките стойности на  $\delta$  преобладава първият член и  $\cos \varphi$  намалява, а за по-големите стойности - по-съществено влияе вторият член и  $\cos \varphi$  нараства.

Видът на зависимостта  $\cos \varphi = f(\delta)$  е даден на фиг. 7.5 .



Схема на опитната постановка



фиг. 7.6

**Програма на работа**

1. Да се осъществи схемата показана на фиг. 7.6. При честота  $f = 50 \text{ Hz}$  и затворен прекъсвач П да се отчетат показанията на уредите при изменение на напрежението за два случая: а)  $\delta = 0$ ; б)  $\delta = 2 \text{ mm}$ . От получените данни да се изчислят еквивалентните параметри на бобината, като всички резултати се нанасят в таблица 7.1.

Таблица 7.1

$\delta$	No	$U$	$I$	$P$	$E_2$	$\cos \varphi$	$z$	$R$	$X$	$L$
mm		V	A	W	V	-	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	H
0	1									
	-									
	-									
2	1									
	-									
	-									

2. За случая  $\delta = 0$ , по данните от таблица 7.1, да се изчислят загубите в намотката и магнитопровода, а така също магнитната индукция и ъгъла на загубите. Загубите в намотката  $P_M$  се изчисляват по формула (7.2), а загубите в магнитопровода  $P_{cm} = P - P_M$ , където  $P$  е измерената от ватметъра активна мощност. Получените резултати да се нанесат в таблица 7.2.

Таблица 7.2

№	$I$	$P_M$	$P_{cm}$	$U_o$	$\alpha$	$\Phi_{om}$	$B_m$
	A	W	W	V	градус	Wb	T
1							
-							
-							

3. По данните от таблица 7.1 да се построят в обща координатна система зависимостите  $z(U)$ ,  $R(U)$ ,  $L(U)$  и  $\cos\varphi(U)$  за двата случая. В отделна координатна система да се построят зависимостите  $B_m(I)$  и  $\alpha(I)$  по данните от таблица 7.2.

4. При отворен прекъсвач П и неизменни стойности на захранващото напрежение  $U$  и на честотата  $f$  да се отчетат показанията на уредите за различни стойности на въздушната междина  $\delta$ . От получените данни да се определят параметрите на бобината, като всички резултати се запишат в таблица 7.3.

Таблица 7.3

No	$\delta$	$U$	$I$	$P$	$\cos\varphi$	$z$	$R$	$X$	$L$
	mm	V	A	W	-	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	H
1									
-									
-									

5. По данните от таблица 7.3 да се построят в обща координатна система зависимостите  $z(\delta)$ ,  $R(\delta)$ ,  $L(\delta)$  и  $\cos\varphi(\delta)$ .

6. Да се направи анализ на получените резултати.

### **Контролни въпроси**

1. Защо бобината с феромагнитна сърцевина е нелинеен елемент?
2. На какво се дължат загубите от хистерезис и от вихрови токове?
3. Какво представлява ъгълът на загубите и как може да се изчисли?
4. Как може да се изчисли магнитната индукция във феромагнитната сърцевина на бобината?
5. Как зависят еквивалентните параметри на бобината от изменението на въздушната междина?
6. В кои случаи могат да се използват комплексни числа и въртящи се вектори при описване на процесите в бобина с феромагнитна сърцевина?



## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕДНОФАЗЕН ТРАНСФОРМАТОР

### Цел на упражнението

1. Да се изучи устройството на еднофазния трансформатор.
2. Да се изследва работата на трансформатора в режим на празен ход, късо съединение и при натоварване.
3. Да се построят характеристиките на трансформатора за различните режими на работа.

### Основни теоретични положения

Трансформаторът е статично електромагнитно устройство, което преобразува електрическата енергия на променливия ток с едно напрежение и ток в енергия с друго напрежение и ток при неизменна честота. Работата на трансформатора е основана на принципа на електромагнитната индукция. Състои се от затворен магнитопровод, изработен от листов електротехническа стомана и най-малко две независими намотки, изпълнени от изолиран меден или алуминиев проводник. Към едната намотка, наречена първична, се подава променливо напрежение от източника на електрическа енергия, а към другата, наречена вторична, се свързват консуматорите. Когато се подаде променливо напрежение към първичната намотка, в магнитопровода се възбужда променлив магнитен поток, който индуцира в двете намотки електродвижещи напрежения. Техните ефективни стойности се определят по формулите

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m, \quad E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m. \quad (8.1)$$

Тук  $f$  е честотата на захранващото напрежение,  $w_1$  и  $w_2$  е броят на навивките на първичната и вторичната намотки, а  $\Phi_m$  – максималната стойност на магнитния поток в магнитопровода.

От (8.1) следва, че  $E_1$  и  $E_2$  са право пропорционални на броя на навивките. Отношението на  $E_1$  и  $E_2$  представлява коефициента на трансформация к на трансформатора.

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (8.2)$$

Когато вторичната намотка е отворена, трансформаторът работи в режим на празен ход. В този случай напрежението на изводите на тази намотка е  $U_{20} = E_2$ . Тъй като токът на празен ход през първичната намотка  $I_{10}$  е малък, то падението на напрежение в тази намотка е незначително и може да се приеме, че  $U_{10} \approx E_1$ . Тогава коефициентът на трансформация се определя с достатъчна точност от формулата

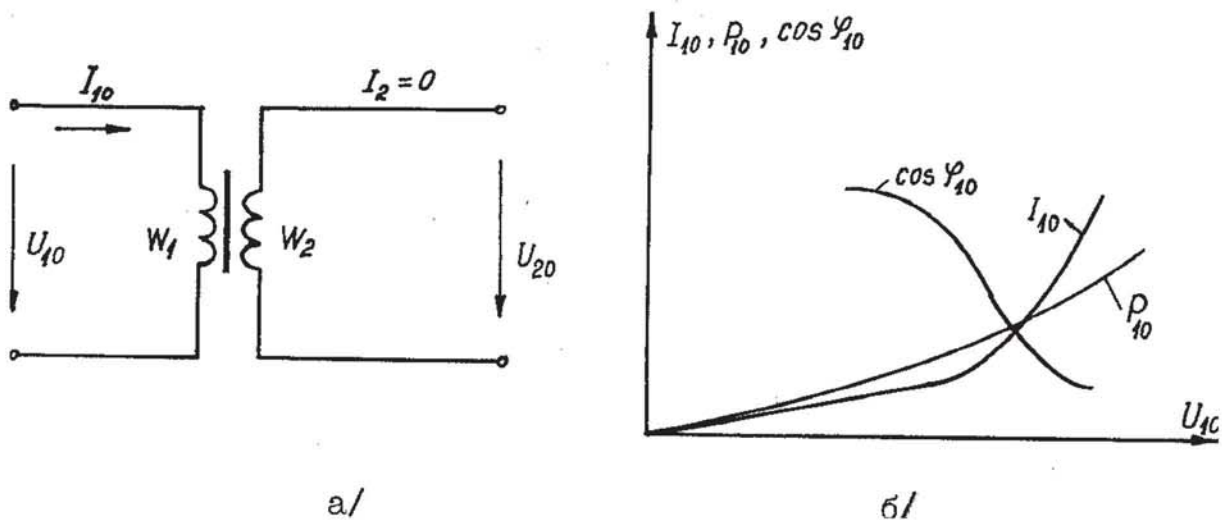
$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}}. \quad (8.3)$$

Прието е при определянето на  $k$  да се взема отношението на по-високото напрежение към по-ниското. Обикновено на практика  $k$  се изчислява по формула (8.3), като стойностите за  $U_{10}$  и  $U_{20}$  се измерват в режим на празен ход на трансформатора.

На табелката на всеки трансформатор се посочват номиналните му данни: мощност  $S_H$ , първично  $U_{1H}$  и вторично  $U_{2H}$  напрежение, първичен  $I_{1H}$  и вторичен  $I_{2H}$  ток, напрежение на късо съединение  $u_k\%$ , честота  $f$  и други.

За изследване характеристиките на трансформатора се използват следните режими на работа:

**1. Празен ход на трансформатора.** Този режим съществува при отворена вторична намотка, т.е.  $I_2 = 0$  (фиг. 8.1а). При него могат да се изследват зависимостите на тока  $I_{10}$ , консумираната мощност  $P_{10}$  и фактора на мощността  $\cos \varphi_{10}$  от напрежението  $U_{10}$  при  $f = \text{const}$ . Видът на тези характеристики е показан на фиг. 8.1б.



фиг.8.1

Консумираната от трансформатора мощност  $P_{10}$  е сума от загубите в стоманата  $P_{cm}$  и в активното съпротивление  $R_1$  на първичната намотка.

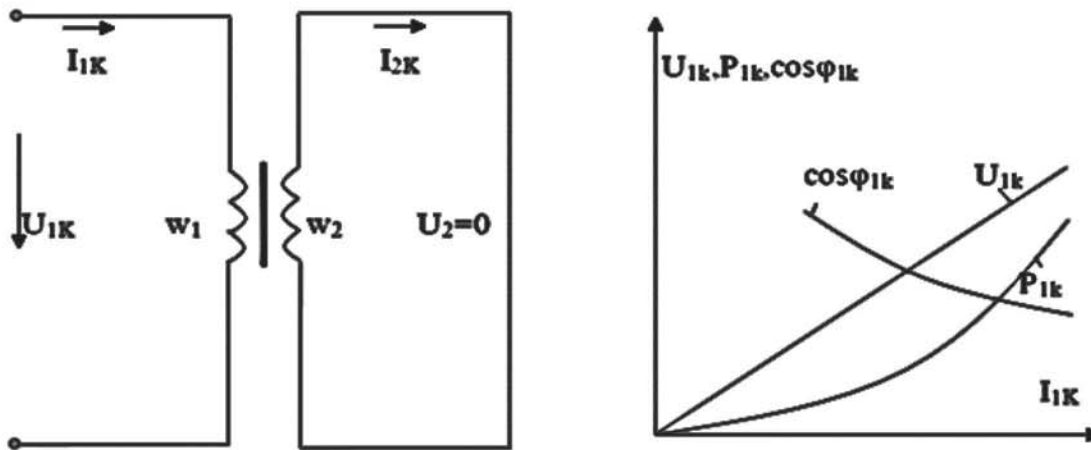
$$P_{10} = P_{cm} + I_{10}^2 R_1 . \quad (8.4)$$

Понеже токът  $I_{10}$  е малък, то  $P_{cm} \gg I_{10}^2 R_1$  и обикновено се приема, че  $P_{cm} \approx P_{10}$ .

**2. Режим на късо съединение.** Съществува при съединена накъсо вторична намотка, т.е.  $U_2 = 0$  (фиг. 8.2а). Ако при този режим първичната намотка се включи към номиналното напрежение, през намотките ще протекат много големи токове и те ще се повредят. Поради тази причина опитът на късо съединение се провежда при понижено напрежение.

Характеристиките на късо съединение са зависимостите  $U_{1k} = F(I_{1k})$ ,  $P_{1k} = F(I_{1k})$  и  $\cos \varphi_{1k} = F(I_{1k})$  при  $f = \text{const}$ . Техният вид е показан на фиг. 8.2б.





Фиг. 8.2

Консумираната от трансформатора активна мощност в режим на късо съединение представлява сума от загубите в намотките  $P_M$  и в магнитопровода  $P_{cm}$ . Тъй като опитът на късо съединение се извършва при понижено напрежение, то магнитният поток, а също така и загубите в магнитопровода са незначителни. Те могат да се пренебрегнат и да се приеме, че загубите са само в намотките, т.е.  $P_M \approx P_{1k}$ .

Напрежението  $U_{1k}$ , при което в намотките на трансформатора протичат номиналните токове, се нарича напрежение на късо съединение. Прието е то да се изразява в проценти от номиналното.

$$u_k \% = \frac{U_{1k}}{U_{1H}} \cdot 100. \quad (8.5)$$

Трансформаторите за ниско напрежение имат  $u_k = (3 \div 5) \%$ , а за високо –  $u_k = (5 \div 10) \%$ .

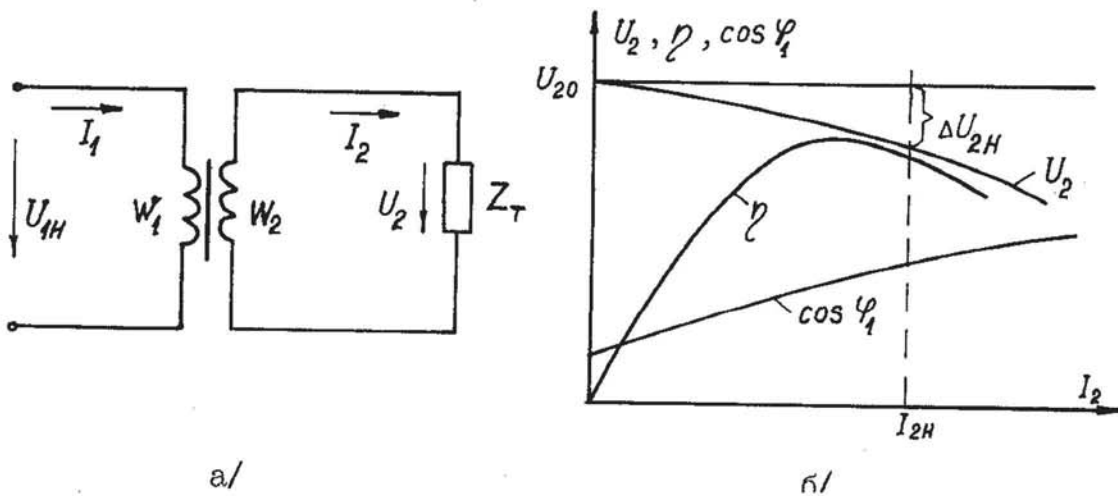
**3. Натоварване на трансформатора.** При този режим към вторичната намотка е включен консуматор, а първичната е захранена с номинално напрежение  $U_{1H}$  (фиг. 8.3а). Токът  $I_2$  зависи от пълното съпротивление на включения консуматор.

Зависимостите  $U_2 = f(I_2)$ ,  $\cos \varphi_1 = f(I_2)$  и  $\eta = f(I_2)$  характеризират работата на трансформатора при изменение на тока  $I_2$  и се наричат работни характеристики. Те се определят при изменение големината на товара, като се поддържат неизменни: характерът на товара ( $\cos \varphi_2 = \text{const}$ ), честотата  $f$  и захранващото напрежение  $U_{1H}$ .

Типичната форма на работните характеристики е дадена на фиг. 8.3б.

Изменението на напрежението  $U_2$  при натоварване е прието да се изразява в проценти от това на празен ход.

$$\Delta U_2 \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100 \quad (8.6)$$



Фиг.8.3

Факторът на мощността  $\cos \varphi_1$  на трансформатора се определя от израза

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1} \quad (8.7)$$

Коефициентът на полезно действие на трансформаторите  $\eta$  има високи стойности, като при мощните трансформатори достига до 0,96 - 0,99. Той може да бъде определен по два метода - пряк и косвен.

**а/ Пряк метод.** Измерват се подведената към трансформатора активна мощност  $P_1$  и отдадената  $P_2$ . В този случай

$$\eta_n = \frac{P_2}{P_1} \quad (8.8)$$

Методът е подходящ при трансформатори с малка мощност. Прилагането му при мощни трансформатори е свързано с голям разход на енергия. Освен това мощностите  $P_1$  и  $P_2$  са много близки и незначителни грешки при определянето им могат да доведат до отклонение от действителните стойности за  $\eta_n$ . Затова при тях се използва косвеният метод.

**б/ Косвен метод.** Коефициентът на полезно действие (к.п.д.) се изчислява по формулата

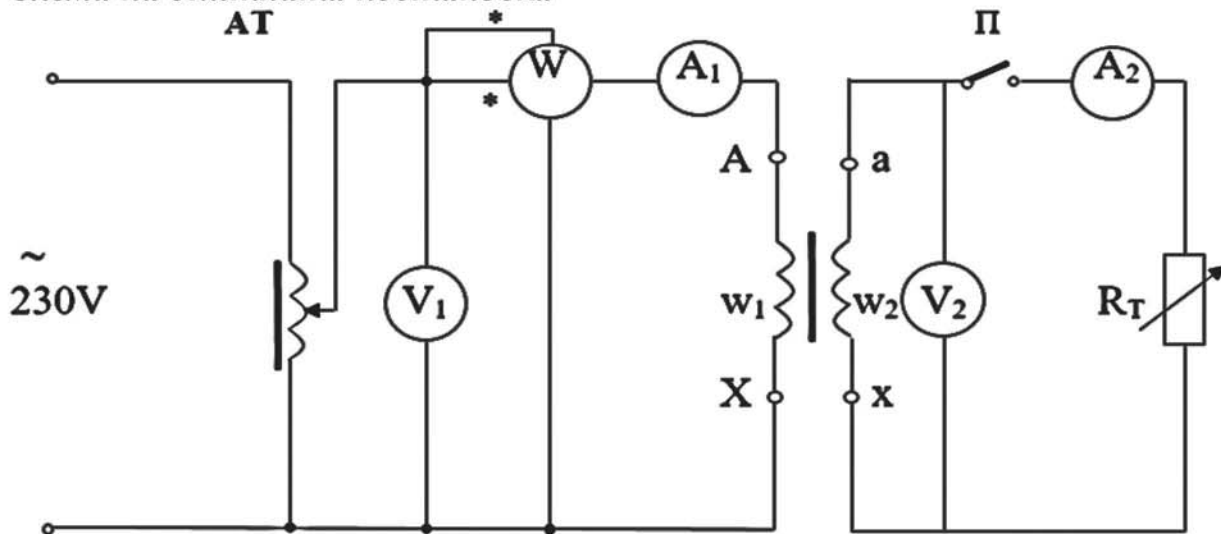
$$\eta_k = \frac{P_2}{P_2 + \sum P_{\text{заг}}} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{cm}} + P_M} \quad (8.9)$$

При определен товар загубите в магнитопровода се отчитат от характеристиката на празен ход (като се приема, че  $P_{\text{cm}} = P_{10}$ ) за съответната стойност на напрежението  $U_1$ . Загубите в намотките се вземат от характеристиката на късо съединение  $P_{1k} = f(I_{1k})$ , като се приема  $P_M = P_{1k}$ . Стойността на тока  $I_{1k}$ , който съответства на дадена мощност  $P_2$  се изчислява чрез тока  $I_2$  и коефициента на трансформация  $k$ .

$$I_{1k} = \frac{I_2}{k} \quad (8.10)$$



Схема на опитната постановка



Фиг.8.4

Експерименталното изследване на еднофазния трансформатор се извършва по схемата показана на фиг. 8.4. Към първичната намотка  $A - X$  са включени уреди за измерване на напрежението  $U_1$ , тока  $I_1$  и активната мощност  $P_1$ . Към вторичната намотка  $a - x$  са свързани уреди за измерване на напрежението  $U_2$  и тока  $I_2$ . Захранването на схемата се осъществява от мрежата чрез автотрансформатора АТ.

### Програма на работа

1. Да се осъществи схемата показана на фиг. 8.4. Плъзгачът на автотрансформатора да се постави в нулево положение, а прекъсвачът П да се изключи.

2. Да се включи автотрансформаторът към мрежата. Към първичната намотка на трансформатора да се подадат различни стойности на напрежението, като се отчетат показанията на уредите. Резултатите да се нанесат в таблица 8.1.

Таблица 8.1

№	$U_{10}$	$I_{10}$	$P_{10}$	$U_{20}$	$k$	$\cos \varphi_{10}$
	V	A	W	V	-	-
1						
-						
-						

От получените резултати да се изчислят коефициента на трансформация  $k$  по формула (8.3) и  $\cos \varphi_{10}$  от (8.7).

3. По данните от таблица 8.1 в обща координатна система да се построят зависимостите:  $I_{10} = f(U_{10})$ ,  $P_{10} = f(U_{10})$  и  $\cos \varphi_{10} = f(U_{10})$ .

4. При изключено захранване да се свържат с проводник изводите на вторичната намотка, а плъзгачът на автотрансформатора да се постави в нулево положение. С това схемата се подготвя за провеждане на опита на късо съединение.

Да се включи схемата към мрежата. Постепенно да се изменя захранващото напрежение, докато токът в първичната намотка достигне до  $1,25 I_{1H}$ . За различни стойности на тока  $I_1 < 1,25 I_{1H}$  да се отчетат показанията на уредите, като резултатите се нанесат в таблица 8.2. От получените данни по формула (8.5) да се изчисли  $u_k$ .

5. Да се построят в обща координатна система характеристиките на късо съединение:  $U_{1k} = f(I_{1k})$  и  $P_{1k} = f(I_{1k})$ .

Таблица 8.2

№	$U_{1k}$	$I_{1k}$	$P_{1k}$	$u_k$
	V	A	W	%
1				
-				
-				

6. При изключено захранване се включва прекъсвача П. След това се включва захранването и посредством автотрансформатора се задава и поддържа неизменно номиналното напрежение на първичната намотка. Трансформаторът постепенно се натоварва чрез изменение на товарното съпротивление  $R_T$ . Отчитат се показанията на уредите и се записват в таблица 8.3. Натоварването на трансформатора се извършва до стойност на тока  $I_2 = 1,25 I_{2H}$ .

Таблица 8.3

№	$U_1$	$I_1$	$P_1$	$U_2$	$I_2$	$P_2$	$\cos \varphi_1$	$\eta_{II}$	$\eta_k$
	V	A	W	V	A	W	-	%	%
1									
-									
-									

От получените резултати се изчисляват  $\cos \varphi_1$  от (8.7) и коефициента на полезно действие по прекия и косвения метод. Коефициентът на полезно действие  $\eta_{II}$  по прекия метод се изчислява по формулата

$$\eta_{II} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2}{P_1}, \text{ тъй като } \cos \varphi_2 = 1. \quad (8.11)$$

Изчисляването на к.п.д.  $\eta_k$  по косвения метод се извършва по следния начин: от табл. 8.1 се вземат загубите в стоманата  $P_{cm} = P_{10}$  съответстващи на номиналното напрежение  $U_{1H}$ , а загубите в намотките се отчитат от зависимостта  $P_{1k} = f(I_{1k})$  за съответната стойност на тока  $I_1$  от таблица 8.2 и по формула (8.9) се изчислява стойността на  $\eta_k$ .

7. По данните от таблица 8.3 да се построят в обща координатна система работните характеристики на трансформатора:  $U_2 = f(I_2)$ ,  $\eta_{II} = f(I_2)$  и  $\cos \varphi_1 = f(I_2)$ .

8. Да се анализират получените резултати и се направят изводи относно определянето на коефициента на трансформация, к.п.д. и за работните характеристики на трансформатора.



### ***Контролни въпроси***

1. Какво е устройството на еднофазния трансформатор?
2. От какво зависи големината на е.д.н. индуцирани в намотките на трансформатора?
3. Какво представлява коефициентът на трансформация и как може да се изчисли?
4. Как могат да се получат работните характеристики на трансформатора?
  5. По какъв начин се определя процентното изменение на вторичното напрежение за даден товар?
  6. Какви загуби на енергия има в трансформатора и от какво зависят?
  7. Как се извършват опитите на празен ход и късо съединение?

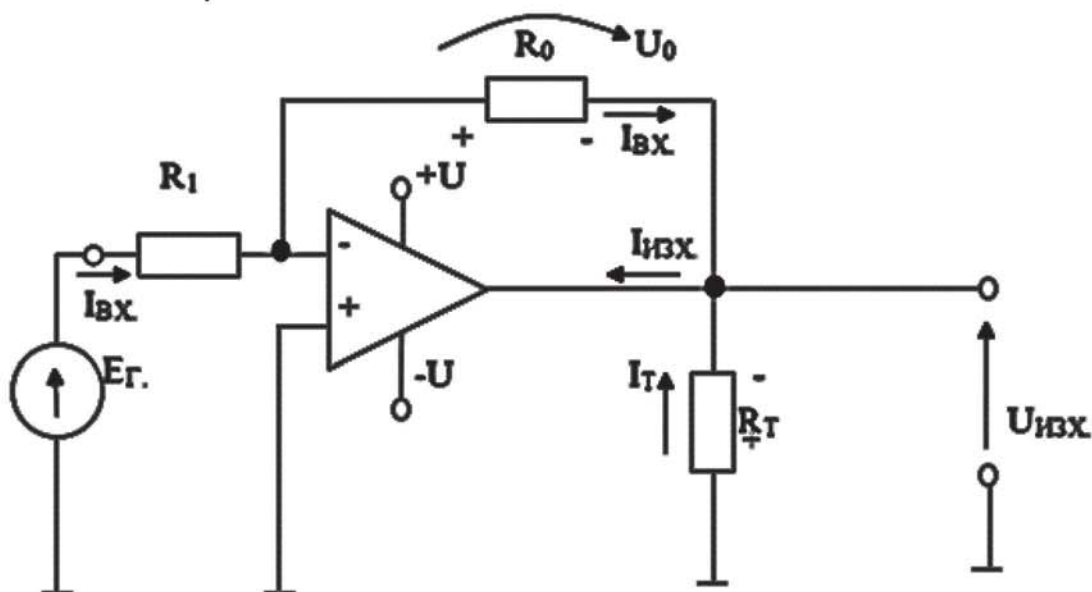
## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИНВЕРТИРАЩ ИНТЕГРАЛЕН ОПЕРАЦИОНЕН УСИЛВАТЕЛ

### Цел на упражнението

Упражнението има за цел да се изучат особеностите и принципа на действие на инвертиращия операционен усилвател с линейна интегрална схема и да се изследват характеристиките му.

### Основни теоретични положения

Инвертиращият операционен усилвател се състои от линейна интегрална схема, обхваната от отрицателна обратна връзка, която определя общия коефициент на усилване на усилвателя. Принципната схема на усилвателя е показана на фиг. 9.1.



Фиг.9.1

Входният сигнал се подава към инвертиращия вход на интегралната схема чрез резистора  $R_1$ . Отрицателната обратна връзка се осъществява с помощта на резистора  $R_0$ . При анализиране работата на операционните усилватели се приемат следните опростяващи предположения [6] :

- линейната интегрална схема има много голям коефициент на усилване по напрежение;
- напрежението между инвертиращия и неинвертиращия вход на интегралната схема е пренебрежимо малко, приблизително равно на нула и може да се приеме, че инвертиращият вход е свързан към общия извод (масата на електронната схема);
- консумираният ток от входа е пренебрежимо малък;
- вътрешното съпротивление на източника  $E_G$  е включено в  $R_1$ .

Тъй като инвертиращият вход е с нулев потенциал, то падението на напрежение върху резистора  $R_1$  е равно на  $E_G$ . Тогава входният ток  $I_{вх}$  е



$$I_{\text{вх}} = \frac{E_{\Gamma}}{R_1}. \quad (9.1)$$

Поради малката консумация на инвертиращия вход, се приема, че входният ток протича почти изцяло през веригата на обратната връзка. Следователно

$$U_o = I_{\text{вх}} R_o = E_{\Gamma} \frac{R_o}{R_1} \quad (9.2)$$

Като се вземе предвид, че инвертиращият вход потенциално е свързан към общия извод, то съгласно втория закон на Кирхоф

$$U_{\text{изх}} = -U_o = -\frac{R_o}{R_1} E_{\Gamma}. \quad (9.3)$$

От (9.3) за коефициента на усилване по напрежение  $k_u$  се получава:

$$k_u = \frac{U_{\text{изх}}}{E_{\Gamma}} = -\frac{R_o}{R_1}. \quad (9.4)$$

Очевидно е, че при направените по-горе предположения, коефициентът на усилване се определя само от стойностите на резисторите  $R_o$  и  $R_1$  и не зависи от параметрите на линейната интегрална схема. Знакът минус показва, че поляритетът на изходното напрежение  $U_{\text{изх}}$  е противоположен на поляритета на  $E_{\Gamma}$  и затова усилвателят се нарича инвертиращ.

Токовете през товара  $R_T$  и през обратната връзка  $R_o$  постъпват от изходната верига на операционния усилвател, като големината на тока  $I_T$  се определя само от стойностите на  $R_T$  и  $U_{\text{изх}}$ , т.е.

$$I_T = \frac{U_{\text{изх}}}{R_T}. \quad (9.5)$$

Изходният ток на усилвателя ще бъде

$$I_{\text{изх}} = I_T + I_{\text{вх}} = \frac{E_{\Gamma}}{R_1} \left(1 + \frac{R_o}{R_1}\right). \quad (9.6)$$

Максималните стойности на  $I_{\text{изх}}$  за различните операционни усилватели са в границите от 5 до 10 mA.

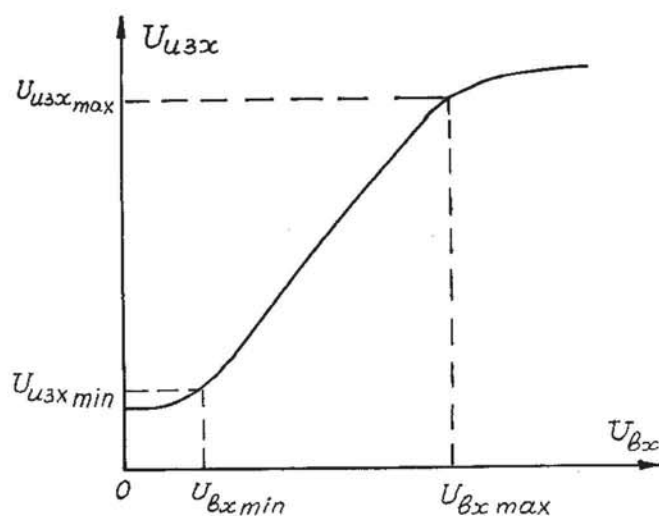
Входното съпротивление на инвертиращия усилвател е равно на  $R_1$ . За да се запази достатъчно голяма стойността му, е необходимо  $R_1$  да се избира не по-малко от 10 kΩ.

Ако поляритетът на  $E_{\Gamma}$  е обратен на този, означен на фиг. 9.1, то посоките на всички токове и напрежения са противоположни на означените, но получените съотношения се запазват.

Амплитудната характеристика на усилвателя представлява зависимостта на изходното напрежение от входното, при фиксирана стойност на честотата на входния сигнал. При нискочестотните усилватели тази характеристика се изследва, като работната честота се задава в обхвата (500 ÷ 2000) Hz. Характерно за амплитудната характеристика е, че при малки и големи стойности на входното напрежение има нелинеен характер (фиг. 9.2).

За малки стойности на  $U_{\text{вх}}$  това се дължи на влиянието на собствените шумове на усилвателя, а при напрежения по-големи от

$U_{вхmax}$  влияят нелинейните характеристики на елементите в схемата.



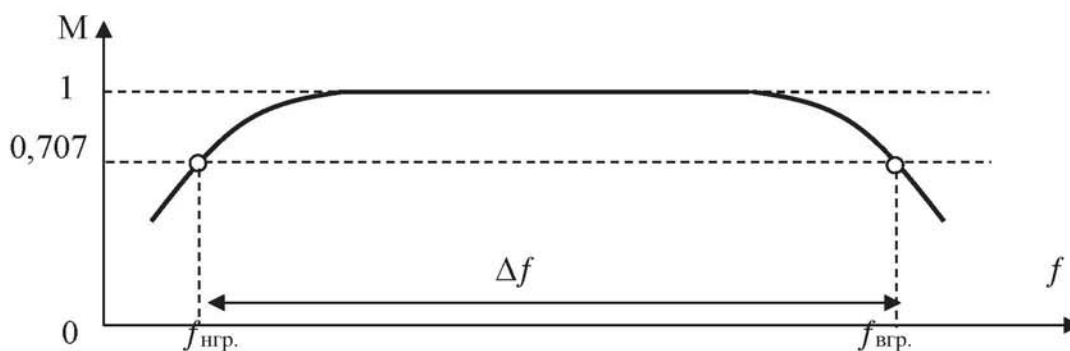
Фиг.9.2

Коефициентът на усилване по напрежение на усилвателя се определя от линейната област на амплитудната характеристика.

$$k_U = \frac{U_{изх}}{U_{вх}}. \quad (9.7)$$

Обикновено в усилвателните устройства той се изразява в логаритмични единици - децибели

$$k_U = 20 \lg \frac{U_{изх}}{U_{вх}}, \quad (dB). \quad (9.8)$$



Фиг.9.3

Амплитудно-честотната характеристика изразява зависимостта на модула на коефициента на усилване по напрежение от честотата на входния сигнал  $k_U(f)$ . Тази характеристика е удобно да се построи в нормиран вид ( фиг. 9.3 ).

$$M(f) = \frac{k_U(f)}{k_0}, \quad (9.9)$$

където  $k_0$  е коефициентът на усилване при средни честоти. При тези честоти се получава най-голяма равномерност на амплитудно-честотната характеристика.



От (9.9) се определят честотните изкривявания при ниски  $f_H$  и високи  $f_B$  честоти

$$M_H = \frac{k_H}{k_0}; \quad M_B = \frac{k_B}{k_0}, \quad (9.10)$$

където  $M_H$  и  $M_B$  са коефициентите на честотни изкривявания. Изразени в децибели (dB),  $M_H$  и  $M_B$  имат следния вид:

$$M_H \text{ (dB)} = 20 \lg \frac{k_H}{k_0}; \quad M_B \text{ (dB)} = 20 \lg \frac{k_B}{k_0}. \quad (9.11)$$

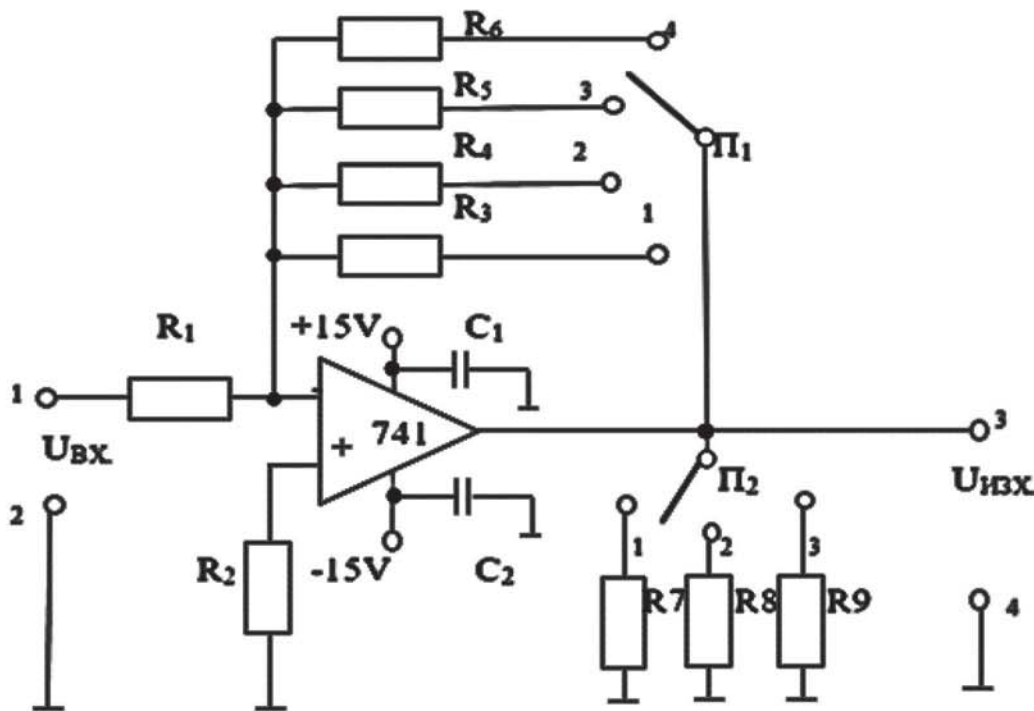
За нискочестотните усилватели като допустими честотни изкривявания се приемат  $M_H = M_B = 0,707 \div 1,41$  или в децибели  $\pm 3$  dB. Граничните честоти  $f_{Hгр}$  и  $f_{Bгр}$  (фиг. 9.3), между които честотните изкривявания  $M_H$  и  $M_B$  са в посочените граници, определят пропусканата честотна лента на усилвателя

$$\Delta f = f_{Bгр} - f_{Hгр}. \quad (9.12)$$

Тъй като при нискочестотните усилватели  $f_{Bгр} \gg f_{Hгр}$ , то обикновено се приема  $\Delta f \approx f_{Bгр}$ .

### Схема на опитната постановка

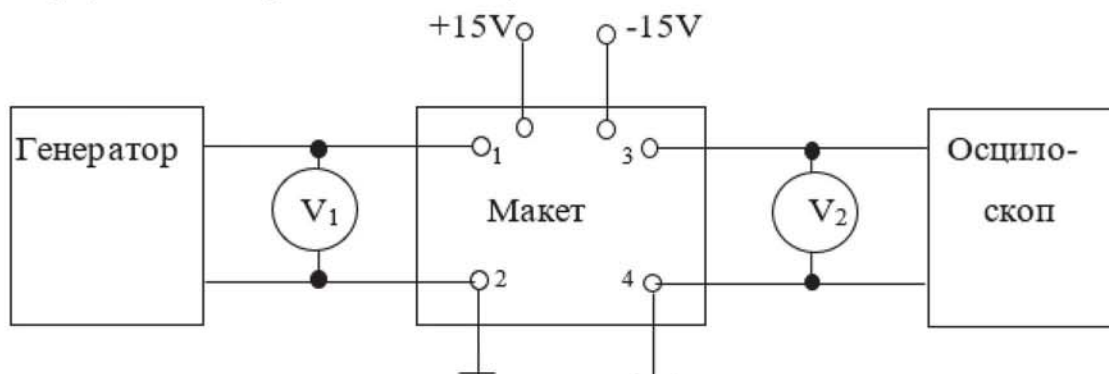
Схемата на изследвания усилвател е показана на фиг.9.4, а тази на опитната постановка - на фиг. 9.5.



Фиг.9.4

Входният сигнал се подава на инвертиращия вход на интегралната схема чрез резистора  $R_1$ . Неинвертиращият вход е свързан към общия извод /масата/ посредством резистора  $R_2$ . Изменението на коефициента на усилване се осъществява чрез превключване на резисторите  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  и  $R_6$ . С помощта на превключвателя  $\Pi_2$  се включват различни по големина товарни съпротивления

$R_7$ ,  $R_8$  и  $R_9$  към изхода на усилвателя. Кондензаторите  $C_1$  и  $C_2$  служат за филтриране на захранващото напрежение.



Фиг.9.5

### Програма на работа

1. Да се реализира схемата на опитната постановка от фиг. 9.5.
2. Да се снемат амплитудната характеристика  $U_{\text{изх}} = f(U_{\text{вх}})$  на усилвателя при различна дълбочина на обратната връзка. Изследването се извършва като на входа на усилвателя се подава хармоничен сигнал с постоянна честота  $f = 1000$  Hz. Амплитудата на този сигнал се изменя чрез регулатора на генератора от нула до стойности, при които на екрана на осцилоскопа се появяват изкривявания на формата на сигнала. Показанията на волтметрите се записват в таблица 9.1.

Таблица 9.1

$R_0$												
No	$U_{\text{вх}}$	$U_{\text{изх}}$	$k_U$		$U_{\text{вх}}$	$U_{\text{изх}}$	$k_U$		$U_{\text{вх}}$	$U_{\text{изх}}$	$k_U$	
	V	V	-	dB	V	V	-	dB	V	V	-	dB
1												
-												
-												

За да се изберат стойностите на входното напрежение при отделните измервания, е необходимо първоначално да се определи максималното входно напрежение  $U_{\text{вхmax}}$ , при което се появяват изкривявания на изходния сигнал. След това интервалът от нула до  $U_{\text{вхmax}}$  се разделя на подинтервали, така че да се снемат 10 точки от характеристиката.

Изменението на коефициента на усилване се извършва чрез последователно включване на резисторите  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  или  $R_6$  с превключвателя  $\Pi_1$ .

3. По данните от таблица 9.1 в обща координатна система да се построят зависимостите  $U_{\text{изх}} = f(U_{\text{вх}})$  при различна дълбочина на обратната връзка.

4. Да се изследват амплитудно-честотните характеристики на усилвателя при различна дълбочина на обратната връзка. Амплитудата на входния сигнал се избира от линейния участък на съответната амплитудна характеристика в границите  $(0,2 \div 0,5) U_{\text{вхmax}}$  и се поддържа постоянна при изменение на честотата. Изходното напрежение се измерва посредством волтметъра  $V_2$ .



Необходимо е първоначално да се определят граничните честоти  $f_{Нгр}$  и  $f_{Вгр}$ , при които усилването  $k_U$  е 0,707 от  $k_0$ . В интервала между  $f_{Нгр}$  и  $f_{Вгр}$  се задават 15 стойности на честотата. Изменението на честотата в областта на ниските и високите честоти трябва да се избере значително по-малко, отколкото при средни честоти.

Резултатите от измерванията и изчисленията да се нанесат в таблица 9.2.

Таблица 9.2

No	$R_0 = R_3 \quad U_{ВХ} =$				$R_0 = R_4 \quad U_{ВХ} =$				$R_0 = R_5 \quad U_{ВХ} =$			
	$f$	$U_{ИЗХ}$	$k_U$	$M$	$f$	$U_{ИЗХ}$	$k_U$	$M$	$f$	$U_{ИЗХ}$	$k_U$	$M$
	Hz	V	-	-	Hz	V	-	-	Hz	V	-	-
1												
-												
-												

5. По данните от таблица 9.2 в обща координатна система да се построят зависимостите  $M(f)$  и се определи пропусканата честотна лента.

### **Контролни въпроси**

1. Да се обясни принципа на действие на инвертиращия усилвател с линейна интегрална схема.

2. Какво представлява амплитудната характеристика на усилвателя и как се определя?

3. От какво зависи коефициента на усилване по напрежение на инвертиращия операционен усилвател при използването на линейна интегрална схема с много голям коефициент на усилване?

4. Какво представлява нормираната амплитудно-честотна характеристика на усилвателя?

5. Как се определя пропусканата от усилвателя честотна лента?

6. Да се изчислят изходното напрежение, коефициента на усилване и изходния ток на усилвателя, ако  $E_{Г} = 0,5 \text{ V}$ ,  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 200 \text{ k}\Omega$ ,  $R_7 = 10 \text{ k}\Omega$ .

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИМПУЛСНИ УСТРОЙСТВА

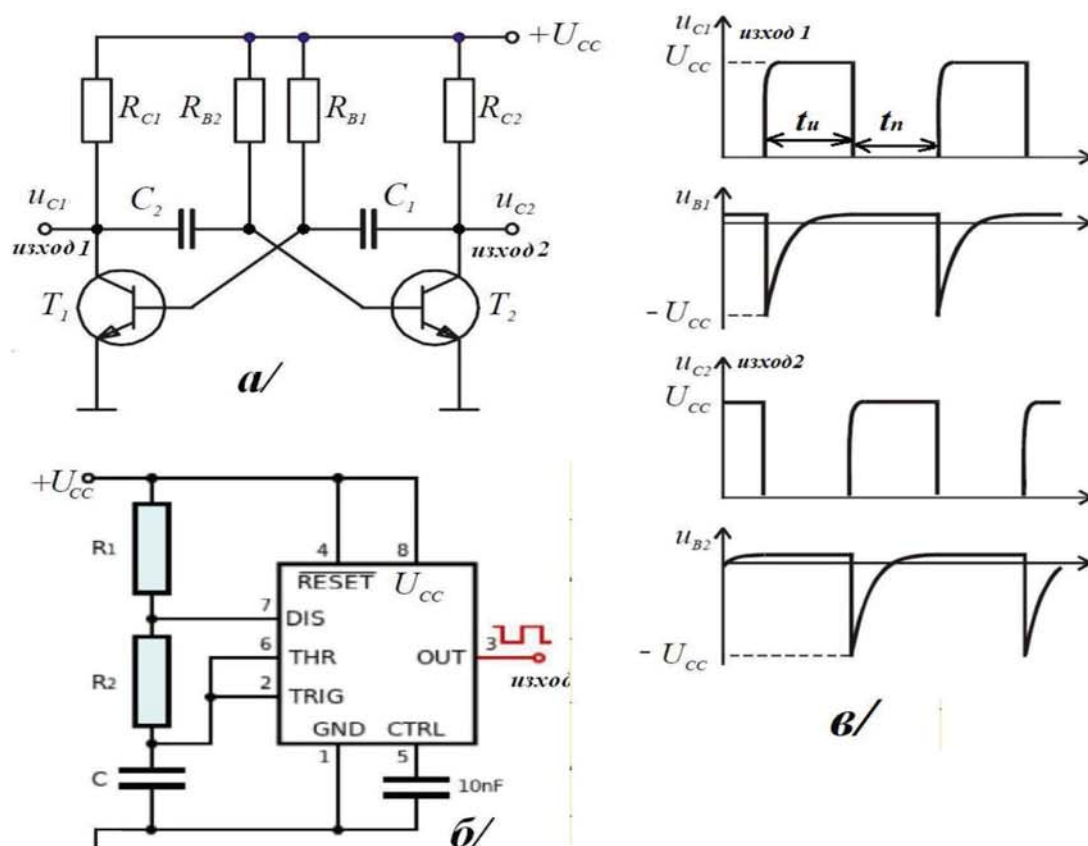
### Цел на упражнението

Упражнението има за цел да се запознаят студентите с принципа на действие на основните импулсни устройства – мултивибратори, тригери и броячи. Да се анализират и сравнят теоретичните постановки с резултатите от експерименталните изследвания.

### Основни теоретични положения

Един от основните елементи на повечето импулсни устройства е електронния ключ. В електронните ключове се използват диоди, биполярни транзистори, полеви транзистори и др., които работят в ключов режим. Ключовият режим на работа се характеризира с две състояния на електронния ключ: включено състояние и изключено състояние. Едното от тези състояния условно се означава с логическа единица - 1, а другото с логическа нула - 0.

Електронни схеми, в които входните и изходните сигнали имат само две състояния - логическа единица и логическа нула се наричат цифрови схеми. Най-често цифровите схеми са интегрални т.е. в общ корпус са херметизирани голям брой полупроводникови елементи свързани във функционален възел.



фиг. 10.1



**Мултивибраторите** представляват генератори на правоъгълни импулси. В най-често използваното им изпълнение, те представляват двустъпални RC усилватели с положителна обратна връзка (фиг.10.1а). Освен с дискретни елементи (биполярни и полеви транзистори) мултивибраторите се изпълняват и с интегрални цифрови схеми (фиг.10.1б).

В показания на фиг.10.1а схема на мултивибратор, процесът на получаване на импулси се осъществява чрез периодично зареждане на кондензаторите  $C_1$  и  $C_2$  през резисторите  $R_{C2}$  и  $R_{C1}$  и разреждането им през резисторите  $R_{B1}$  и  $R_{B2}$  и транзисторите  $T_2$  и  $T_1$ .

Времето на импулсите е:

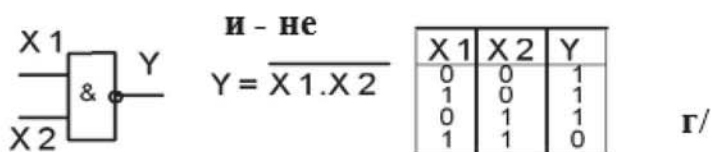
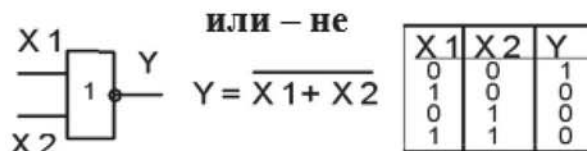
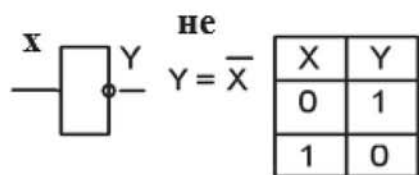
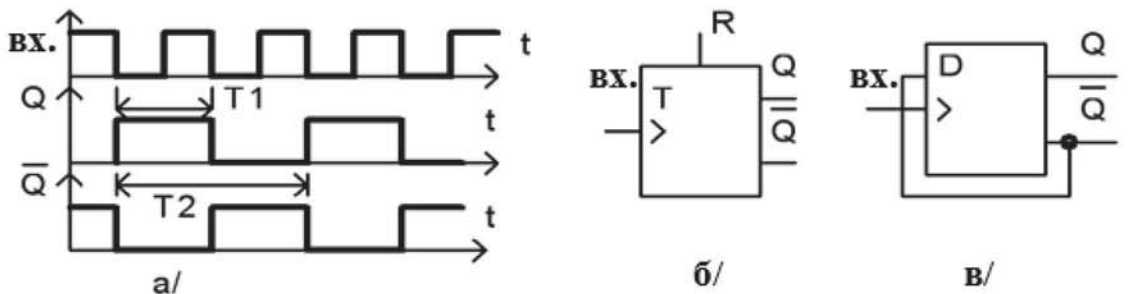
$$t_{И1}=0,7.R_{B1}.C_1 \quad t_{И2}=0,7.R_{B2}.C_2$$

Периодът на генерираните импулси е:

$$T = t_{И1} + t_{И2} \tag{10.2}$$

На фиг.10.1в са показани времедиаграми на входните и изходните сигнали.

**Тригерите** са импулсни устройства за обработка на импулсни сигнали и намират широко приложение в броячи, регистри памети и др. Тригерът е електронно импулсно устройство с две устойчиви състояния, едното от които съответства на логическа единица, а другото на логическа нула. При подаване на външни управляващи сигнали той преминава със скок от едното състояние в другото. Тригерите имат два изхода означени с  $Q$  и  $\bar{Q}$ , които са инверсни един спрямо друг, т.е. ако единия е в състояние логическа 0, другият е в състояние логическа 1. Тригерите имат един или няколко входа. Докато не се въздейства на входовете им, тригерите запазват състоянието си, т.е. те са елементи с памет.

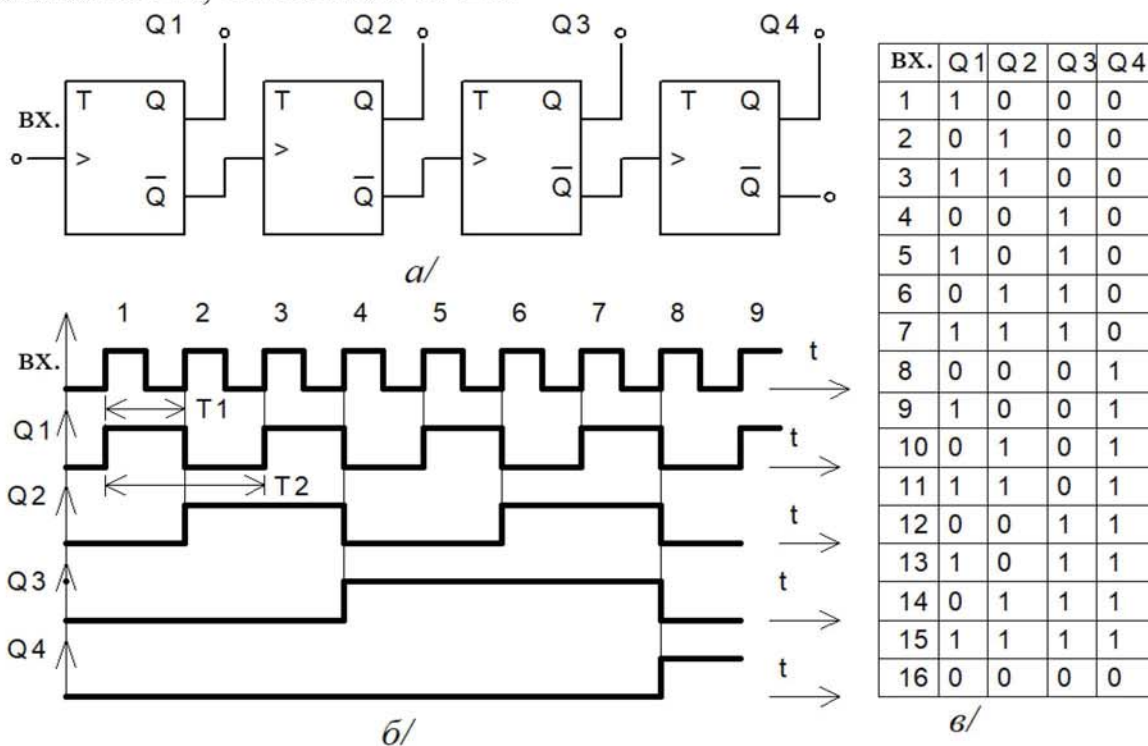


фиг. 10.2

Най-често на състояние логическа единица отговаря напрежение 5V, а на състояние логическа нула напрежението е 0.

Ще бъдат разгледан Т-тригери, които имат един информационен вход означен с Т, като при всяко подаване на логическа 1 се предизвиква смяна на състоянието на тригера. При подаване на логическа 0 състоянието не се променя (фиг.10.2а). Често входът Т се нарича броячен вход. От фиг. 10.2а се вижда, че честотата на повторение на изходните импулси е два пъти по-малка от честотата на входните импулси. Това определя една от големите области на приложение на Т- тригерите като делители на честота.

Символичното означение на Т- тригерите е дадено на фиг.10.2б. На фиг.10.2в е дадена реализация на Т- тригер с помощта на D- тригер, чийто тактов вход се използва като вход Т. Нека тригерът е нулиран ( $Q=0$ ). При постъпване на тактов импулс на вход Т по време на положителния фронт (преход от лог.0 към лог.1) състоянието на изход  $Q$  ще стане логическа 1 ( $Q=1$ ). Когато на входа Т постъпи нов импулс, тригерът се установява отново в състояние нула ( $Q=0$ ). Освен информационен вход, Т- тригерите имат и вход за нулиране R (Reset). Тригерът работи при вход  $R=1$  и се нулира при подаване на вход R на лог.0 ( $R=0$ ), при което изход  $Q$  приема състояние лог. 0 ( $Q=0$ ). На фиг.10.2г. са показани символичните означения и таблиците на състоянията на основните логически елементи НЕ, ИЛИ-НЕ и И-НЕ.



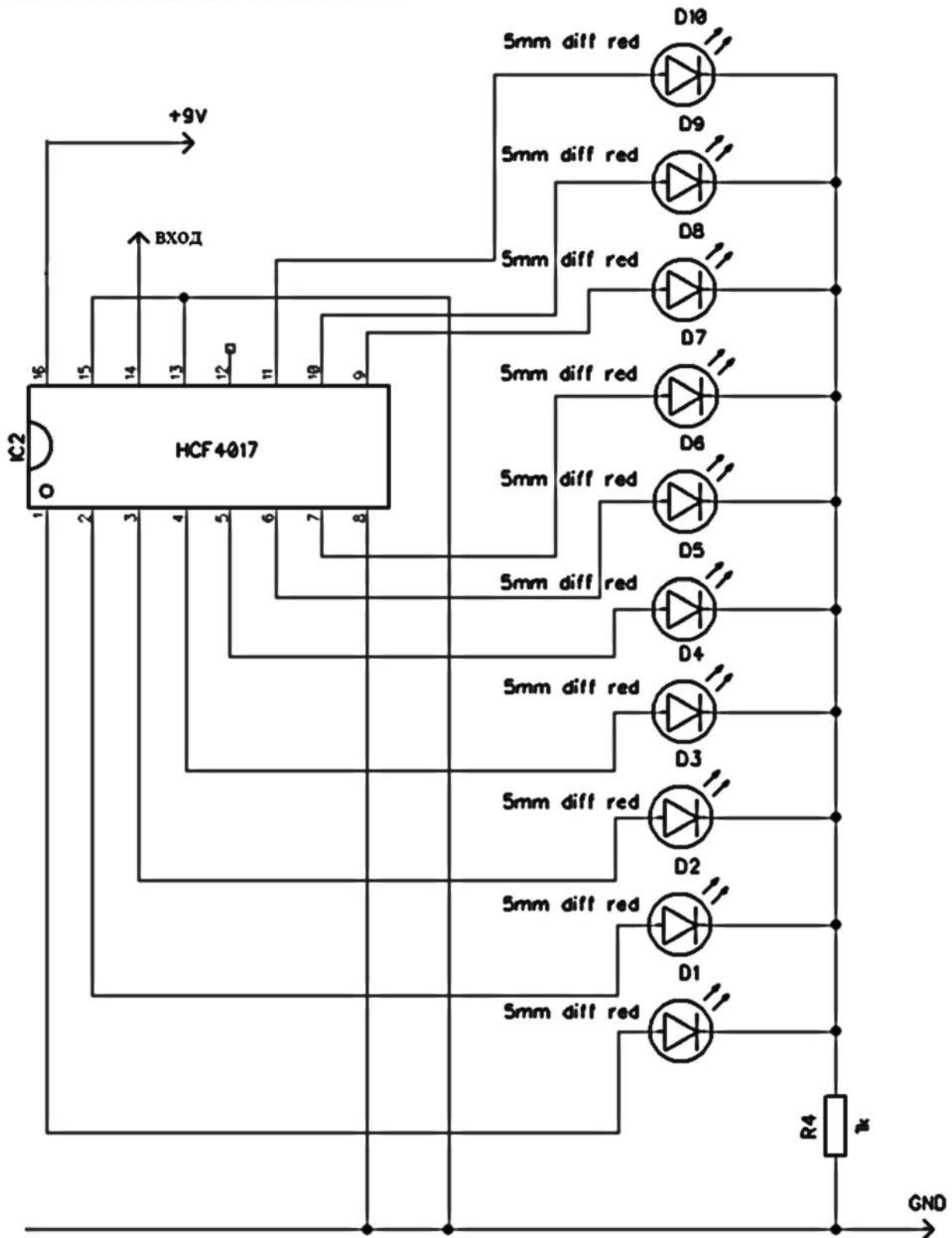
фиг. 10.3

**Броячът** е импулсно устройство, което отброява броя на постъпилите на входа му импулси. Най-често броячите представляват различни схемни съчетания от тригери и логически елементи. Броячите могат да се използват като делители на честота, при което на всеки  $k=2^n$  входни импулси на изхода се получава само един импулс (n- брой на тригерите). На фиг. 10.3а е показана схема на делител на честота. На фиг.10.3б са показани времедиаграми на изходите му  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ . На фиг.10.3в е показана таблица със състоянието на изходите при всеки такт на входа. При използването на брояча като делител на честота се

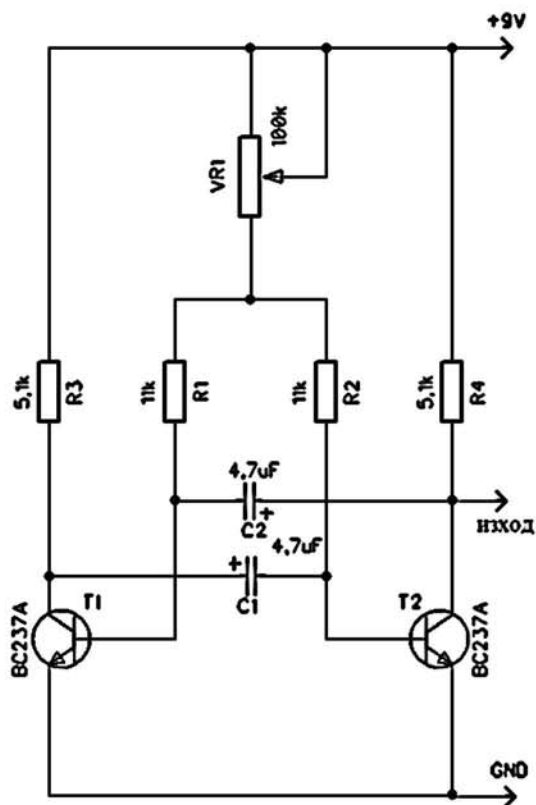


използва само един изход, докато при броячи за отброяване на импулси се използват изходите на всички участващи тригери, всеки от които е отделен разряд от двоичното представяне на числото. Най-разпространени са четириразрядните двоични (или шестнадесетични) броячи до 16 (Фиг.10.3.).

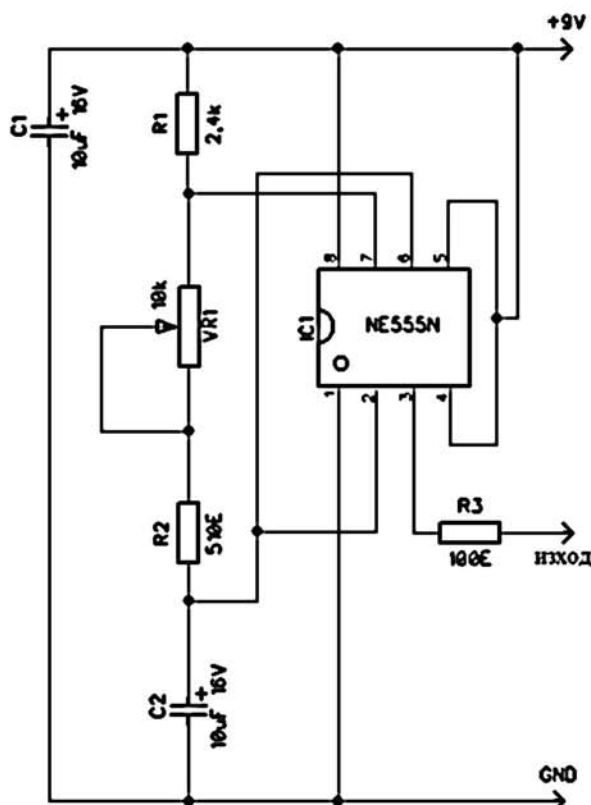
*Схеми на опитните постановки*



Фиг.10.4



а/  
Фиг.10.5



б/

### Програма на работа

1. Да се реализира схемата на мултивибратор (фиг.10.1а), като с превключвателите П<sub>1</sub> и П<sub>2</sub> се включат различни капацитети. С помощта на електронно лъчев осцилоскоп да се заснеме формата на импулсите и да се измерят амплитудата и продължителността им. По зададени стойности на елементите да се изчислят продължителността на импулсите  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , както и периода  $T$ . Резултатите да се нанесат в таблица10.1.

Таблица 10.1

N:	R	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	изчислени			измерени		
				$\tau_1$	$\tau_2$	T	$\tau_1$	$\tau_2$	T
	кΩ	μF	μF	s	s	s	s	s	s

2. Да се изследва схемата на генератор на правоъгълни импулси на фиг. фиг.10.5а. В показания на фиг.10.5а схема на мултивибратор, процесът на получаване на импулси се осъществява чрез периодично зареждане на кондензаторите C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub> през резисторите R<sub>C2</sub> и R<sub>C1</sub> и разреждането им през потенциометъра VR1, резисторите R<sub>B1</sub> и R<sub>B2</sub> и транзисторите T<sub>2</sub> и T<sub>1</sub>. Чрез потенциометърът VR1 се регулира периода на импулсите.



3. Да се изследва схемата на генератор на правоъгълни импулси на фиг. Фиг.10.5б. В тази схема за генератор на правоъгълни импулси се използва таймер NE555. Таймер 555 е интегрална схема намираща приложение като таймер, генератор на импулси и на времезакъснения. Това е асинхронен RS-тригер със специфични входни прагове, точно дефиниран от аналогови компаратори и вграден делител на напрежение. Чрез потенциометърът VR1 се регулира периода на импулсите.

В сила са зависимостите:

$$t_{\text{и}} = \ln 2 \cdot (R1 + R2 + VR1) \cdot C2 \quad (10.3)$$

$$t_{\text{п}} = \ln 2 \cdot R2 \cdot C2 \quad (10.4)$$

3. Да се изследва схемата на устройството за управление на десет светодиода на фиг. Фиг.10.4. Устройството е подходящо за декорация, игри и забавления. Устройството управлява десет светодиода, като използва таймер генериращ импулси (NE555) и десетичен брояч (HCF4017). Десетичен брояч HCF4017 е изпълнен от 5 D- тригер и логически елементи.

### ***Контролни въпроси***

1. С какво се характеризира и как се осъществява ключов режим на работа на транзисторите?
2. Какво представляват мултивибраторите?
3. От какво се определя продължителността на импулсите при мултивибраторите?
4. Какво представляват тригерите
5. Как се реализира делител на честота чрез T- тригер?
6. Как се реализира брояч чрез T- тригер?
7. Как се представя десетично число като двоично (шестнадесетично)?

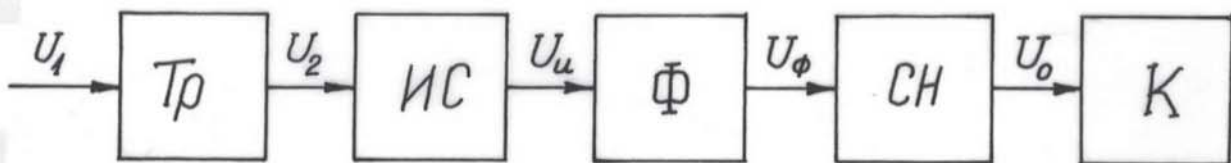
## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕДНОФАЗНИ НЕУПРАВЛЯЕМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ТОКОИЗПРАВИТЕЛИ

### Цел на упражнението

1. Да се запознаят студентите с характеристиките и приложението на полупроводниковите диоди за преобразуване на променливия ток в постоянен.
2. Да се изучат особеностите на токоизправителните схеми.
3. Да се изследва работата и характеристиките на токоизправителите при активен товар.
4. Да се запознаят студентите с действието, основните схеми и приложението на изглаждащите филтри и на стабилизаторите на напрежение.

### Основни теоретични положения

За захранване с електрическа енергия на консуматори за постоянен ток се използват устройства, в които се преобразува променливия ток в постоянен. Тези устройства се наричат токоизправители и съдържат следните основни блокове ( фиг. 11.1):

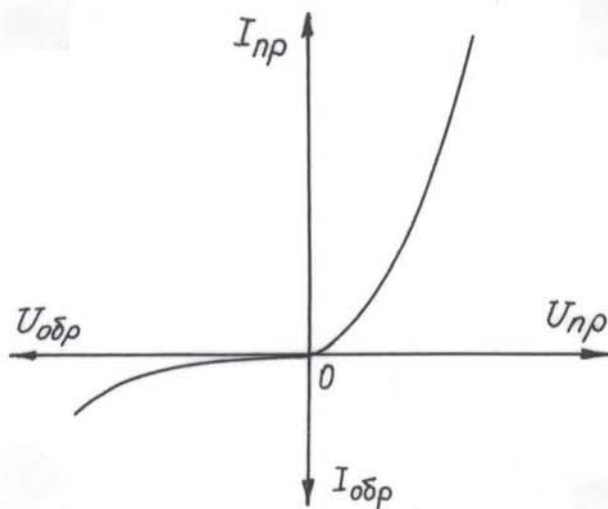


Фиг. 11.1

1. Трансформатор ( Tr ) - преобразува напрежението на мрежата  $U_1$  в необходимото напрежение  $U_2$  (обикновено понижава напрежението) за захранване на изправителната схема, както и за галванично разделяне на променливотоковата и постояннотоковата верига;
2. Изправителна схема ( ИС ) - преобразува променливото напрежение в постоянно пулсиращо напрежение;
3. Филтър ( Ф ) - служи да намали пулсациите на изправеното напрежение;
4. Стабилизатор на напрежение ( СН ) - поддържа неизменна стойност на изходното напрежение при изменение на напрежението на мрежата или при промяна на натоварването от консуматора ( К ) .

В зависимост от предназначението на токоизправителя в описаната блокова схема могат да отсъстват някои от посочените блокове. Основен елемент във всички токоизправители е изправителната схема, като най-често тя се изпълнява с полупроводникови диоди. Те се характеризират с различна проводимост в права и обратна посока, което определя изправителните им свойства. Полупроводниковите диоди имат нелинейна волт-амперна характеристика  $I = f(U)$  (фиг. 11.2).





Фиг. 11.2

Основните параметри на изправителните диоди са:

- средна стойност на изправения ток -  $I_0$  ;
- максимално допустимо обратно напрежение -  $U_{RM}$  ;
- максимално падение на напрежението в права посока -  $U_F = (0,2 \div 0,3) \text{ V}$  за германиеви и  $U_F = (0,5 \div 1,0) \text{ V}$  за силициеви диоди;
- праг на отпушване на диода -  $U_{отп} = (0,2 \div 0,3) \text{ V}$  за германиеви и  $U_{отп} = 0,7 \text{ V}$  за силициеви диоди;
- средно диференциално

съпротивление -  $r_d = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = (1 \div 10) \Omega$  ;

- максимална работна температура  $t_{max} = (85 \div 100)^\circ\text{C}$  за германиеви и  $t_{max} = (150 \div 200)^\circ\text{C}$  за силициеви диоди.

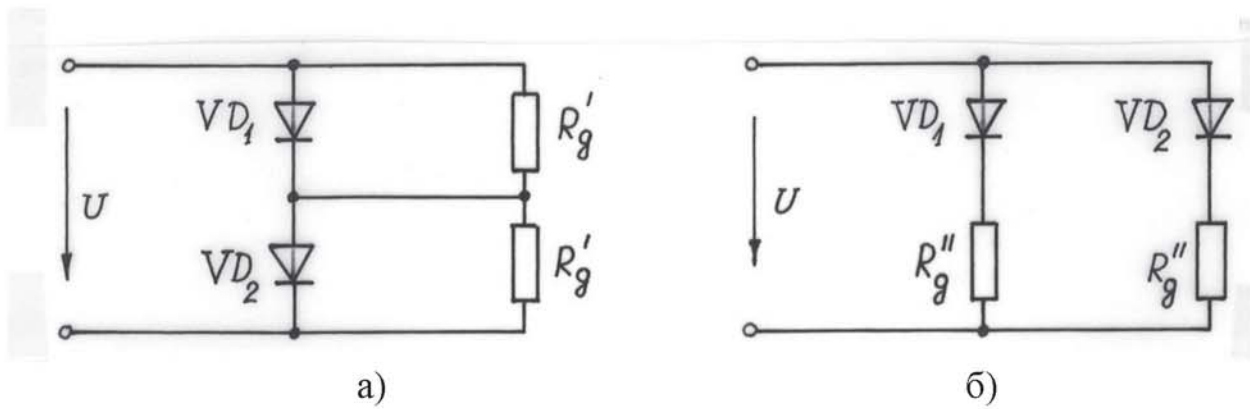
В изправителните схеми, при протичане на ток през диодите в права посока, основната част от напрежението се прилага към включения последователно на диодите консуматор. Когато токът протича в обратна посока, върху диодите се прилага почти цялото захранващо напрежение.

Повишаването на приложеното към диодите обратно напрежение води до понижаване на тяхното съпротивление, в резултат на което настъпва пробив на диода. Затова не трябва да се допуска амплитудата на обратното напрежение да превиши максималното допустимо напрежение  $U_{RM}$ .

Когато е необходимо да се изправи напрежение по-високо от допустимото обратно напрежение за дадените диоди, то те се свързват последователно. Тъй като характеристиките на диодите не са напълно еднакви, за да се избегне пробив на някой от диодите, свързани последователно, те се шунтират с резистори със съпротивление  $R'_d = (0,1 \div 0,2) R_{обр}$  ( фиг. 11.3а ).

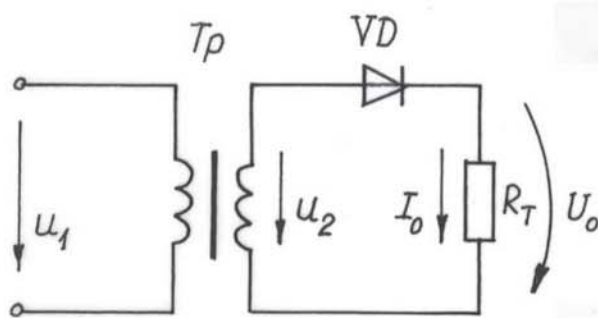
Ако токът на изправителното устройство е по-голям от допустимия ток на диодите, те се свързват паралелно. Като се има предвид, че може да съществува разлика в техните съпротивления в права посока, то последователно на тях се включват изравнителни резистори със съпротивление  $R''_d = (5 \div 10) R_{пр}$  ( фиг.11.3б ), с което се осигурява равномерно разпределение на тока през отделните диоди.

При неуправляемите еднофазни изправители се използват следните схеми:



Фиг. 11.3

**а) Еднополупериодна изправителна схема.** Тази схема е показана на фиг.



Фиг. 11.4

11.4. Тя намира приложение за захранване на консуматори, при които пулсациите на напрежението нямат съществено значение за нормалната им работа. Ток през товара  $R_T$  протича само когато потенциалът на анода на диода е по-висок от този на катода.

Средната стойност на изправеното напрежение е

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_{2m}}{\pi} \quad (11.1)$$

Връзката между ефективната стойност на напрежението на вторичната намотка на трансформатора  $U_2$  и напрежението  $U_0$  е

$$U_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} U_0 = 2,22 U_0 \quad (11.2)$$

Средната стойност на изправения ток се определя от израза

$$I_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_{2m} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_{2m}}{\pi}, \quad (11.3)$$

а за ефективната стойност на тока през трансформатора се получава

$$I_2 = \frac{I_{2m}}{2} = \frac{\pi}{2} I_0 = 1,57 I_0 \quad (11.4)$$

Максималната стойност на обратното напрежение е

$$U_{обр} = U_{2m} = 3,14 U_0 \quad (11.5)$$

Изчислителната /типovата/ мощност на захранващия трансформатор се определя по формулата

$$S_{тр} = 3,09 P_0 = 3,09 U_0 I_0 \quad (11.6)$$

Коефициентът на пулсации  $\kappa_{п}$  се дефинира като отношение на амплитудата на основния хармоник на изправеното напрежение  $U_{0m}$  към средната му стойност  $U_0$ , т.е.

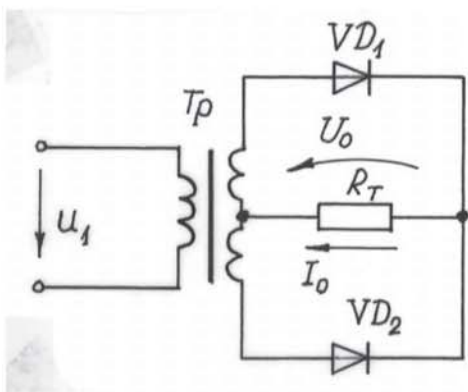


$$k_{\Pi} = \frac{U_{0m}}{U_0}. \quad (11.7)$$

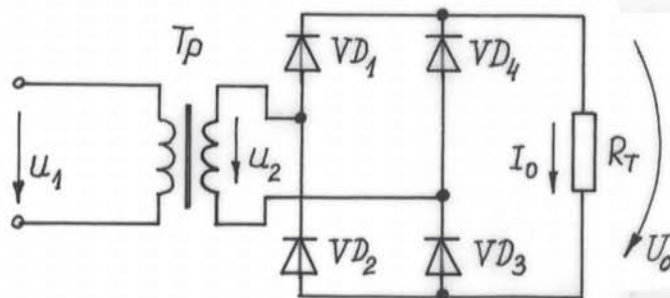
За еднополупериодна схема  $k_{\Pi} = 1,57$ , а основният хармоник се изменя с честотата на захранващото напрежение.

**б) Двуполупериодна изправителна схема със среден извод.** При тази схема е необходимо захранващият трансформатор да има вторична намотка със среден извод (фиг. 11.5). Напреженията на двете половини на вторичната намотка са изместени по фаза на  $180^\circ$ . В резултат на това през единия полупериод на напрежението  $u_1$  е отпушен диодът  $VD_1$ , а през другия -  $VD_2$ . През товарното съпротивление  $R_T$  протича токът  $I_0$ .

Основните съотношения между величините, характеризиращи тази схема са



Фиг. 11.5



Фиг. 11.6

дадени в таблица 11.1.

**в) Двуполупериодна мостова изправителна схема.** Захранването на изправителната схема се осъществява в единия диагонал на моста, а към другия е свързано товарното съпротивление  $R_T$  (фиг.11. 6). Мостовата схема е двутактна, тъй като през вторичната намотка на трансформатора протича ток през двата полупериода. През единия полупериод пропускат диодите  $VD_1 - VD_3$ , а през другия -  $VD_2 - VD_4$ . Основните зависимости между величините, характеризиращи мостовата изправителна схема, са дадени в таблица 11.1.

Мостовата схема може да се включи към захранващата мрежа без трансформатор, докато за схемата със среден извод това е невъзможно.

За намаляване на пулсациите на изправеното пулсиращо напрежение до стойност, допустима за нормалната работа на консуматорите, се използват изглаждащи филтри. Основен параметър на филтъра е коефициентът на изглаждане  $S$ , представляващ отношение между коефициента на пулсации на изхода на изправителната схема  $k_{\PiИ}$  и на изхода на филтъра  $k_{\PiФ}$ .

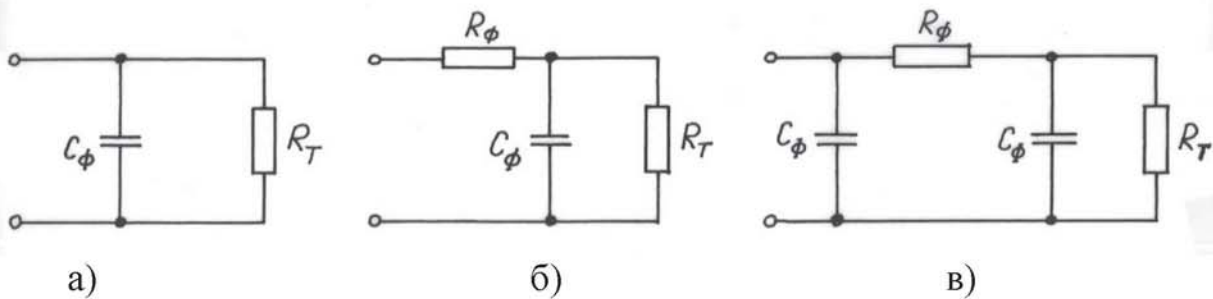
$$S = \frac{k_{\PiИ}}{k_{\PiФ}}. \quad (11.8)$$

Коефициентът на пулсации на изхода на филтъра се определя в зависимост от предназначението на токоизправителя.

Таблица 11.1

№	Основни параметри			Изправителна схема		
				Еднополу- -периодна	Двуполупериодна	
					със среден извод	мостова
1.	Напрежение на вторичната намотка на трансформатора	$U_2$	V	$2,22 U_0$	$1,11 U_0$	$1,11 U_0$
2.	Ток през вторичната намотка на трансформатора	$I_2$	A	$1,57 I_0$	$0,785 I_0$	$1,11 I_0$
3.	Изчислителна /типова/ мощност на трансформатора	$S_{тр}$	V	$3,09 P_0$	$1,48 P_0$	$1,23 P_0$
4.	Максимална стойност на обратното напрежение на диода	$U_{обр}$	V	$3,14 U_0$	$3,14 U_0$	$1,57 U_0$
5.	Средна стойност на тока през диода	$I_{cp}$	A	$I_0$	$0,5 I_0$	$0,5 I_0$
6.	Ефективна стойност на тока през диода	$I$	A	$1,57 I_0$	$0,785 I_0$	$0,785 I_0$
7.	Коефициент на пулсации	$k_{п}$	-	1,57	0,67	0,67
8.	Честота на основния хармоник при $f_1 = 50$ Hz	$f_0$	Hz	50	100	100

В маломощните токоизправители за филтри се използват кондензатори с голям капацитет, които се включват паралелно на товара (фиг. 11.7а) или резисторно-капацитивни филтри (фиг. 11.7б и в).



Фиг. 11.7

Вследствие на периодичното зареждане на кондензаторите при отпушени диоди и непълното им разреждане при запушени диоди, се получава изглаждане на пулсациите.

В мощните токоизправители се използват индуктивно-капацитивни филтри (фиг.11.8). Действието на кондензатора, като елемент на филтъра, се свежда към това, че той шунтира товарното съпротивление и пропуска през себе си значителна част от променливата съставляща на изправения ток. Затова е необходимо да бъде изпълнено условието

$$\frac{1}{m\omega C_{\Phi}} \ll R_T. \quad (11.9)$$

Действието на индуктивността се свежда до това, че тя притежава

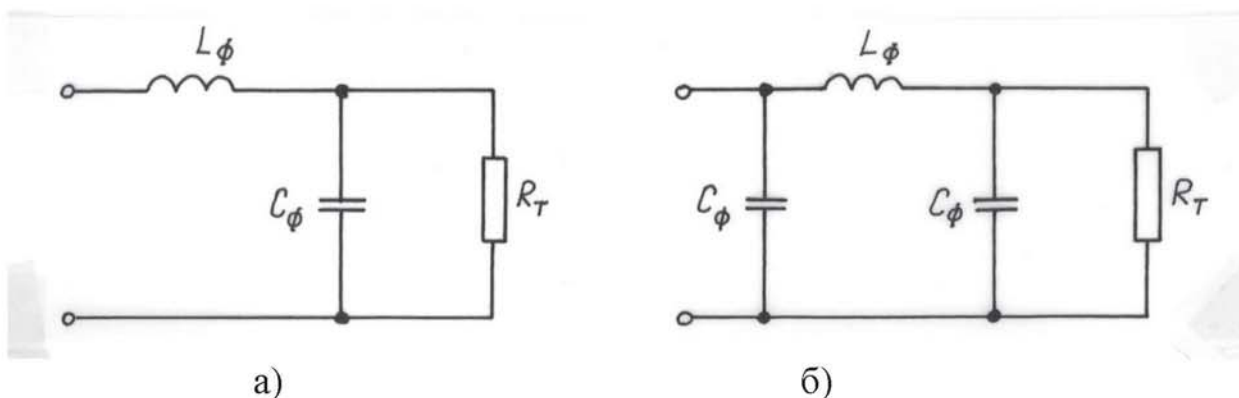


индуктивно съпротивление и върху нея пада значителна част от променливата съставка на напрежението.

$$m \omega L \gg R_T. \quad (12.10)$$

В горните формули  $m$  е номерът на хармоничната съставяща на напрежението.

Напрежението върху товара може да се измени при промяна на захранващото напрежение или съпротивлението на товара. За да се поддържа с определена точност неизменна стойността на напрежението върху



Фиг. 11.8

консуматорите, се използват стабилизатори на напрежение. Основна тяхна характеристика е коефициентът на стабилизация

$$k_{cm} = \frac{\frac{\Delta U_0}{U_0}}{\frac{\Delta U_\Phi}{U_\Phi}} = \frac{\Delta U_0}{\Delta U_\Phi} \cdot \frac{U_\Phi}{U_0}. \quad (12.11)$$

Тук  $U_\Phi$  и  $U_0$  са номиналните стойности на напрежението на входа и на изхода на стабилизатора, а  $\Delta U_\Phi$  и  $\Delta U_0$  - измененията на тези напрежения.

Най-простата схема на стабилизатор на постоянно напрежение съдържа резистор  $R$  и ценов диод  $VD$ , който е включен паралелно на товарното съпротивление  $R_T$  (фиг. 11.9а). Волт-амперната характеристика на ценовия диод е показана на фиг. 11.9б.

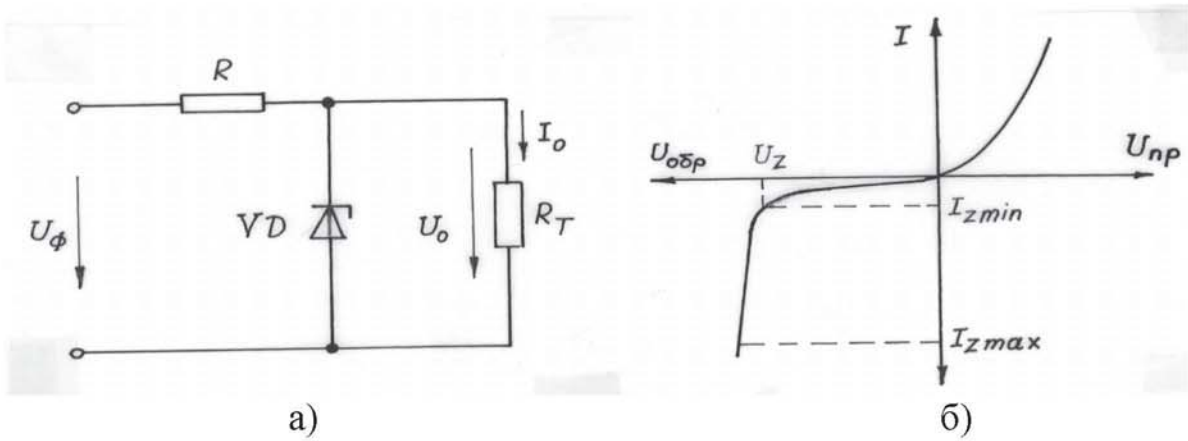
Когато се изменя  $U_\Phi$  или  $R_T$  в определени граници, изходното напрежение  $U_0$  се изменя слабо, тъй като в схемата напрежението се преразпределя между резистора  $R$  и вътрешното съпротивление на ценовия диод.

Стабилизаторите от посочения тип работят ефективно, само ако токът през товара  $I_0$  е по-малък от максималния ток на стабилизация на ценовия диод  $I_{zmax}$ .

Основните параметри на ценовите диоди са:

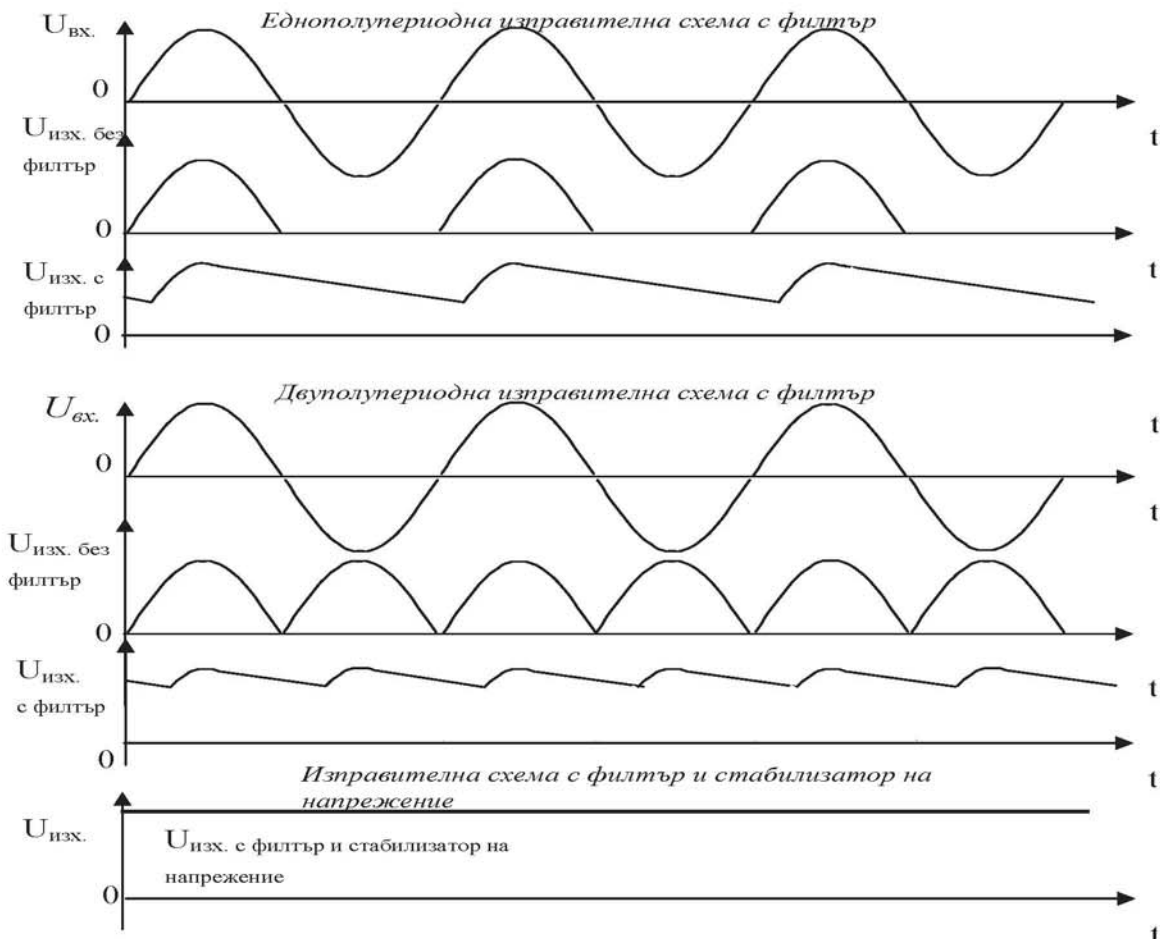
- напрежение на стабилизация при  $I_{zmin}$  -  $U_z$ ;
- минимален ( $I_{zmin}$ ) и максимален ( $I_{zmax}$ ) ток на стабилизация;
- диференциално съпротивление -  $r_d = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} = (0,5 \div 200) \Omega$ ;
- максимална допустима мощност на разсейване  $P_{max} = U_z I_{zmax}$ .

Основна характеристика на токоизправителите е зависимостта на



Фиг. 11.9

напрежението върху товара от протичащия ток -  $U_0 = f(I_0)$ . Тя има падащ характер, който се дължи на факта, че с увеличаването на  $I_0$  (при намаляване на  $R_T$ ) се увеличава падението на напрежение в диодите, в намотката на трансформатора и в елементите на филтъра.

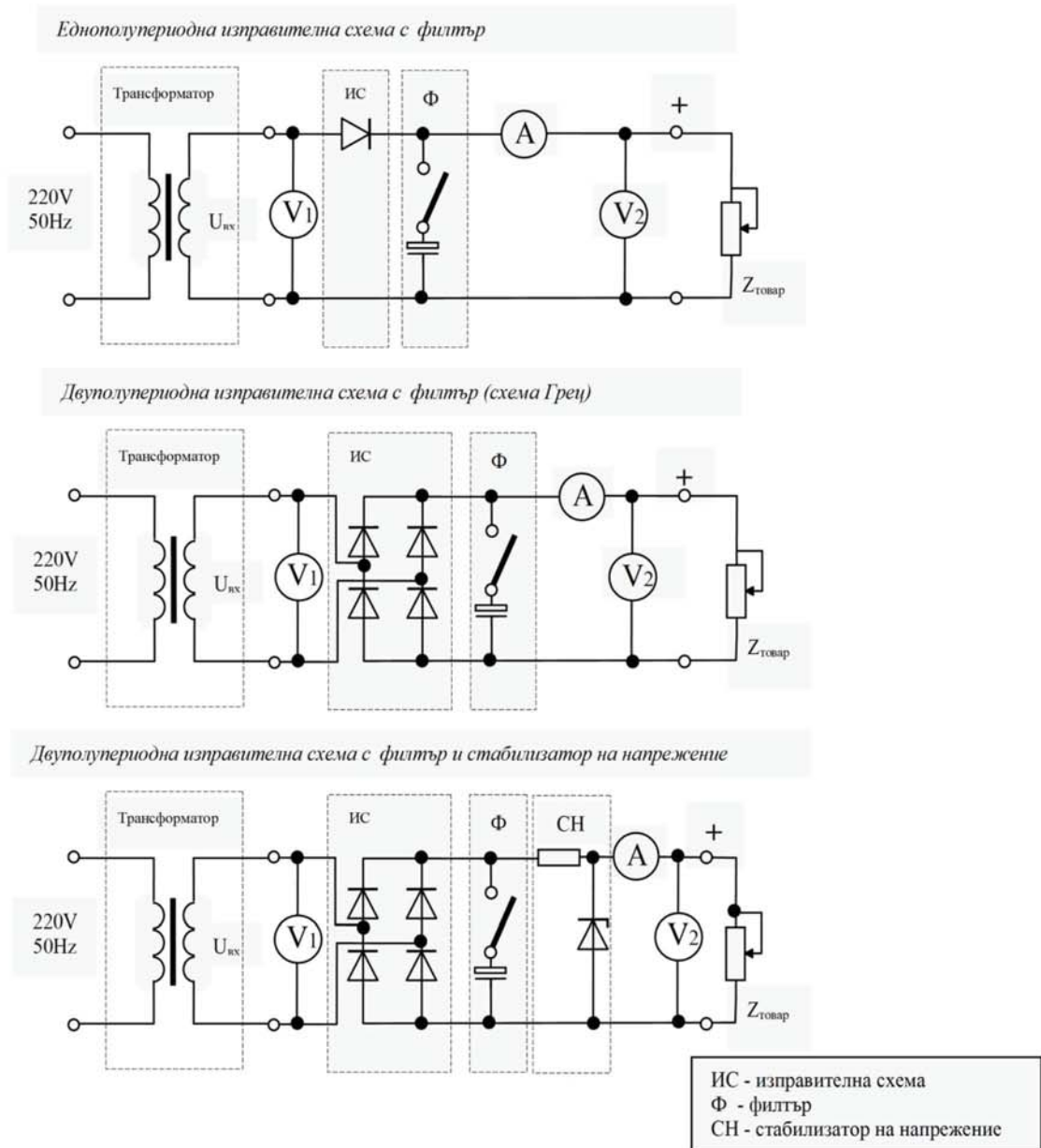


Фиг. 11.10

При изследване на токоизправители се използва осцилоскоп, който позволява да наблюдаваме и изследваме пулсациите на постоянното напрежение на изхода на токоизправителя. На фиг. 11.10 са показани примерни времедиаграми.

**Схеми на опитните постановки**





Фиг. 11.11

**Програма на работа**

1. Да се осъществят схемите, показани на фиг. 11.11. Да се снемат от екрана на осцилоскоп напреженията  $U_{вх}$  и  $U_{изх}$  при отсъствие на стабилизатор за следните случаи:

- а) едно- и двуполупериодна изправителна схема;
- б) различни схеми на филтри;
- в) различни по големина активни товари.

2. Да се снесе външната характеристика  $U_{изх.} = f(I_{изх.})$ , отделно за едно- и двуполупериодна изправителна схема, при различни филтри, за две стойности на напрежението  $U_{вх.}$ . Резултатите да се нанесат в таблици 11.1 и 11.2.

Таблица 11.1

еднополупериодна изправителна схема с филтър										
$U_{\text{вх.}}, V$	$I_{\text{изх.}}$	A								
	$U_{\text{изх.}}$	V								

Таблица 11.2

двуполупериодна изправителна схема с филтър										
$U_{\text{вх.}}, V$	$I_{\text{изх.}}$	A								
	$U_{\text{изх.}}$	V								

3. По данните от табл.11.1 и табл.11.2 на обща координатна система да се построят външните характеристики  $U_{\text{изх.}} = f(I_{\text{изх.}})$ , на едно- и двуполупериодна изправителна схема и да се сравнят.

4. За определена стойност на  $R_T$  да се снее и построи характеристиката  $U_{\text{изх.}} = f(U_{\text{вх.}})$  на двуполупериодна изправителна схема с филтър без стабилизатор и със стабилизатор на напрежение, като се изменя захранващото напрежение посредством автотрансформатора АТ. Резултатите от измерванията да се запишат в таблици 11.3 и 11.4.

Таблица 11.3

двуполупериодна изправителна схема с филтър без стабилизатор на напрежение										
$U_{\text{вх.}}$	V									
$U_{\text{изх.}}$	V									
$I_{\text{изх.}}$	mA									

Таблица 11.4

двуполупериодна изправителна схема с филтър и стабилизатор на напрежение										
$U_{\text{вх.}}$	V									
$U_{\text{изх.}}$	V									
$I_{\text{изх.}}$	mA									

5. По данните от табл.11.3 и табл.11.4 на обща координатна система да се построят зависимостите  $U_{\text{изх.}} = f(U_{\text{вх.}})$  и да се сравнят.

### Контролни въпроси

1. Какъв е видът на волт-амперната характеристика на полупроводниковия диод?
2. Кои са основните параметри на изправителните диоди?
3. Какви еднофазни изправителни схеми съществуват? Кои са техните особености?
4. Каква е формата на изправеното напрежение и какви филтри се използват за изглаждане?
5. Как действа стабилизаторът на напрежение, реализиран с резистор и ценеров диод?
6. Какво представлява външната характеристика на токоизправителя?



## ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИМИСТОРЕН РЕГУЛАТОР НА ПРОМЕНЛИВО НАПРЕЖЕНИЕ

### Цел на упражнението

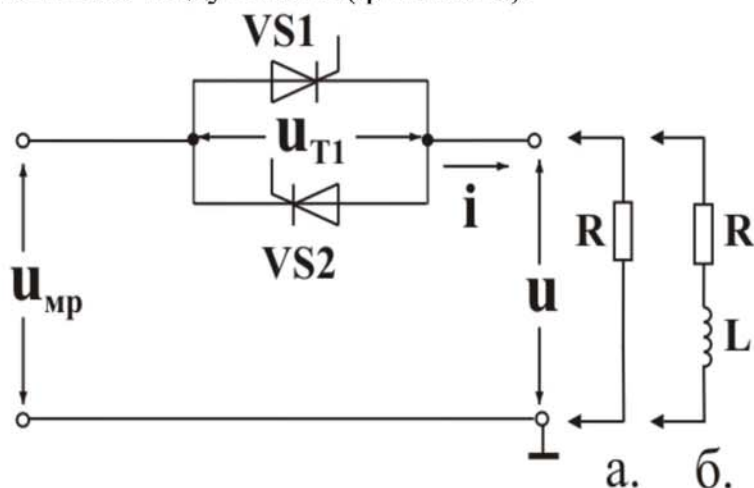
1. Да се запознаят студентите с характеристиките и приложението на полупроводниковите тиристор, динистор, симистор и диак.
2. Да се изучат особеностите на еднофазен променливотоков тиристорен регулатор.
3. Да се запознаят студентите с действието, основните схеми и приложението на симисторни регулатори.
4. Да се наблюдават формите на напреженията върху симистор и товар при различни ъгли на регулиране.

### Теоретична постановка

**Тиристор** е полупроводников елемент. Тиристорът представлява управляем многослоен диод. Има нелинейна волт-амперна характеристика с две стабилни състояния (с ниска и висока проводимост) в права посока и притежава свойства на електрически вентил. Тиристорът може да бъде отпушен и да започне работа като обикновен силициев токоизправителен диод чрез пропускане на ток през управляващия електрод. При достатъчно голям управляващ ток тиристорът се отпушва. Времето на включване на съвременните тиристори е няколко микросекунди. След като тиристорът включи и през него започне да тече ток в права посока, управляващият електрод губи своето управляващо действие и тиристорът остава включен дори ако управляващият ток стане равен на нула. Следователно за включването на тиристора е необходим само къс положителен импулс.

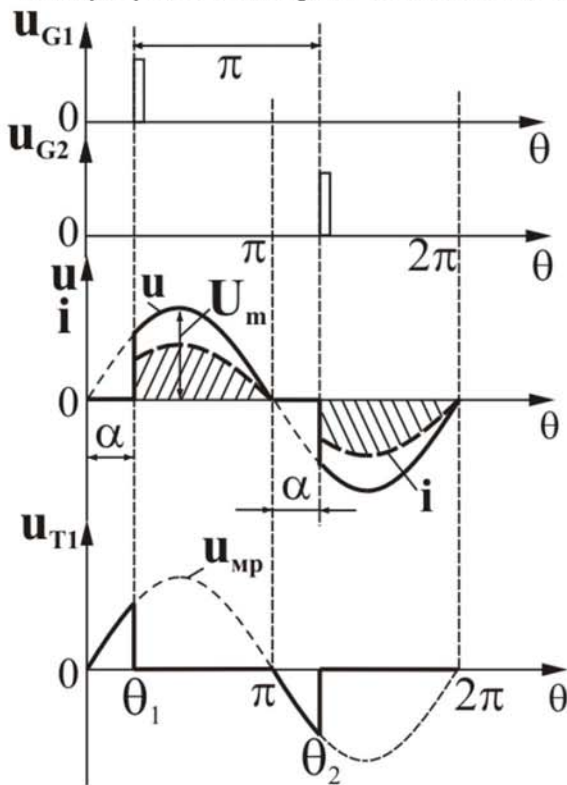
Ако тиристорът няма управляващ електрод се нарича *динистор* (*диоден тиристор*).

На фиг.12.1 е показана електрическата схема на еднофазен променливотоков тиристорен регулатор. Последователно с тиристорите се свързва товарът, който по характер може да бъде активен (фиг.12.1а) или активно-индуктивен (фиг.12.1б).

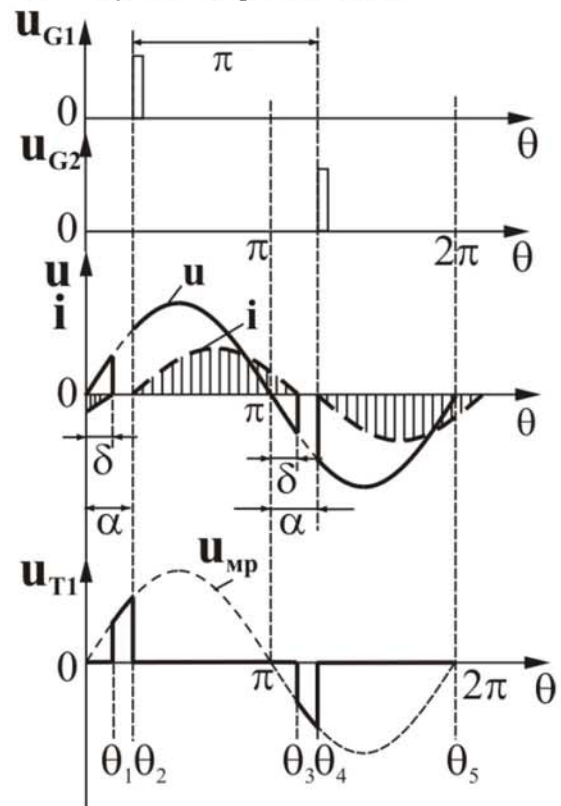


фиг. 12.1

Принципът на действие на променливотоковия тиристорен регулатор, при активен характер на товара, се илюстрира от време-диаграмите на фиг.12.2. Схемата за управление на регулатора изработва управляващи импулси  $u_{G1}$  и  $u_{G2}$  съответно за тиристорите  $VS1$  и  $VS2$ . Работата ѝ се синхронизира със захранващото променливо напрежение на мрежата  $u_{mp}$  по такъв начин, че управляващият импулс  $u_{G1}$  на тиристора  $VS1$  се подава, когато напрежението между анода и катода му е положително, т.е. по време на положителния полупериод на напрежението  $u_{mp}$ . Управляващият импулс  $u_{G2}$  се подава по време на отрицателния полупериод, когато е налице условие за отпушване на тиристора  $VS2$ . Управляващите импулси са дефазирани един спрямо друг на ъгъл  $\theta = \pi$ . Схемата за управление трябва да осигурява диапазон на регулиране на ъгъла на отпушване на тиристорите  $\alpha$  от  $\theta$  до  $\pi$ . За интервала  $\theta < \theta < \theta_1$  тиристорите са запушени и напрежението върху товара и тока през него са равни на нула. Напрежението анод-катод на тиристора  $VS1$  се определя от променливото напрежение. В момента  $\theta_1$  (ъгъл на регулиране  $\alpha = \theta_1$ ) се подава управляващ импулс на тиристора  $VS1$ , той се отпушва и напрежението върху него става равно на нула. В интервала от  $\theta_1$  до  $\pi$  напрежението върху товара и тока през него следват променливото напрежение. В момента  $\theta = \pi$  тиристорът  $VS1$  се запушва вследствие на естествената промяна на знака на променливото напрежение. От  $\pi$  до  $\theta_2$  тиристорите са запушени. Напрежението върху  $VS1$  е отрицателно, а върху товара равно на нула. В момента  $\theta = \theta_2$  ( $\theta_2 = \pi + \alpha$ ) се отпушва  $VS2$ .



фиг. 12.2



фиг. 12.3

Напрежението върху  $VS1$  се определя от пада върху отпушения тиристор  $VS2$ , а напрежението и тока през товара имат отрицателен знак. фиг. 12.2



Регулировъчната характеристика на ПТТР представлява зависимостта на ефективната стойност на товарното напрежение от ъгъла на регулиране и се описва от уравнението:

$$U = U_{mp} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)} \quad (12.1)$$

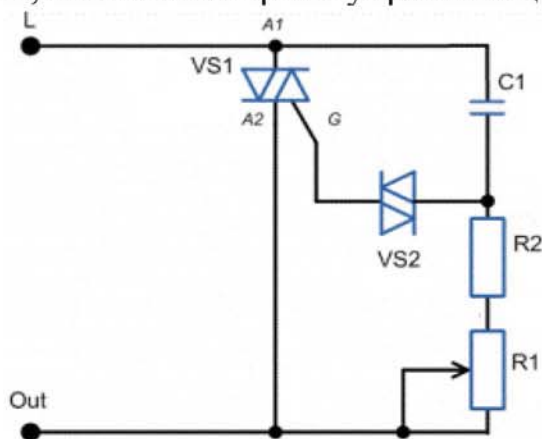
, където  $U_{mp}$  е ефективната стойност на захранващото променливо напрежение. При  $\alpha = 0$  ефективната стойност на изходното напрежение е  $U = U_{mp}$ .

Работата на променливотоковия тиристорен регулатор при активно-индуктивен характер на товара се онагледява от време-диаграмите показани на фиг.12.3. В моментите  $\theta_2$  и  $\theta_4$  (за показания ъгъл на регулиране  $\alpha$ ) се подават управляващи импулси съответно на тиристорите  $VS1$  и  $VS2$ . По време на провеждане на всеки тиристор в товарната индуктивност  $L$  се натрупва енергия. Тази енергия създава противо е.д.н., което поддържа ток през тиристорите след моментите, в които напрежението на мрежата променя знака си, и те остават отпуснени до разсейването ѝ до нула ( $\theta_1, \theta_3$ ). Интервалът на разсейване на енергията на товарната индуктивност на фиг.12.3 е означен с  $\delta$ .

Двата паралелно насрещно-свързани тиристора могат да бъдат заменени от един симетричен тиристор – симистор с едно управление.

**Симистор** (симетричен тиристор) или триак (на английски) е полупроводников елемент, който се използва за комутиране и регулиране на променливотокови товари, при високи стойности на напрежение и ток в битовата и промишлена електроника и автоматика.

На фиг.12.4 е показана опростена схема на еднофазен симисторен регулатор. Основната работа е поверена на диака  $VS2$  и триака  $VS1$ . Можем да разглеждаме диака, като симистор без управляващ електрод.



фиг. 12.4

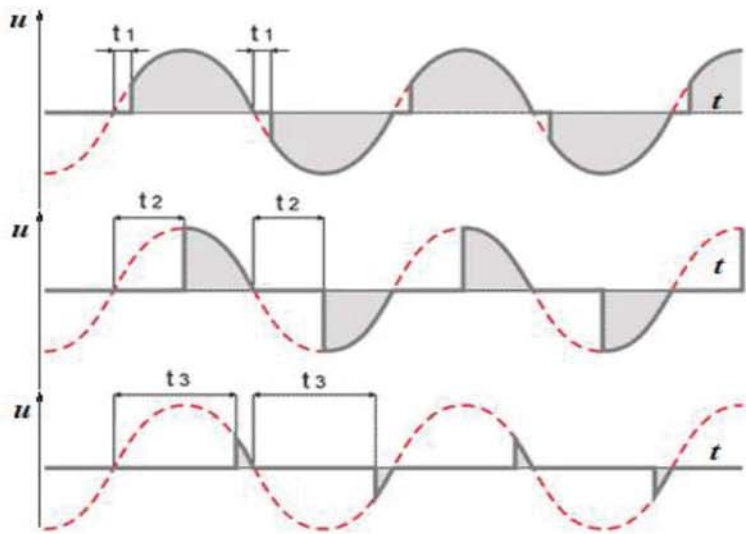
На фиг.12.4 означенията са за:

- R2 - резистор за ограничаване на тока на управление при нулево съпротивление на потенциометъра R1.
- R1 - потенциометър, тример за регулиране.
- C1 - основният кондензатор, чийто заряд управлява динистора, заедно с R1 и R2 образуват RC верига.
- VS2 - диак, чийто ток управлява триака.

- VS1 - триак - основният елемент, който регулира тока през товара.

Основната работа в схемата на фиг.12.4 е поверена на диака и триака. Мрежовото напрежение се подава към RC-веригата, в която участва и потенциометър R1. Чрез регулиране на съпротивлението на потенциометър R1 променяме времето за зареждане на кондензатора C1 и по този начин прага за включване на диака, който от своя страна включва триака.

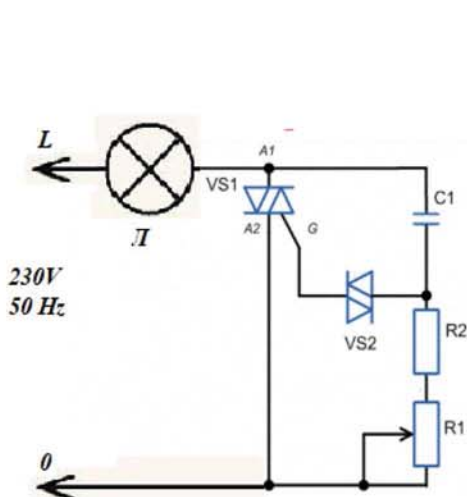
Времедиаграми свързани с управление на мощността са показани на фиг.12.5. Това са диаграми на напрежението подавано към товара в зависимост от момента на отпушване на симистора (ъгъла на отпушване на симистора). Вижда се, че след включване на триака, останалата част от полупериода на захранващото напрежение отива към товара и когато достигне 0, задържащият ток намалява до такава степен, че триакът се запушва. При втория "отрицателен" полупериод се осъществява същия процес, тъй като триакът има проводимост в двете посоки.



фиг. 12.5

### Схема на опитната постанова

Схемата е показана на фиг. 12.6 и фиг. 12.7.



фиг. 12.6



фиг.12.7



### **Програма на работа**

1. Да се анализира елементната база на лабораторната постановка свързана с схемата от фиг.12.6.

2. Да се свърже постановката от фиг.12.7. Да се запознаят студентите с работата на мрежов анализатор.

3. Да се наблюдава формата на тока през товара и напрежението върху товара при регулиране на силата на светене на лампа (димиране).

4. За две стойности на момента на отпушване на симистора(ъгъла на отпушване на симистора) да се заснемат времедиаграми на тока през товара и напрежението върху товара. Да се заснеме на наличието на хармонични съставки във формата на тока към товара и попълни в таблица1.

Таблица 1

Данни за лампа		ъгъл на отпушване 1 °	ъгъл на отпушване 2 °
Напрежение, V			
Мощност, W			
TDH U, %			
cos φ			
TDH I, %			
Ток, mA ефективна стойност Ток на № хармоник	ефективна стойност		
	1		
	3		
	5		
	7		
	9		
	11		
	13		
	15		

### **Контролни въпроси**

1. Какъв е видът на волт-амперната характеристика на полупроводниковия тиристор?

2. Кои са основните параметри на тиристор и симистор?

3. Кои са основните параметри на динистор и диак?

4. Каква е формата на напрежението върху товара след регулатор на напрежение със симистор?

5. Как се отразява несинусоидалната форма на тока през товара върху наличието на хармонични съставки по-високи от 50Hz?

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТРИФАЗЕН АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ С НАКЪСО СЪЕДИНЕН РОТОР

### *Цел на упражнението*

1. Да се изучи устройството на трифазния асинхронен двигател с накъсо съединен ротор.
2. Да се снимат характеристиките на двигателя.
3. Да се построят по опитни данни механическата и работните характеристики на асинхронния двигател.

### *Основни теоретични положения*

Трифазният асинхронен двигател е електрическа машина, преобразуваща електрическата енергия на трифазния променлив ток в механическа и се използва за задвижване на различни машини. Състои се от две основни части: неподвижна, наречена статор и въртяща се - ротор. Статорът се състои от чугунен, стоманен или алуминиев корпус, в който се намира кух цилиндър събран от тънки изолирани един от друг листове електротехническа стомана. По вътрешната страна на цилиндъра, успоредно на вала на двигателя, са разположени канали, в които е поставена трифазна намотка, състояща се от три еднакви части наречени фази. Началото и краят на една фаза са изместени в пространството спрямо аналогичните изводи на другата фаза на 120 електрически градуса и са изведени на клемното табло на двигателя, което позволява фазите да се съединяват в звезда или в триъгълник. Това дава възможност двигателят да се включва към напрежения, отличаващи се с  $\sqrt{3}$ , например 220 /380 V. При това по-малкото от тези напрежения, дадени на табелката на двигателя, съответства на свързване на фазите в триъгълник, а по-голямото - в звезда.

Роторът на асинхронния двигател представлява цилиндър, събран от тънки изолирани един от друг листове електротехническа стомана, закрепен върху вала на двигателя. На повърхността на ротора има изрязани канали, в които е разположена накъсо съединена намотка. Тя се изпълнява от неизолирани медни или алуминиеви проводници съединени помежду си в двата края накъсо чрез два пръстена.

При включване на статорната намотка към трифазна мрежа (фиг.13.1) през нея протича ток, който възбужда въртящо се магнитно поле. Честотата на въртене на полето  $n_1$  зависи от честотата на захранващото напрежение  $f$  и от броя на двойките полюси  $p$  на двигателя.

$$n_1 = \frac{60 f}{p} . \quad (13.1)$$

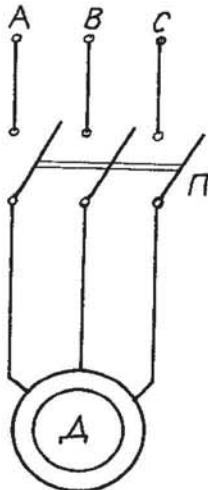
Въртящото се магнитно поле пресича намотката на ротора и индуцира е.д.н., което предизвиква протичането на ток през нея. От взаимодействието на този ток с въртящото се магнитно поле на статора се получава въртящ момент, който завърта ротора в посока на въртящото се магнитно поле. Честотата на въртене на ротора  $n$  е винаги по-малка от честотата



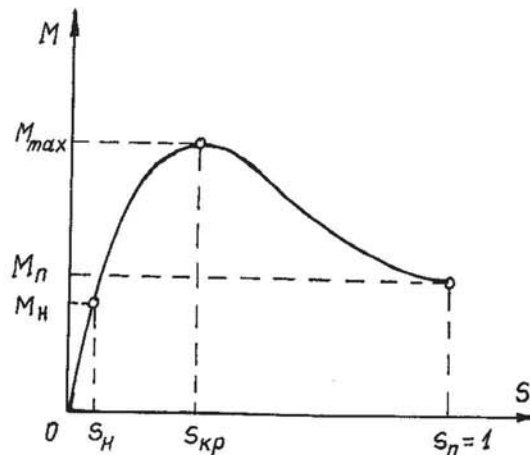
на въртене на магнитното поле  $n_1$ , която се нарича синхронна честота на въртене. Разликата в честотите на въртене е необходимо условие за работата на асинхронния двигател, тъй като, с това се постига пресичане на роторната намотка от въртящото се магнитно поле. При това

$$n = n_1 (1 - s), \quad s \% = \frac{n_1 - n}{n_1} 100 . \quad (13.2)$$

Величината  $s$  се нарича хлъзгане и характеризира степента на изоставане на ротора по отношение на въртящото се магнитно поле.



фиг.13.1



фиг.13.2

Посоката на въртене на ротора се изменя като се промени реда на следване на фазите. За целта е необходимо да се разменят местата на кои да са два проводника, свързващи статорната намотка със захранващата мрежа.

Честотата на въртене на ротора при празен ход на двигателя е много близка до синхронната честота на въртене и хлъзгането е малко. При натоварване честотата на въртене на ротора се намалява, а хлъзгането се увеличава и достига при номинална мощност на вала на двигателя стойности  $s_H = (3 \div 8) \%$ .

Зависимостта на въртящия момент  $M$  на асинхронния двигател от хлъзгането  $s$  определя кривата  $M = f(s)$  (фиг. 13.2), чийто вид зависи от конструктивното изпълнение на намотката на ротора. Обикновено двигателят работи на линейния участък от тази характеристика при стойности на хлъзгането  $s \leq s_{кр}$  и момент  $M \leq M_{max}$ .

$$M_H = \frac{60 P_H}{2\pi n_H} = \frac{30 P_H}{\pi n_H} = 9,55 \frac{P_H}{n_H} \quad (13.3)$$

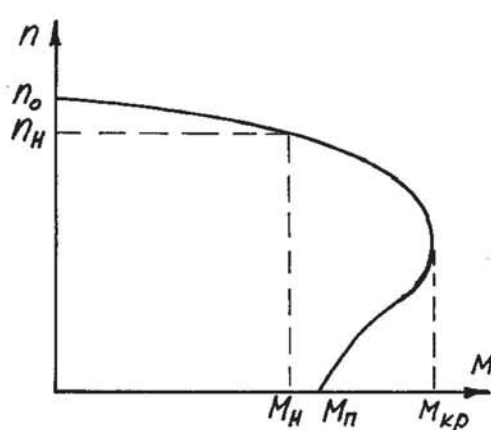
Кратковременното претоварване на асинхронния двигател е ограничено от максималния момент  $M_{max}$ , на който съответства критичното хлъзгане  $s_{кр}$ . Коефициентът на претоварване  $\lambda_M$  за двигатели с мощност от 0,6 до 100 kW е в граници от 1,7 до 2,7.

$$\lambda_M = \frac{M_{max}}{M_H} . \quad (13.4)$$

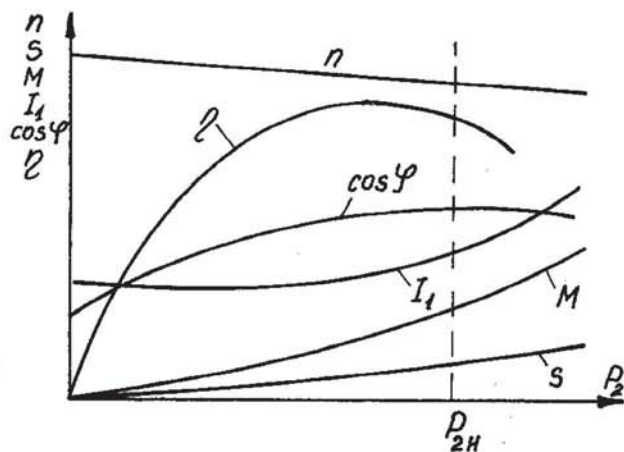
Отношението на пусковия момент  $M_{п}$  към номиналния  $M_{н}$  представлява също важна характеристика за асинхронните двигатели. То е в границите от 1,1 до 2.

При включване на асинхронен двигател с накъсо съединен ротор към напрежение в първия момент той работи в режим на късо съединение и пусковият му ток  $I_{п}$  е значителен:  $I_{п} = (4 \div 7) I_{н}$ . Намаляването на пусковия ток, при двигатели за средна и голяма мощност, се извършва чрез пускането им с понижено напрежение на статорната намотка. Това довежда до намаляване както на пусковия ток, така и на пусковия момент и е допустимо в случаите, когато не се изисква значителен пусков момент.

Качествата на асинхронните двигатели се определят от техните характеристики - механическа и работни. Механическата характеристика (фиг. 13.3) е зависимостта на честотата на въртене  $n$  от въртящия момент  $M$ . Работните характеристики (фиг. 13.4) представляват зависимостите на честотата на въртене  $n$ , тока в статорната намотка  $I_1$ , въртящия момент  $M$ , коефициента на полезно действие  $\eta$ , фактора на мощността  $\cos \varphi$  и хлъзгането  $s$  от натоварването на вала на двигателя  $P_2$  при неизменно захранващо напрежение  $U_1 = \text{const}$  и постоянна стойност на честотата  $f = \text{const}$ .



Фиг.13.3



Фиг.13.4

Натоварването на двигателя може да се извърши с помощта на механическа или електрическа спирачка, а така също посредством генератор за постоянен ток с независимо или паралелно възбуждане.

Генераторът трябва да бъде тариран, т.е. да е известна зависимостта на неговия коефициент на полезно действие (к.п.д.)  $\eta_{Г}$ , а чрез него се изчислява мощността  $P_2$  на вала на двигателя.

$$P_2 = \frac{P_{Г}}{\eta_{Г}} \quad (13.5)$$

Коефициентът на полезно действие на двигателя се изчислява от израза

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (13.6)$$

където  $P_1$  е подведената трифазна мощност към двигателя.

Факторът на мощността  $\cos \varphi$  се определя по формулата



$$\cos\varphi = \frac{P_1}{3U_{\Phi} I_{\Phi}} = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_L I_L}, \quad (13.7)$$

в която  $U_{\Phi}$  и  $I_{\Phi}$  са фазовите, а  $U_L$  и  $I_L$  линейните напрежения и токове.

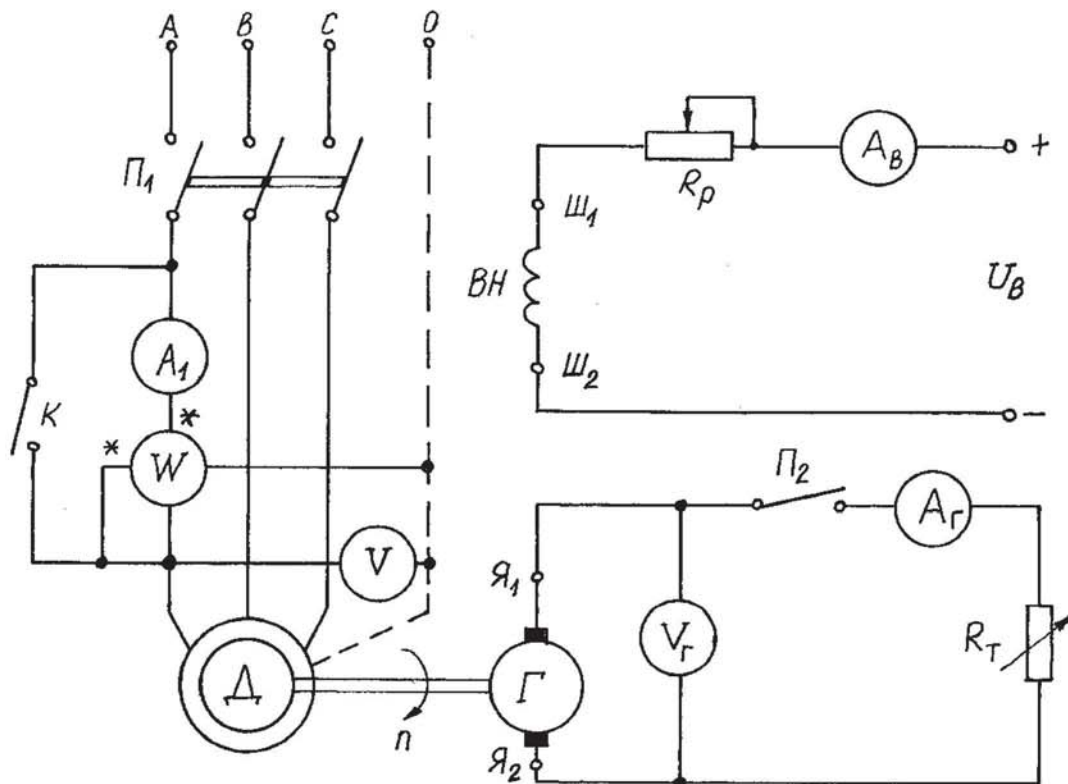
Въртящият момент на двигателя е

$$M = \frac{60 P_2}{2\pi n} = 9,55 \frac{P_2}{n}. \quad (13.8)$$

където  $n$  е в обороти за минута.

### Схема на опитната постановка

Схемата е показана на фиг. 13.5.



фиг. 13.5.

Във веригата на статорната намотка са включени амперметър, волтметър и ватметър, измерващи съответно тока, напрежението и мощността в една фаза на двигателя. Натоварването на двигателя се осъществява с постояннотоков генератор с независимо възбуждане. В котвената му верига са включени уреди за постоянен ток, които дават данни за натоварването на генератора. Възбудителната намотка се захранва от източник на постоянно напрежение, като се контролира големината на тока с помощта на амперметъра  $A_B$ . Пусковият ток на двигателя е голям и при пускане амперметъра и токовата намотка на ватметъра се свързват накъсо чрез ключа  $K$ .

### Програма на работа

1. В таблица 13.1 са дадени номиналните данни на двигателя. Чрез броя на двойките полюси  $p$  да се изчисли по формула 13.1 синхронната честота на въртене  $n_1$ .

Таблица 13.1

Данни за двигателя									
Тип	Свързване на намотките	$U_H$	$I_H$	$P_H$	$n_H$	$\cos \varphi_H$	$f_H$	$p$	$n_1$
		V	A	W	tr / min	-	Hz	-	tr / min
Асин-хронен	звезда	220	0,87	250	1370	0,68	50	2	

2. Да се свърже трифазен асинхронен двигател по схемата от фиг. 13.5, който работи на празен ход. Включва се  $\Pi_1$  и се пуска асинхронния двигател. Проверява се посоката на въртене съвпада ли с необходимата. Ако не съвпада, се изключва  $\Pi_1$  и се разменят местата на два от проводниците, захранващи статорната намотка. Извършват се измервания и се попълва таблица 13.2.

Таблица 13.2.

$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{AC}$	$I_A$	$P_A$	$\cos \varphi_A$	$z_A$	$R_A$	$X_A$	$L_A$	$S_A$
V	V	V	V	V	V	A	W	-	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	H	VA

От измерванията се изчисляват параметрите на фаза А по формулите:

$$z_A = \frac{U_A}{I_A}, \quad R_A = \frac{P_A}{I_A^2}, \quad X_A = \sqrt{z_A^2 - R_A^2}, \quad L_A = \frac{X_A}{\omega}, \quad \cos \varphi_A = \frac{P_A}{U_A I_A}, \quad S_A = U_A I_A. \quad (13.9)$$

3. Да се осъществи схемата от фиг. 13.5. с куплиран към двигателя постояннотоков генератор. Включва се  $\Pi_1$  и се пуска асинхронния двигател. Проверява се посоката на въртене съвпада ли с означената на корпуса на генератора. Ако не съвпада, се изключва  $\Pi_1$  и се разменят местата на два от проводниците, захранващи статорната намотка. Възбудителната намотка на генератора се свързва към източника на постоянно напрежение и с помощта на реостата  $R_p$  се установява зададената от ръководителя на упражнението стойност на възбудителния ток. При отворен прекъсвач  $\Pi_2$  се отчитат показанията на уредите. Честотата на въртене се измерва с цифров уред. След това се включва  $\Pi_2$  и чрез товарното съпротивление  $R_T$  се натоварва генератора, а също така и двигателя. Отчитат се показанията на уредите и резултатите се записват в таблица 13.3.



Таблица 13.3

№	измерени				изчислени									
	двигател			генератор										
	$U$	$I_1$	$P$	$n$	$U_{\Gamma}$	$I_{\Gamma}$	$P_{\Gamma}$	$\eta_{\Gamma}$	$P_2$	$P_1$	$M$	$s$	$\eta$	$\cos \varphi$
V	A	W	$\frac{\text{tr}}{\text{min}}$	V	A	W	%	W	W	Nm	%	%	-	
1														
-														

4. Да се обработят получените резултати.

а) Мощността  $P_{\Gamma}$  отдавана от генератора се изчислява по формулата

$$P_{\Gamma} = U_{\Gamma} I_{\Gamma}. \quad (13.10)$$

б) Консумираната трифазна мощност от двигателя е

$$P_1 = 3 P, \quad (13.11)$$

където  $P$  е измерената с ватметъра мощност.

в) К.п.д. на генератора  $\eta_{\Gamma}$  се взема от тарировъчна крива.

г) Моментът  $M$  се изчислява по формула 13.8, к.п.д. – по 13.6, хлъзгането  $s$  – по 13.2, а  $\cos \varphi$  – по 13.12.

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI_1}, \quad (13.12)$$

5. По данните от таблица 13.3 да се построи в отделна координатна система механическата характеристика на двигателя  $n = f(M)$ . В обща координатна система да се построят работните характеристики  $n(P_2)$ ,  $I_1(P_2)$ ,  $M(P_2)$ ,  $\cos \varphi(P_2)$ ,  $\eta(P_2)$  и  $s(P_2)$ . За всяка от работните характеристики да се изобрази отделна ординатна ос.

6. Да се определи процентното изменение на честотата на въртене на двигателя при преминаване от режим на празен ход към номинален режим по формулата

$$\Delta n_{\text{H}} \% = \frac{n_0 - n_{\text{H}}}{n_{\text{H}}} 100. \quad (13.13)$$

7. От работните характеристики на двигателя да се определят стойностите на  $n_{\text{H}}$ ,  $I_{\text{H}}$ ,  $M_{\text{H}}$ ,  $s_{\text{H}}$ ,  $\eta_{\text{H}}$  и  $\cos \varphi_{\text{H}}$ , съответстващи на номиналната мощност  $P_{\text{H}}$  на двигателя, която се взема от таблица 13.1. Резултатите да се нанесат в таблица 13.4.

Таблица 13.4

$n_{\text{H}}$	$\Delta n_{\text{H}}$	$s_{\text{H}}$	$M_{\text{H}}$	$I_{\text{H}}$	$\cos \varphi_{\text{H}}$	$\eta_{\text{H}}$
tr / min	%	%	Nm	A	-	%

8. Да се анализират получените резултати и се направят изводи за характеристиките на изследвания двигател.

9. Да се свърже еднофазен асинхронен двигател по схемата от фиг. 3.2а. Да се направят измервания при номинално напрежение на двигателя и да се попълни първия ред на таблица 13.5. Да се подобри фактора на мощността ( $\cos \varphi$ ) чрез

паралелно свързан кондензатор и да се попълни втория ред на на таблица 13.5. Да се анализират получените резултати.

Таблица 13.5

№	$U$	$I$	$P$	$R$	$z$	$\cos \varphi$
	V	A	W	$\Omega$	$\Omega$	-
1- без подобряване на фактора на мощността ( $\cos \varphi$ )						
2- с подобряване на фактора на мощността ( $\cos \varphi$ )						

### Контролни въпроси

1. Какво е устройството на трифазния асинхронен двигател с накъсо съединен ротор?
2. Какъв е принципа на действие на асинхронния двигател?
3. Как се изменя посоката на въртене на ротора при асинхронния двигател?
4. Как се изчислява номиналният момент на асинхронния двигател по данните от табелката му?
5. Каква кратност на претоварване допускат асинхронните двигатели?
6. Какви методи се използват за ограничаване на пусковия ток при асинхронните двигатели с ротор, съединен накъсо?
7. Как се изменя факторът на мощността на асинхронния двигател при преминаване от режим на празен ход към номинален товар?
8. Какви методи се използват за измерване на активна мощност в трифазни вериги?



## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ГЕНЕРАТОР ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК С ПАРАЛЕЛНО ВЪЗБУЖДАНЕ

### *Цел на упражнението*

1. Да се изучи устройството на електрическите машини за постоянен ток.
2. Да се снимат и построят характеристиките на генератора с паралелно възбуждане.

### *Основни теоретични положения*

Електрическите машини за постоянен ток се състоят от две основни части: неподвижна - статор и въртяща се - котва. Статорът представлява кух стоманен цилиндър, на чиято вътрешна страна са закрепени главните и допълнителните полюси. Главните полюси са изработени от листова електротехническа стомана, а допълнителните са масивни. Върху полюсите е поставена намотка от изолиран проводник. Главните полюси създават основното магнитно поле, а допълнителните служат за намаляване искренето на четките.

Възбудителната намотка, поставена върху главните полюси, при генераторите с паралелно възбуждане е от тънък проводник с голям брой навивки и е свързана паралелно на котвената намотка. Изводите на тази намотка се означават с  $\text{Ш}_1$  и  $\text{Ш}_2$ .

Котвата представлява цилиндрично тяло от тънки изолирани един от друг листове електротехническа стомана с канали по повърхността. В каналите е поставена котвената намотка, чиито изводи са съединени към разположения на вала колектор. Той представлява цилиндър, състоящ се от медни пластини изолирани помежду си и от вала. Към колектора, с помощта на пружини, се притискат графитни или медно-графитни четки. Поляритетът на четките се редува, като едноименните четки се съединяват и от тях излизат два извода, които се свързват към клемното табло на машината и се означават с  $\text{Я}_1$  и  $\text{Я}_2$ .

За да се възбуди генераторът с паралелно възбуждане, трябва да са изпълнени следните условия:

1. В магнитната верига на генератора да съществува остатъчен магнетизъм.
2. Магнитният поток създаден от възбудителната намотка да съвпада с този от остатъчния магнетизъм.
3. Съпротивлението на възбудителната верига да бъде по-малко от критичното, т.е. от това, над което генераторът не може да достигне номиналното си напрежение.

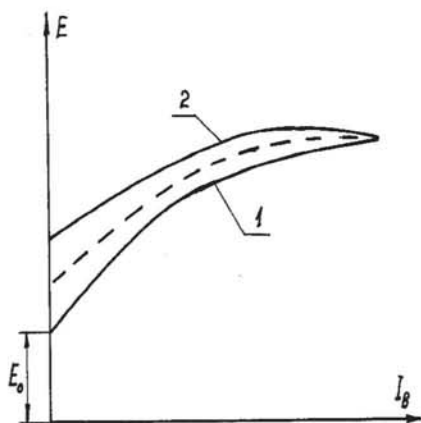
При въртенето си котвата пресича магнитния поток, създаден от възбудителната намотка и в котвената намотка се индуцира електродвижещо напрежение (е.д.н.), което се определя с формулата

$$E = \frac{pN}{60a} n \Phi = C_E n \Phi, \quad (14.1)$$

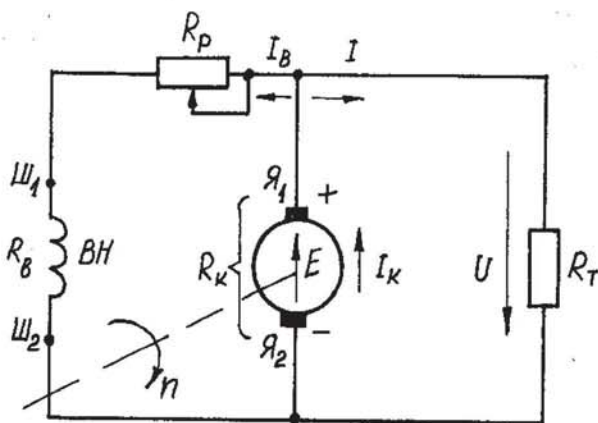
където  $C_E = \frac{pN}{60a}$  е константа на машината,  $\Phi$  е магнитният поток,  $n$  - честотата на въртене на котвата в обороти за минута,  $p$  - брой на двойките полюси,  $N$  - брой на активните проводници на котвената намотка,  $a$  - брой на двойките паралелни клонове на котвената намотка.

От (14.1) следва, че при въртенето на котвата с постоянна честота на въртене е.д.н. зависи само от големината на магнитния поток, респективно от възбудителния ток  $I_B$ .

Зависимостта  $E = f(I_B)$ , определена при постоянна честота на въртене и при отсъствие на ток в котвената намотка, се нарича характеристика на празен ход (фиг. 14.1). Тя се състои от два клона: възходящ - 1, който се получава при нарастване на тока  $I_B$  и низходящ - при намаляване на  $I_B$ . Раздвояването на характеристиката се дължи на явлението хистерезис в магнитната верига на машината.



фиг. 14.1



фиг. 14.2

Тъй като характеристиката на празен ход се снима при отсъствие на ток в котвената намотка ( $I_k = 0$ ), то генераторът не може да се самовъзбужда. Затова характеристиката на празен ход се снима с независимо възбуждане, като възбудителната намотка се захранва от външен източник.

При паралелно възбуждане номиналният възбудителен ток  $I_{BH}$  представлява (1 ÷ 5)% от номиналния ток на генератора. Затова, когато не се изисква голяма точност, характеристиката на празен ход може да се снима при самовъзбуждане на генератора.

Когато към генератора се включи товар (фиг. 14.2), то през котвената намотка протича токът  $I_k$ . Той е сума от възбудителния  $I_B$  и товарния ток  $I$ . Токът през котвата предизвиква изменение на напрежението на генератора, съгласно уравнението

$$U = E - I_k R_k, \quad (14.2)$$

където  $R_k$  е съпротивлението на котвената верига.

Увеличаването на товарния ток  $I$  води до нарастване на падението на напрежение и намаляване на възбудителния ток.

$$\Delta U_k = I_k R_k, \quad I_B = \frac{U}{R_B + R_p}. \quad (14.3)$$



Тук  $R_B$  е съпротивлението на възбудителната намотка, а  $R_P$  е регулировъчно съпротивление във веригата на възбудителната намотка.

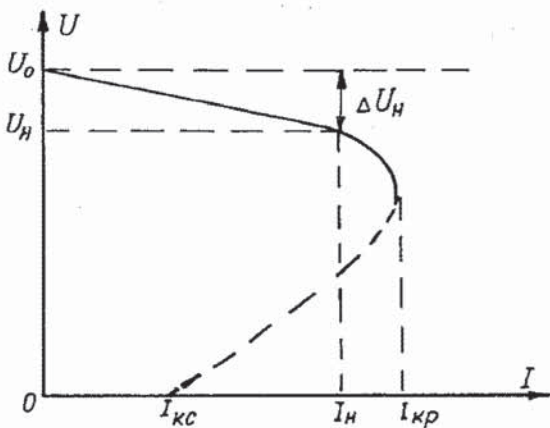
Намаляването на възбудителния ток води до намаляване на магнитния поток  $\Phi$ , е.д.н.  $E$  и напрежението  $U$ . Следователно, при увеличаване на натоварването на генератора напрежението му отначало плавно намалява, а след това рязко пада (фиг. 14.3).

С намаляването на товарното съпротивление  $R_T$ , токът  $I$  расте, но след като достигне определена стойност, наречена критична  $I_{кр}$ , той започва да намалява. Когато  $R_T$  стане равно на нула, т.е. във външната верига възникне късо съединение, то токът във веригата  $I_{кв}$  е по-малък от номиналния  $I_H$ . По тази причина късото съединение за генераторите с паралелно възбуждане не представлява опасност.

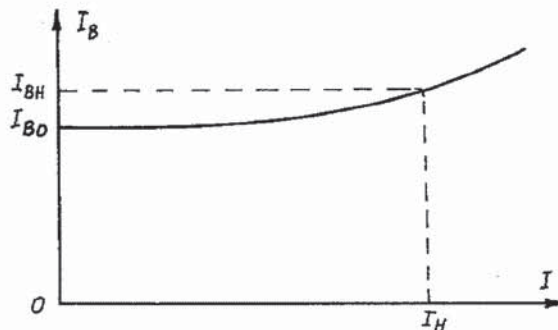
Зависимостта  $U = f(I)$ , при неизменно съпротивление във възбудителната верига  $R_B + R_P = \text{const}$  и при постоянна честота на въртене на котвата  $n = \text{const}$ , представлява външната характеристика на генератора. От нея се определя процентното изменение на напрежението на генератора.

$$\Delta U_H \% = \frac{U_0 - U_H}{U_H} 100. \quad (14.5)$$

Тук  $U_H$  и  $U_0$  са съответно номиналното напрежение и това при празен ход.



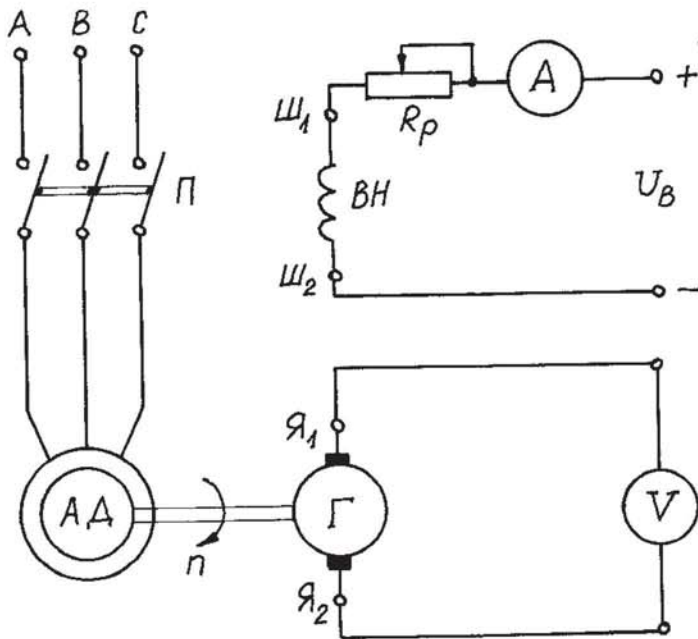
Фиг.14.3



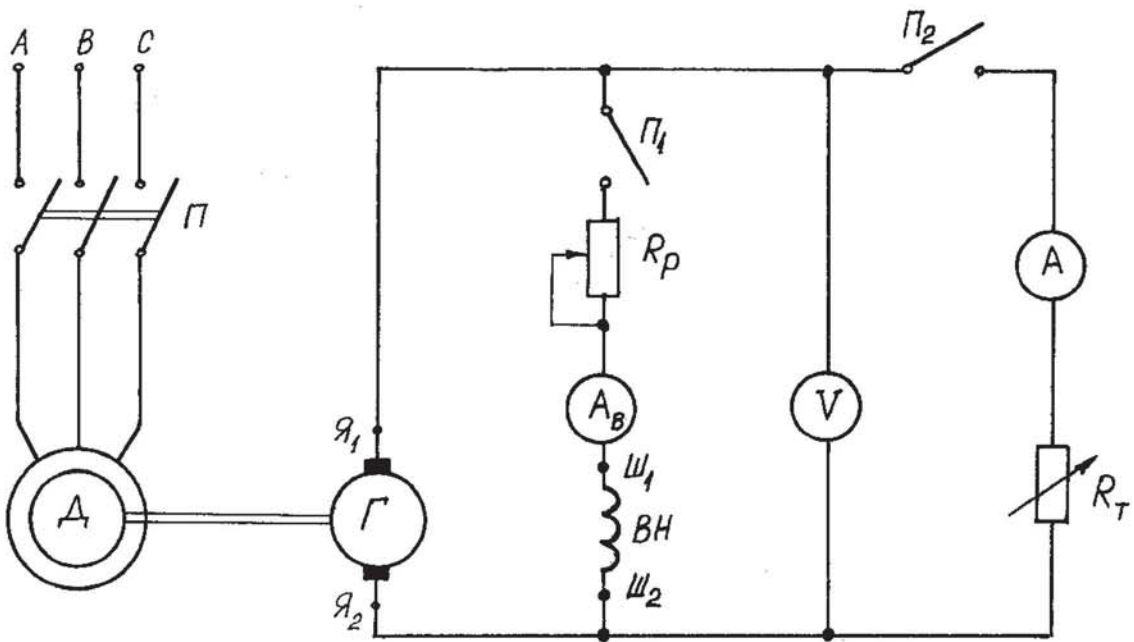
Фиг.14.4

За да се поддържа постоянна стойност на напрежението на генератора при изменение на натоварването, е необходимо да се изменя потокът в магнитната верига, респективно токът във възбудителната намотка. Зависимостта  $I_B = f(I)$  при  $U = \text{const}$  и  $n = \text{const}$  се нарича регулировъчна характеристика и е представена на фиг. 14.4.

Схеми на опитните постановки



Фиг.14.5



Фиг.14.6

На фиг. 14.5 и 14.6 са дадени схемите на опитните постановки. Генераторът се задвижва от трифазен асинхронен двигател. Неговата честота на въртене може да се приеме приблизително за постоянна.

Във веригата на генератора са включени уреди за измерване на напрежението, товарния и възбудителния ток. Съпротивлението  $R_p$  служи за изменение на възбудителния ток, а прекъсвачът  $\Pi_1$  - за прекъсване веригата на



възбудителната намотка. Чрез прекъсвача  $\Pi_2$  се включва товарното съпротивление  $R_T$ .

### Програма на работа

1. Да се осъществи схемата от фиг. 14.5. Да се включи асинхронния двигател и се провери правилността на посоката на въртене. При необходимост тя се променя чрез разменяне местата на два от захранващите проводници на асинхронния двигател.

2. Да се снее характеристиката на празен ход  $U = f(I_B)$  на генератора при независимо възбуждане. Първоначално се отчита показанието на волтметъра за  $I_B = 0$ . След това се включва захранването на възбудителната намотка. Постепенно се намалява съпротивлението  $R_p$ , като плъзгачът му се движи само в една посока. Отчитат се показанията на уредите, като данните се нанасят в лявата половина на таблица 14.1. След достигане на номиналното напрежение да се снее низходящата част от характеристиката. За целта постепенно се увеличава съпротивлението  $R_p$ , като плъзгачът му се движи отново само в една посока. Стойностите за тока  $I_B$  и напрежението  $U$  се нанасят в дясната половина на таблица 14.1.

Таблица 14.1

No	възходяща част		низходяща част	
	$I_B$	$U$	$I_B$	$U$
	А	V	А	V
1				
-				
-				

3. Да се осъществи схемата от фиг. 14.6 и се снее външната характеристика на генератора  $U = f(I)$  при  $n = \text{const}$  и  $R_p = \text{const}$ . За целта, при изключени прекъсвачи  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , се включва асинхронния двигател. След това се затваря прекъсвача  $\Pi_1$  и се регулира съпротивлението  $R_p$  докато се постигне самовъзбуждане на генератора. Прекъсвачът  $\Pi_2$  се затваря и се регулират  $R_p$  и  $R_T$  така, че да се получат номиналните стойности за напрежението и тока на генератора. При следващите измервания съпротивлението  $R_p$  не се изменя.

Изключва се прекъсвачът  $\Pi_2$  и се отчита напрежението на празен ход на генератора. Включва се  $\Pi_2$  и се изменя съпротивлението  $R_T$  и се отчитат показанията на уредите. Измерванията продължават докато се достигне критичната стойност на тока на генератора, след която се реализира режим на късо съединение. Получените резултати се записват в таблица 14.2.

4. По схемата от фиг. 14.6 да се снее регулировъчната характеристика  $I_B = f(I)$  на генератора при  $n = \text{const}$  и  $U_n = \text{const}$ .

При изключен прекъсвач  $\Pi_2$  да се установи номиналното напрежение на генератора чрез съпротивлението  $R_p$ . Да се измери стойността на  $I_B$  при  $I = 0$ . След това да се включи  $\Pi_2$  и се натовари генератора. За различни стойности на товарния ток да се регулира с  $R_p$  възбудителния ток, така че напрежението да се запази неизменно. Стойностите на величините се нанасят в таблица 14.3.

Таблица 14.2

№		1	2	3	-	-	-
$I$	A						
$U$	V						
$I_B$	A						

Таблица 14.3

№		1	2	3	-	-	-	-
$I$	A							
$I_B$	A							
$U$	V							

5. От получените резултати да се построят в отделни координатни системи характеристиките на генератора:  $U=f(I_B)$ ,  $U=f(I)$  и  $I_B=f(I)$ .

6. От външната характеристика на генератора да се определи тока на късо съединение  $I_{кс}$ , критичния ток  $I_{кр}$  и процентното изменение на напрежението  $\Delta U_H$ .

7. Да се направят изводи за изменението на напрежението на генератора при натоварване и за вида на характеристиките му.

### **Контролни въпроси**

1. Какво е устройството и принципа на действие на машините за постоянен ток?

2. От кои величини зависи е.д.н. на генератора за постоянен ток?

3. Как се осъществява процеса на самовъзбуждане на генератора?

4. Какво представлява характеристиката на празен ход и как се сменя?

5. Кои са причините, които предизвикват намаляване на напрежението на генератора при увеличаване на натоварването?

6. По какъв начин може да се поддържа неизменно напрежението на генератора при изменение на товара?

7. Как се сменя регулировъчната характеристика на генератора?



## ПРЕОБРАЗУВАНЕ НА СЛЪНЧЕВОТО ИЗЛЪЧВАНЕ В ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ С ФОТОВОЛТАИЧНИ КЛЕТКИ и ФОТОВОЛТАИЧНИ МОДУЛИ

### Цел на упражнението

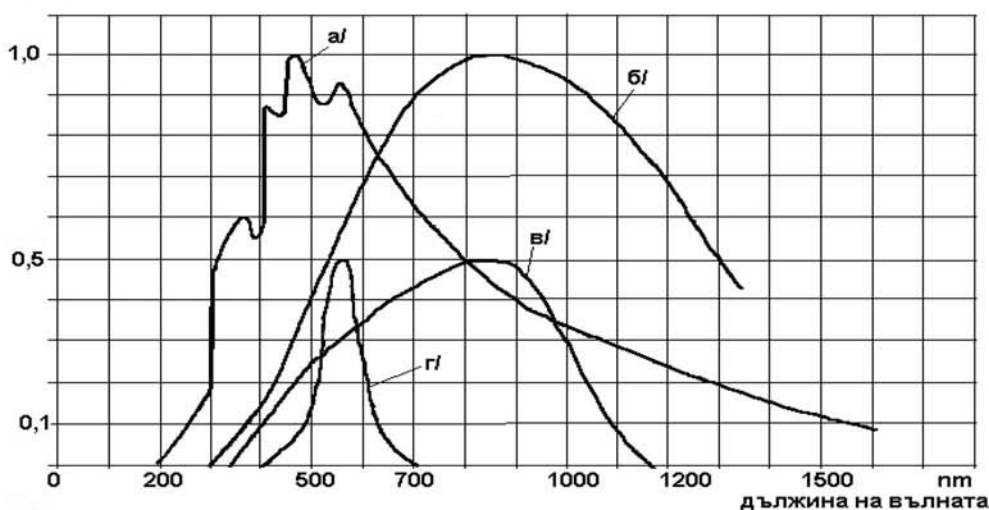
1. Да се запознаят студентите с фотоволтаичната технология, като безопасен и екологично чист източник на електричество.
2. Да се изучи устройството и принципа на действие на фотоволтаична клетка.
3. Да се заснемат характеристики на фотоволтаична клетка и фотоволтаичен модул.

### Основни теоретични положения

#### 1. Вътрешен фотоефект

Класическата теория разглежда слънчевото излъчване, като излъчване на електромагнитни вълни. Електромагнитните вълни в зависимост от дължината са радиовълни, светлинни вълни (инфракчервени, видими и ултравиолетови), рентгенови лъчи и гама-лъчи. На фигура 15.1. са показани дължините на светлинни вълни на Слънце, халогенна лампа, фотоволтаична клетка и чувствителност на окото към светлина.

относителни спектрални характеристики



фиг.15.1

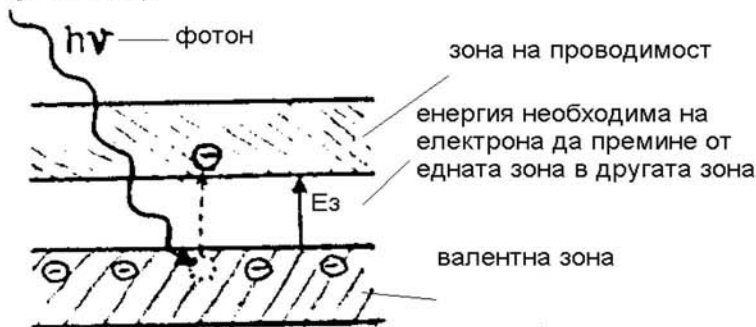
- а) Слънце,
- б) халогенна лампа,
- в) фотоволтаична клетка,
- г) чувствителност на окото.

Квантовата теория разглежда излъчването, като излъчване и поглъщане на фотони. Фотонът е елементарно количество лъчиста енергия, която може да се разглежда като елементарна частица или поредица от електромагнитни вълни.

Например фотон се излъчва, когато един електрон, преминал на орбита с по-високо енергийно ниво, се върне на първоначалната си орбита.

Един от основните видове поглъщания е собственото поглъщане на фотон от силициев атом, свързано с прехода на електрон от валентната зона в зоната на проводимостта. Такъв преход е възможен ако енергията на погълнатия фотон превишава или е равна на ширината на забранената зона:

$h\nu \geq \Delta E_z$ , където  $\nu$  е честотата, а  $h = 6,265 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  е константата на Планк (виж фиг. 15.2).

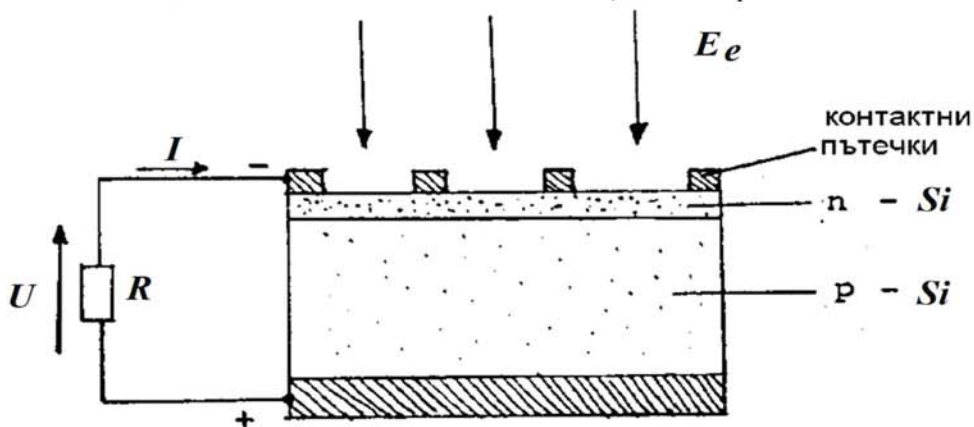


фиг. 15.2

## 2. Фотоволтаични клетки

Фотоволтаичният елемент (фотоволтаична клетка) представлява полупроводникова пластина в която има създаден PN преход. При осветяване на този преход, между изводите на PN прехода се появява фото е.д.н., т. е. проявява се фотоволтаичен ефект. При осветяване на PN прехода, в резултат на собственото поглъщане се образуват двойки свободни токоносители: електрон-дупка. Създава се количествена концентрация на заряди и от двата вида, причиняваща протичане на фототок  $I$  и се получава фотоелектродвижещо напрежение (ф.е.д.н.)  $U$ .

Фотоволтаичната клетка показана на фигура фиг. 15.3 се състои от основа P-тип Si с дебелина 0,3-1mm, на повърхността на която се създава слой N-тип Si с дебелина 0,3-1µm. На границата между двата слоя се образува P-N преход с дебелина приблизително 0,05µm. Повърхността е покрита от слой с много малка отражателна способност от силициев или титаниев окис. На страната обърната към Слънцето има контактни пътечки, а на гърба контактен слой.



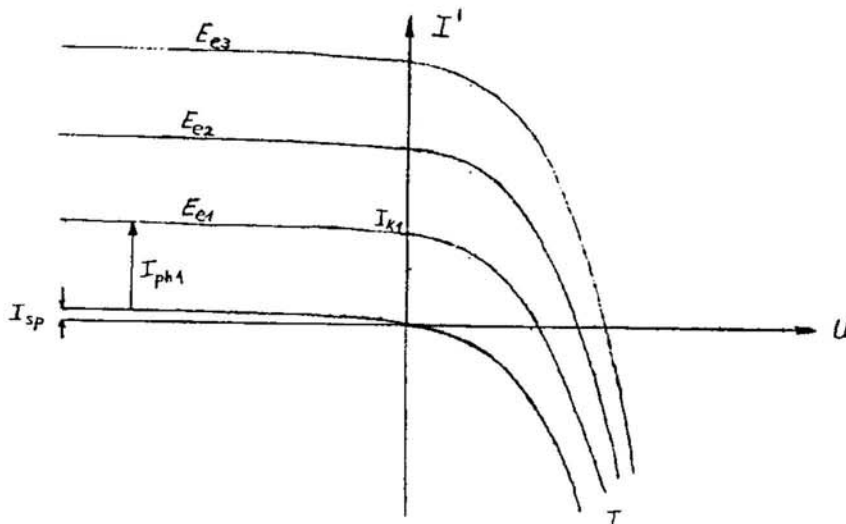
фиг. 15.3



Волт-амперна характеристика на фотоволтаична клетка е показана на фиг. 15.4. Големината на тока  $I'$  зависи и от интензитета на светлинния източник  $E$ . Характеристиките са подобни на тези на диод, но изместени спрямо оста на напрежението.

Фототокуът на късо съединение  $I_{ph}$  е пропорционален на интензитета на светлинния източник.

$$I_{ph} \sim E \quad (15.1)$$



фиг. 15.4.

При реализиране схемата на опитната постановка за изследване на фотоволтаична клетка за светлинен източник се използва халогенна лампа. Големината на осветеността се променя чрез промяна на разстоянието на светлинния източник спрямо оптиката преди фотоволтаичната клетка. При точков източник на светлина, между големината на осветеност и разстоянието е в сила следната зависимост.

$$\frac{E_{e1}}{E_{e2}} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (15.2)$$

Чрез промяна на разстоянието се постигат следните съотношения на големината на осветеността към фотоволтаичната клетка 1 : 2 : 4.

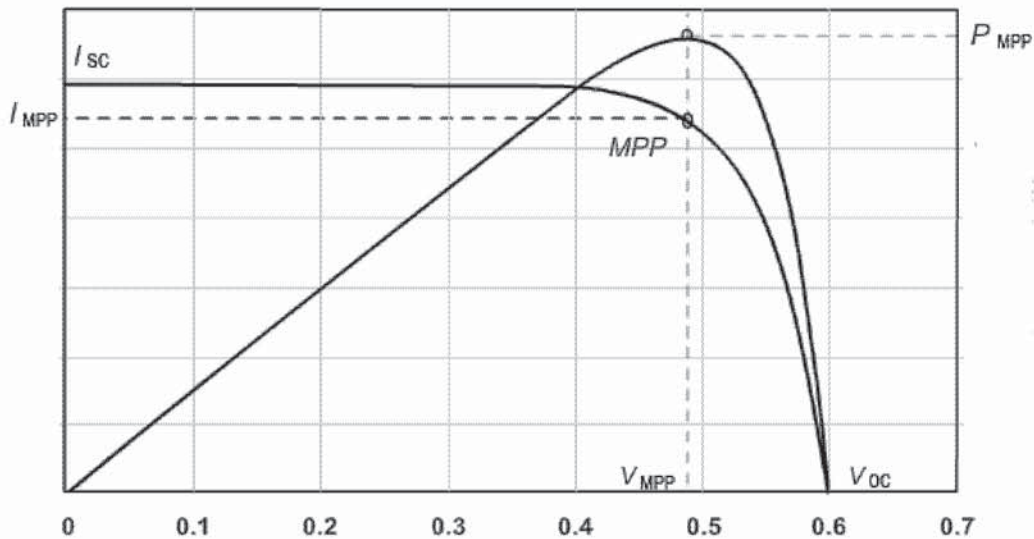
Кривата на натоварване се получава от първи квадрант на характеристиката от фиг. 15.4.

Чрез тока и напрежението се определя мощността консумирана от фотоволтаичната клетка (15.3). След построяване зависимостта на мощността от напрежението  $P=f(U)$  се търси точката при която ще се получи максимална мощност на изводите на слънчевата клетка. Тази точка е известна като точка на максимална мощност - фиг. 15.5 (MPP).

$$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} \quad (15.3)$$

Коефициентът на полезна действие се получава от отношението на получената електрическа мощност на изводите на слънчевата клетка към мощността на светлинния поток падащ върху клетката.

$$\eta_{cell} = P/P_{light} \quad (15.4)$$



фиг. 15.5

С пиранометър (уред за измерване на мощността на слънчевото излъчване) се измерва мощността на светлинния поток върху повърхността на фотоклетката. На същата повърхност се измерва и осветеността с луксметър. От сравняване на резултатите от двете измервания се получава коефициент за връзка между осветеност и мощност на облъчвана повърхност. За конкретния луксметър този коефициент е  $k_{Halogen} = 2,45 * 10^{-3} \frac{mW}{cm^2 \cdot Lux}$ . Мощността на енергията на светлината постъпила към фотоволтаичната клетка е, както следва:

$$P_{light} = k_{halogen} * S * E_{Lux}, \quad (15.5)$$

където S е площта на слънчевата клетка.

### Схема на опитната постановка за изследване на фотоволтаична клетка

При реализиране на опитната постановка за светлинен източник се използва халогенна лампа. Поради използване на оптика между лампата и фотоволтаичната клетка, разглеждаме лампата като хомогенна излъчваща повърхност.

Вътрешните съпротивления на използваните уреди трябва да бъдат:

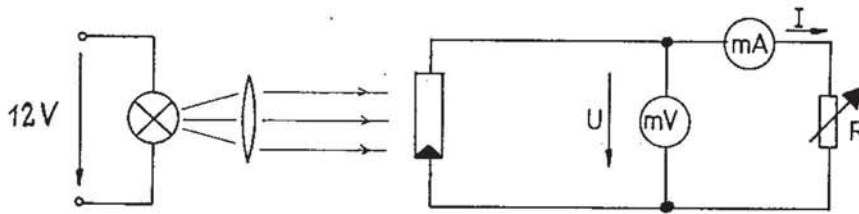
- на волтметъра  $\geq 10 \text{ M}\Omega$
- на амперметъра  $\leq 0,1 \Omega$ .

За регулируем съпротивителен товар се използва съпротивителен магазин 0,1-100000  $\Omega$ .

В опита се използва силициева фотоволтаична клетка на фирмата Solarex. Нейните параметри са:

- Ток на късо съединение:  $I_{kc} = 100 \text{ mA}$ ;
- Напрежение на празен ход  $U_{п.х.} = 0,45 \text{ mV}$ ;
- Коефициент на полезно действие (к.п.д.)  $\eta = 10\%$ .





фиг.15.6

**Схема на опитната постановка за изследване на фотоволтаичен модул**

При реализиране на опитната постановка за изследване на фотоволтаичен модул за светлинен източник се използва или Слънцето или халогенна лампа.

Вътрешните съпротивления на използваните уреди трябва да бъдат:

- на волтметъра  $\geq 10 \text{ M}\Omega$
- на амперметъра  $\leq 0,1 \Omega$ .

За регулируем съпротивителен товар се използва реостат допускащ протичането на ток съизмерим с тока на късо съединение на фотоволтаичния модул.

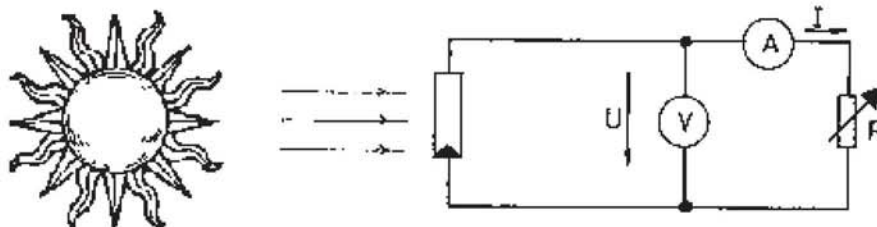
В опита се използва фотоволтаичен модул на фирмата .....

Неговите параметри са:

Ток на късо съединение:  $I_{\text{к.с.}} = \dots\dots \text{A}$ ;

Напрежение на празен ход  $U_{\text{п.х.}} = \dots\dots \text{V}$ ;

Коефициент на полезно действие (к.п.д.)  $\eta = \dots\dots \%$ .



фиг.15.7

**Програма на работа**

1. Да се реализира постановката от фиг.15.6.
2. Да се провери дали работи фотоволтаичната клетка.
3. Да се зададе определена големина на осветеност на повърхността на фотоволтаичната клетка.
4. Да се попълни таблица 15.1 при задаване на различни стойности на съпротивлението на товара. Преминва се от режим на празен ход през номинално натоварване до режим на късо съединение. Да се направят нови измервания при различни стойности на осветеност със съотношения  $E_1 : E_2 : E_3 = 4 : 2 : 1$ .

Таблица 15.1

	$E_1$			$E_2$			$E_3$		
$R$	$U$	$I$	$P$	$U$	$I$	$P$	$U$	$I$	$P$
$\Omega$	$mV$	$mA$	$mW$	$mV$	$mA$	$mW$	$mV$	$mA$	$mW$

4. Да се построят волт-амперни характеристики на фотоволтаичната клетка при различна осветеност на обща графика.

5. На същите графики да се построи кривата на максимална мощност във функция от напрежението при осветеност  $E_1$ .

6. Да се определи коефициента на полезно действие на фотоволтаичната клетка в точката на максимална мощност.

7. Да се реализира постановката от фиг. 15.7.

8. Да се попълни таблица 15.2 при задаване на различни стойности на съпротивлението на товара. Премахва се от режим на празен ход през номинално натоварване до режим на късо съединение.

Таблица 15.2

$R$	$U$	$I$	$P$
$\Omega$	$V$	$A$	$W$

4. Да се построи волт-амперна характеристика на фотоволтаичен модул.

5. На същата графика да се построи кривата на максимална мощност във функция от напрежението.

### **Контролни въпроси**

1. Какво е устройството на фотоволтаична клетка?

2. Какъв е принципа на действие на получаване на електрическа енергия при фотоволтаична клетка?

3. Как се построява волт-амперна характеристика на фотоволтаична клетка?

4. Как се определя точката на максимална мощност на фотоволтаична клетка?

5. Как се определя коефициента на полезно действие на фотоволтаична клетка?

5. Как чрез фотоволтаични клетки се изработва фотоволтаичен модул с желани характеристики?



## ПРОВЕРКА НА ВРЕМЕТО ЗА ИЗКЛЮЧВАНЕ НА МАКСИМАЛНОТОКОВА ЗАЩИТА И ИЗМЕРВАНЕ НА ТОК НА СРАБОТВАНЕ НА ДИФЕРЕНЦИАЛНОТОКОВА ЗАЩИТА

### *Цел на упражнението*

1. Да се запознаят студентите с приложението на автоматични прекъсвачи, стопяеми предпазители и диференциалнотокова защита.
2. Да се запознаят студентите с устройството и действието на автоматични прекъсвачи, стопяеми предпазители и диференциалнотокова защита.
3. Да се запознаят студентите с проверката на времето за изключване на максималнотокова защита.
4. Да се измери на ток на сработване на диференциалнотокова защита.

### *Теоретична постановка*

При работа с електрическа енергия много важна е защитата на хората и защитата на електрическите вериги от претоварвания, къси съединения и недопустим ток на утечка.

За защита на електрически вериги срещу претоварване и късо съединение и защита на хората срещу индиректен допир използваме автоматични прекъсвачи и стопяеми предпазители. За защита на хората срещу индиректен и директен допир и недопустим ток на утечка използваме диференциалнотокова защита.

За защита на електрически вериги срещу претоварване и късо съединение използваме автоматични прекъсвачи и стопяеми предпазители с необходимия номинален ток.

**Времето за изключване** на електрическите предпазители е свързано с защитата на хората срещу директен и индиректен допир. Това време на изключване е нормирано в наредба № 3 от 9 юни 2004 г. за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии. При номинално фазово напрежение 220 (230)V на мрежата, максималното време за изключване е 0,4s.

**Автоматичните прекъсвачи**, са част от електромеханичните компоненти на електрическите вериги. Два са основните функционални елемента на автоматичния прекъсвач - термичен и електромагнитен изключвател. Термичният изключвател предпазва от претоварване по ток (трайно протичане на ток, по-голям от номиналния). Електромагнитният изключвател се използва предимно за предпазване от къси съединения

Основен параметър на автоматичните прекъсвачи е характеристиката на изключване, наричана още крива на изключване. Тя представлява време-токова характеристика, даваща връзката между кратността на тока на късо съединение спрямо номиналния ток на задействане, при която предпазителят изключва (ос X) и времето за сработване на предпазителя (ос Y) – фиг. 16.1.

В изпълнение на чл. 206 от Наредба № 3, техническия комитет по акредитация предлага да се използват следните коефициенти на задействане  $k$  за всички

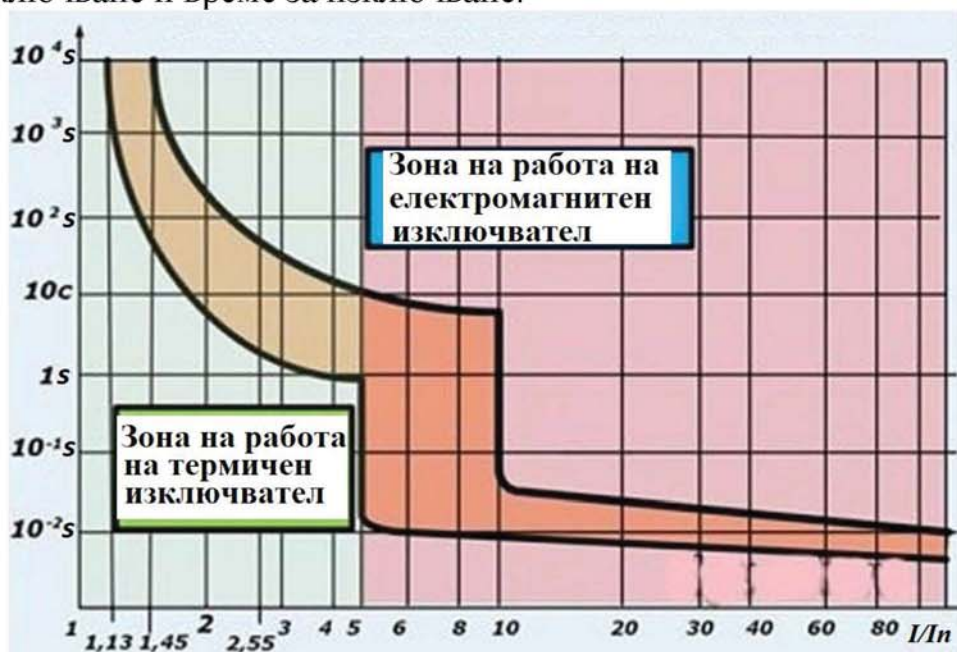
видове вериги, защитавани от автоматични триполюсни и еднополюсни прекъсвачи, в зависимост от тяхната време-токова характеристика както следва:

- за характеристика В:  $k=5$
- за характеристика С:  $k=10$
- за характеристика D:  $k=20$
- за характеристика К:  $k=14$
- за характеристика Z:  $k=3$ .

Токът на късо съединение, при който автоматичният прекъсвач трябва да изключи за време от 0,4s се определя по формулата:

$$I_{к.с.} = I_n \cdot k \quad (16.1)$$

Най-важните характеристики на електрическите предпазители са ток на изключване и време за изключване.



Фиг.16.1

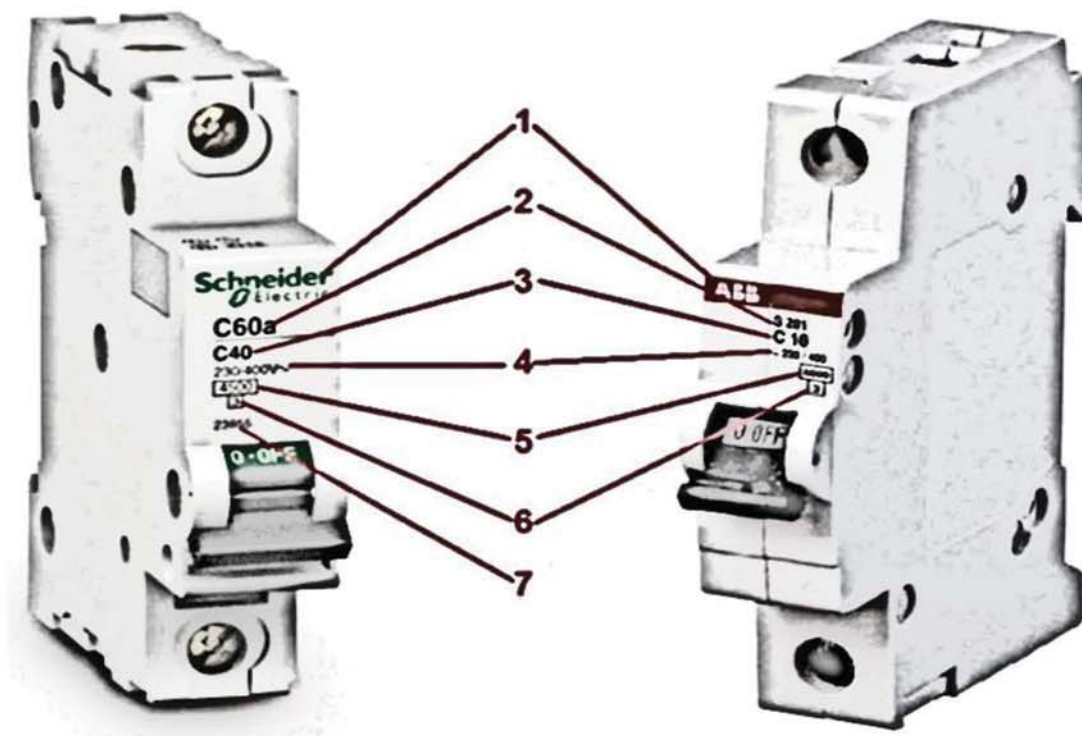
Например на фиг.16.1 в зоната на работа на електромагнитния изключвател времето на сработване е по-малко от 0,4s.

На фиг.16.2 е показано примерно маркиране на автоматичен прекъсвач, където:

- 1- търговската марка, например Schneider, ABB, IEK, EKF.
- 2- каталожен номер (серия AB200 S200U, SH200).
- 3- време-токова характеристика (А, В, С) и номинална стойност на ток в ампер ( $I_n$ ).
- 4- номинално напрежение  $U_n$ .
- 5- максимално допустима изключваща стойност на ток в ампер  $I_m$ .
- 6- клас на токоограничаване.
- 7- номер по каталог.

Възможна маркировка на рамото за включване и изключване е „0 OFF“ – изключено състояние и „I“ – включено състояние.





Фиг. 16.2

**Стопяемият предпазител** представлява тънка метална нишка в керамично или стъклено тяло. Когато през нишката протече по-голям електрически ток от допустимия, нишката изгаря и електрическата верига, която затваря предпазителя се прекъсва. Използват се буквени означения за тип на стопяемият предпазител

Първата буква посочва диапазона на изключваните токове. Най-често се използват стопяеми вложки „g” (изключвателна способност в целия диапазон).

Втората буква посочва категорията на използване. Тази буква определя точно време-токовите характеристики, условните гранични времена и токове:

- буквите „gG” означават стопяеми вложки с общо предназначение с изключвателна способност в целия диапазон;

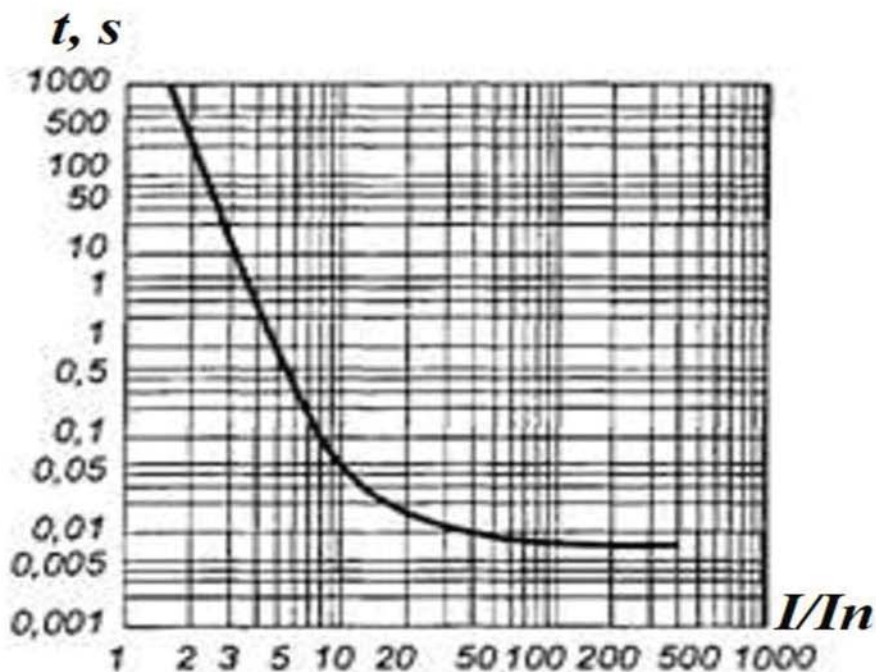
- буквите „gM” означават стопяеми вложки с общо предназначение с изключвателна способност в целия диапазон, предназначени за защита на вериги на електродвигатели;

- буквите „aM” означават стопяеми вложки с общо предназначение с изключвателна способност в част от диапазона, предназначени за защита на вериги на електродвигатели.

Стандартите определят два класа предпазители:

- за използване в битови електрически уредби, изработвани под формата на патрон, за номинални токове до 100 А и означавани като тип gG съгласно IEC 60269-1 и IEC 60269-3;

- за използване в индустрията, изработвани под формата на патрон, означавани като тип gG (обща употреба), gM и aM (за вериги на електродвигатели) съгласно IEC 60269-1 и IEC 60269-2.



Фиг.16.3

Основен параметър на стопяемите предпазители е характеристиката на изключване наричана още крива на изключване. Тя представлява време-токова характеристика, представяща зависимостта между тока, който предпазителят може да изключи (ос X) и времето за сработване на предпазителя (ос Y) – фиг. 16.3.

Например, на фиг.16.3 при  $I/I_n=6$  предпазителят ще прекъсне електрическата верига за време 0,4s.

Токът на късо съединение, при който стопяемият предпазител трябва да изключи за време от 0,4s се определя отново по формулата (16.1). Коефициентът на действие  $k$  при стопяемият предпазител се задава от производителя на защитата.

**Диференциалнотокова защита (ДТЗ)**, (защитен прекъсвач или прекъсвач за остатъчен ток на английски: *residual current device*, RCD) е електрически апарат, който се поставя в електрическите табла на апартаментите и сградите. На разговорен език ДТЗ често се нарича и *дефектнотокова защита*.

Основното ѝ предназначение е:

- да намали риска от поражение от електрически ток (протичане на ток през тялото на човек). Като за целта трябва да изключи веригата за време, по-малко от необходимото за нанасяне на сериозни поражения върху човека.
- да намали риска от пожари поради повреди в електрическите инсталации дължащи се на тока на утечка към земя.

Ако човек неволно се докосне до части от електрическата инсталация, които нормално се намират под напрежение (директен допир), през неговото тяло протича ток. Този ток е от порядъка на десетки милиампери, което означава, че автоматичният прекъсвач или предпазителят няма да изключат (те сработват при токове от порядъка на десетки ампера) и следователно не могат да защитят човека в такъв случай. Единственото средство, което би могло да се ползва за



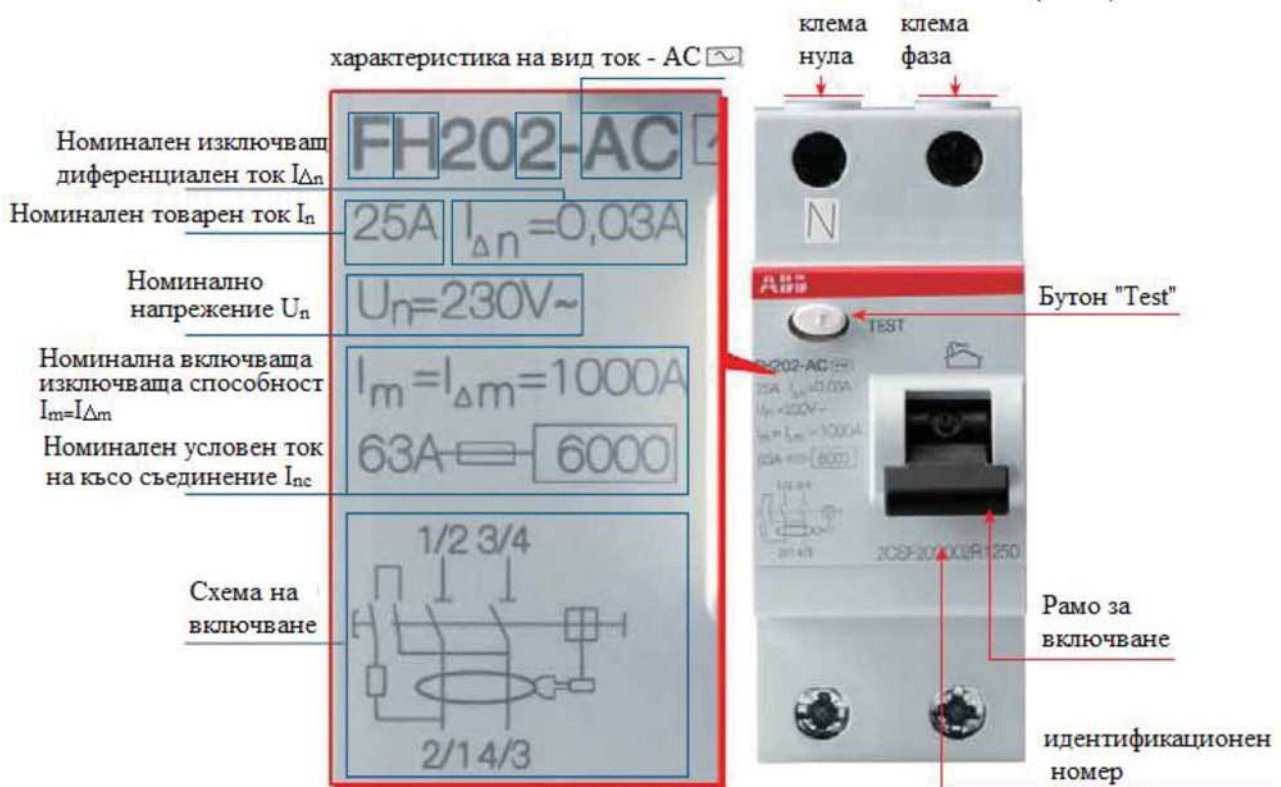
защита (намаляване на риска, а не сигурна защита) в случая е диференциалнотокова защита.

Праговата стойност, приета за защитата на човека от вредното действие на електрическия ток, е 30 mA. Следователно диференциалнотокова защита с чувствителност 30 mA е сигурно средство за защита на хората от поражение от електрически ток.

На фиг.16.4 е показано примерно маркиране на автоматичен прекъсвач. Номиналният неизключващ диференциален ток  $I_{\Delta n0}$  не трябва да бъде по-малък от половината на номинален изключващ диференциален ток  $I_{\Delta n}$ .

Диференциалния ток на сработване  $I_{\Delta CP}$  трябва да е в диапазона

$$0,5I_{\Delta n} \leq I_{\Delta CP} \leq I_{\Delta n} = 30mA \quad (16.2)$$



фиг.16.4

Диференциалнотоковите защиты биват най-често два типа:

- Тип AC – за приложение във вериги без наличие на хармоници или пулсиращи съставки на постоянен ток.
- Тип A – за приложение във вериги, „замърсени“ с хармоници или пулсиращи съставки на постоянен ток, с преобладаващи консуматори като компютри, изправители, луминесцентно осветление и т.н.

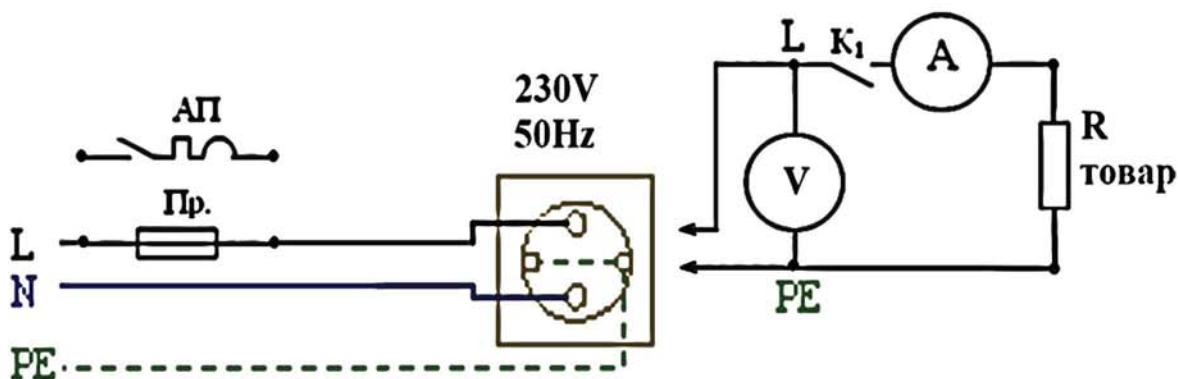
При нарушена изолация на проводниците протича т. нар. ток на земно съединение (от фазовия проводник към земя в мястото на повредата на изолацията). Тези токове, даже и да са малки, освен че предизвикват опасност за човека, също така разрушават с времето изолацията на проводниците, предизвиквайки нагриване. С времето това може да доведе до късо съединение и пожар поради преждевременното остаряване на изолацията.

Голям процент от пожарите в сгради се дължат на повреди в изолацията на електрическата инсталация. Доказано е, че при стойност на ток на утечка към земя над 500 mA се създава сериозен риск за възникване на пожар. Тъй като ток с такава стойност не може да предизвика изключването на защитаващия автоматичен прекъсвач, навременното изключване на повредения участък може да бъде гарантирано само с дефектнотокова защита.

За защита от пожар по електрически причини се препоръчва диференциалнотокови защиты с ток на сработване не по-голям от 300 mA. Тези диференциалнотокови защиты не защитават хората!

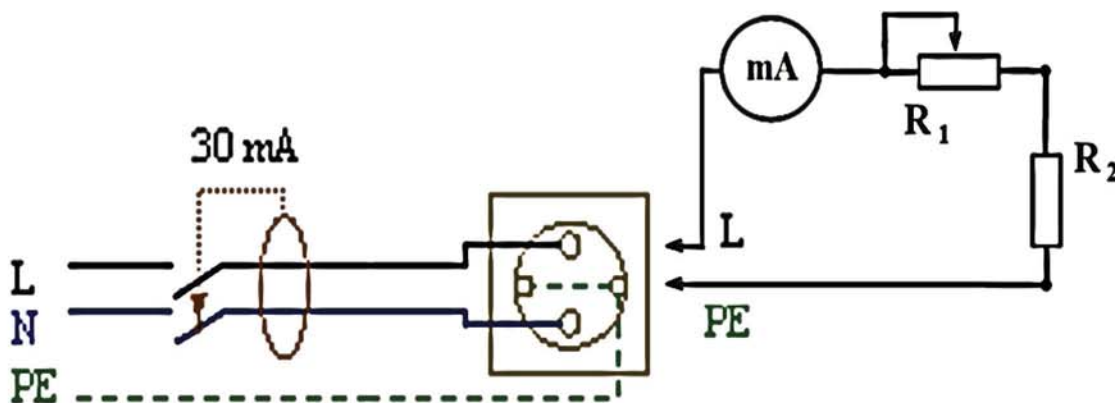
### Схема на опитната постановка

На фиг.16.5 е показана схемата на постановката за проверка на времето на изключване на автоматични прекъсвачи и стопяеми предпазители. Измервателната постановка се свързва към монофазен контакт (към фаза и защитен проводник).



фиг.16.5

На фиг.16.6 е показана схемата на постановката за проверка на номинален изключващ диференциален ток  $I_{\Delta n}$  на диференциалнотоков прекъсвач. Измервателната постановка се свързва към монофазен контакт (към фаза и защитен проводник).



фиг.16.6



### Програма на работа

1. Да се осъществи схемата показана на фиг. 16.5. Да се измери напрежението без товар (отворен ключ  $K_1$ ) -  $U_{\text{пр.х.}}$ . Да се измери напрежението  $U_{\text{товар}}$  и ток  $I_{\text{товар}}$  при включен товар (затворен ключ  $K_1$ ). Да се изчисли съпротивлението на контура „фаза-защитен проводник”  $Z_{F0}$ .

$$Z_{F0} = \frac{U_{\text{пр.х.}} - U_{\text{товар}}}{I_{\text{товар}}} \quad (16.3)$$

Под импеданс  $Z_{F0}$  на контура „фаза-защитен проводник” се разбира пълното съпротивление на веригата: намотка на трансформатора – фазов проводник-нулев (N) / защитен (PE) проводник с включените към него паралелно съпротивления на изкуствените и естествените заземители.

2. Да се сравни измереното съпротивление на контура „фаза-защитен проводник”  $Z_{F0}$  с нормата за съпротивление на контура  $Z_{F0n}$ , при което защитата изключва за време от 0,4s. Съпротивлението на контура  $Z_{F0n}$ , при което защитата „фаза-защитен проводник” за време от 0,4s се определя по формулата:

$$Z_{F0n} = \frac{U_n}{I_n \cdot k} \quad (16.4)$$

, където:

$U_n$  - номиналното напрежение на електрозахранващата мрежа;

$I_n$  - номинален ток на защитата;

$k$  - коефициенти на задействане на защитата

$I_n \cdot k$  - токът на късо съединение, при който автоматичният прекъсвач трябва да изключи за време от 0,4s.

Коефициентът на задействане  $k$  при автоматичен прекъсвач се задава с буквата пред номиналния ток. Най-често за коефициент на задействане  $k$  при стопяемият предпазител се приема стойност 7.

Да се попълни таблица 16.1.

Таблица 16.1

$U_{\text{пр.х.}}$	$U_{\text{товар}}$	$I_{\text{товар}}$	$Z_{F0}$	$U_n$	$I_n$	$k$	$Z_{F0n}$	$Z_{F0} \leq Z_{F0n}$
V	V	A	$\Omega$	V	A	-	$\Omega$	да или не

3. Да се осъществи схемата показана на фиг. 16.6. Да се зададе неизключващ диференциален ток  $I_{\Delta n0}$  и чрез промяна на реостат  $R_1$ , плавно да се повиши диференциален ток до изключване на диференциалнотоковата защита. Да се измери диференциален ток  $I_{\Delta}$  непосредствено преди изключването.

4. Да се попълни таблица 16.2, като се направя две измервания за диференциален ток на изключване и се изчисли средната стойност  $I_{\Delta \text{ср}}$ .

$$I_{\Delta \text{ср}} = \frac{I_{\Delta 1} - I_{\Delta 2}}{2} \quad (16.5)$$

Таблица 16.2

$I_{\Delta n}$	$I_{\Delta 1}$	$I_{\Delta 2}$	$I_{\Delta \text{ср}}$	$I_{\Delta \text{ср}} \leq I_{\Delta n}$
mA	mA	mA	mA	да или не

### ***Контролни въпроси***

1. Какво е устройството на електрически предпазител?
2. Какво е устройството на автоматичен прекъсвач?
3. Какво представлява време-токовата характеристика на електрически предпазител?
4. Какво представлява време-токовата характеристика на автоматичен прекъсвач?
5. Какво означава маркировката на автоматичен прекъсвач?
6. Какво е устройството на диференциалнотоков прекъсвач?
7. Какво означава маркировката на диференциалнотоков прекъсвач?
8. Колко е нормираното време за изключване на защитна апаратура свързано с защита на хората срещу директен и индиректен допир?



**ЦИФРОВ МУЛТИМЕТЪР И НАЧИН НА УПОТРЕБА.  
ОСЦИЛОСКОП И НАЧИН НА УПОТРЕБА.**

**ЦИФРОВ МУЛТИМЕТЪР И НАЧИН НА УПОТРЕБА**

*Цел на упражнението*

1. Да се запознаят студентите как се измерва с цифров мултиметър .
2. Да се направят измервания на постоянно и променливо напрежение и ток, да се измерят съпротивления.
- 3 Да се провери електрическа верига и предпазител за наличие на прекъсване.

*Теоретична постановка*

**Цифровият мултиметър**, наричан още **мултимер** или **мултицет** (професионален жаргон, от немското *Multizet*), е многофункционален измервателен уред, който има възможността да измерва различни електрични величини. В най-простия случай той съчетава функциите на волтметър и амперметър (за постоянен и променлив ток) и омметър. Уредът е преносим и изключително полезен при измервания в полеви условия, домашни условия и мобилни групи от електротехници посещаващи на място проблемни зони в промишлеността.

Някои мултиметри имат допълнителни функции за измерване на индуктивност, капацитет, температура, честота, коефициент на усилване по ток на транзистори и др.. Има и мултиметри, които имат възможност за свързване към компютър.

**Как се измерва с мултиметър?**

Стандартният мултиметър се състои от четири части(фиг.17.1):

- дисплей;
- превключвател с разграфена скала за измерваните величини и обхвата на измерване;
- две, три или четири вградени обозначени букси (конектори), едната от които задължително е COM;
- сонди, обикновено червена и черна.

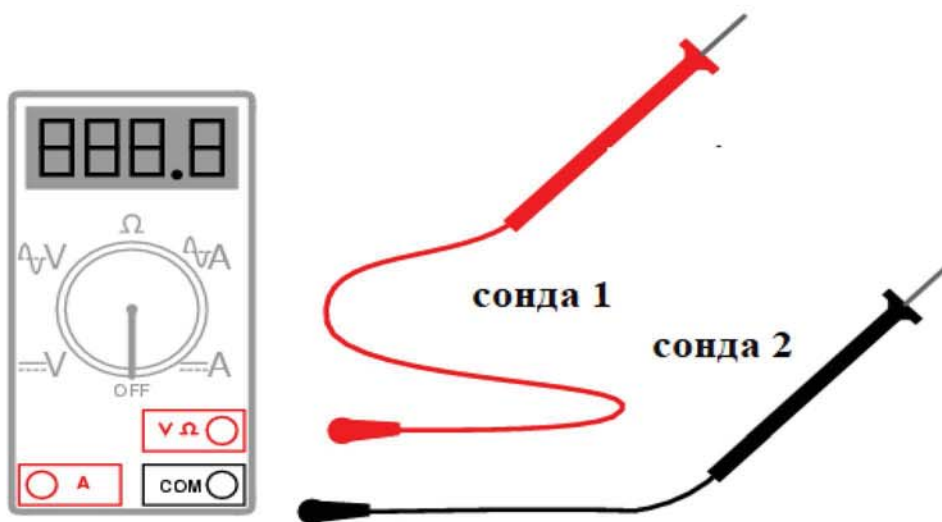
На някои уреди, в горната им част има бутон за включване ON/OFF, бутон HOLD за запаметяване на измерената стойност, бутон LIGHT за осветление на дисплея и др. Захранването на мултиметърът е от батерия, която се монтира в самия мултиметър под капак от задната му страна. Най-често дисплеят е четириразряден и има възможност да показва и отрицателен знак.

Черната сонда се поставя в буксата с надпис COM, а червената сонда в зависимост от това какво измерваме в една от другите букси с надпис mA, V,  $\Omega$ , или A.

Скалата на мултиметъра има отделни сектори за измерване на постоянно и променливо напрежение. Постоянното напрежение е означено със знак V-, а променливото, съответно с V~. Стойностите на обхватите (диапазони на измерване) се избират от въртящия се превключвател.

За да бъде измерването най-точно, трябва да работите на най-близкия по-голям обхват от измерваната величина. Ако не знаете стойността на величината, се препоръчва да сложите превключвателя на максимален обхват. Ако измервате постоянно напрежение, но размените местата на сондите, стойността на измереното напрежение ще се появи на екрана с отрицателна стойност без някаква опасност за мултиметъра.

Ако показанието на дисплея е I или OL (overload) това означава, че уреда е на малък обхват и трябва да увеличите обхвата на измерване, ако показанието е 0.00 или близко до 0.00, трябва да се намали обхвата.

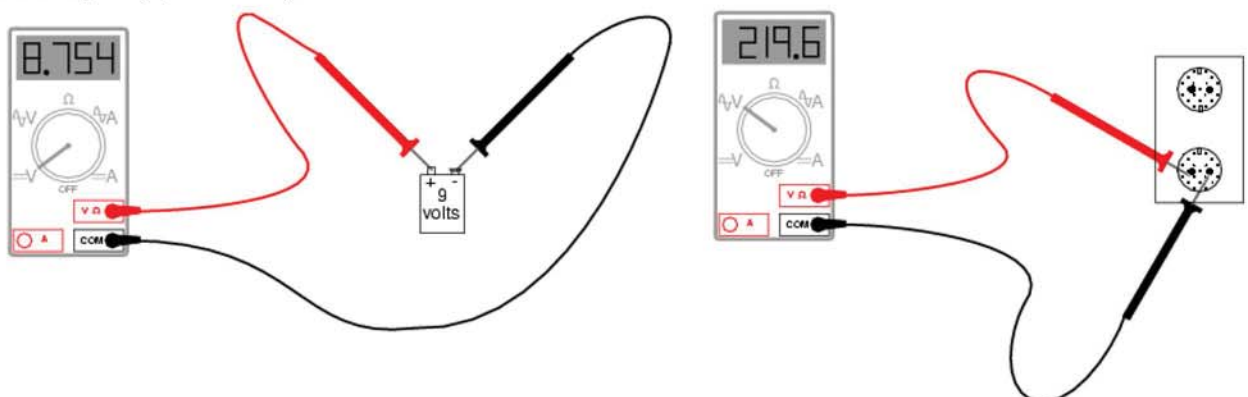


фиг.17.1

### Измерване на напрежение

При измерване на напрежение поставете превключвателя на скалата означена със знак за напрежение, като ако не знаете стойността на напрежението поставете превключвателя на най-голям обхват. Черната сонда се поставя в буксата с надпис COM, а червената сонда в букса с надпис V.

За да се измери постоянно напрежение, превключвателя трябва да е на постоянно напрежение V-. Например да се измери постоянното напрежение на една батерия(фиг.17.2).





фиг.17.2

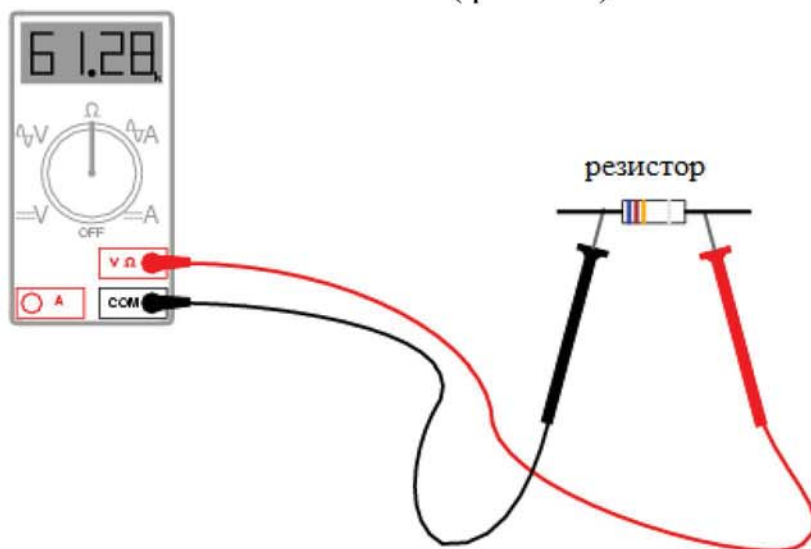
За да се измери променливо напрежение, превключвателя трябва да е на променливо напрежение  $V\sim$ . Например да се измери променливото напрежение на електрозахранващата мрежа(фиг.17.3).

фиг.17.3

### Измерване на съпротивления

При измерване на съпротивления поставете превключвателя на скалата означена със знак  $\Omega$ . Черната сонда се поставя в буксата с надпис COM, а червената сонда в букса с надпис  $\Omega$ .

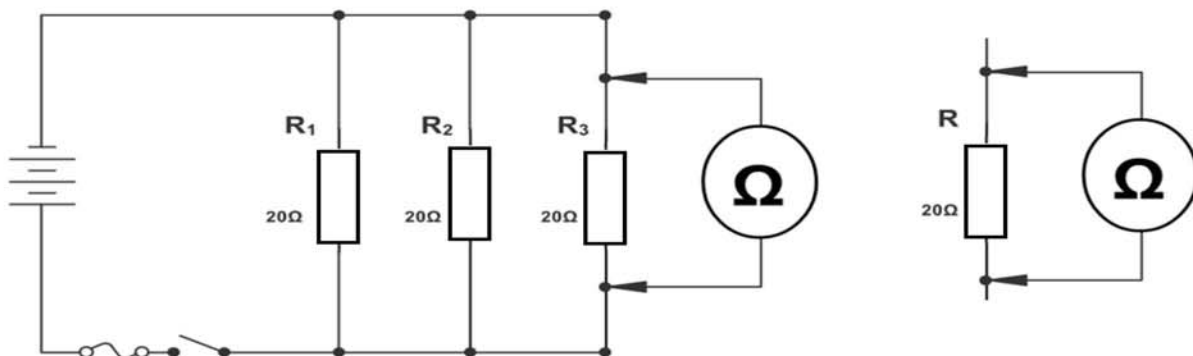
Стойността на съпротивленията на резистори най-често е показана с цветни линии, наречени цветен код на резисторите. Ако нямате наблизо справочник за разчитане на кода, а разполагате с мултиметър, доближете краищата на сондите към двете крачета на резистора. Имайте в предвид, че ако придържате с пръсти краищата на сондите към двете крачета на резистора във веригата участва и съпротивлението на вашето тяло(фиг.17.4).



фиг.17.4

Измерването на съпротивлението има редица особености с които трябва да се съобразите:

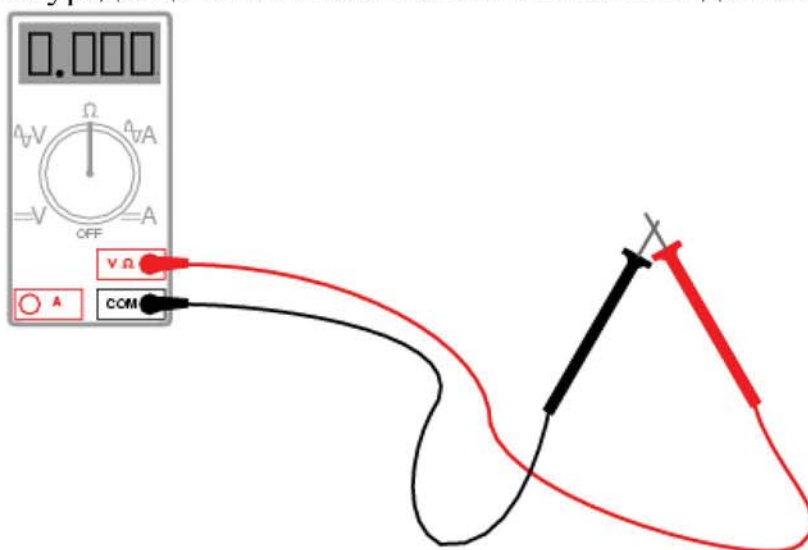
- не забравяйте, че съпротивленията се влияят от околната температура и като правило стойността им винаги се дава при температура 20°C
- когато съпротивлението е монтирано на платка или в устройство, измерването му може да бъде изключително трудно. Това е така защото околните електронни елементи ще влияят чувствително на измерената стойност(фиг.17.5).
- за постигане на точно измерване, поставете уреда на най-близкия по-голям обхват от стойността на резистора
- във електрическата верига на измерваното съпротивление не трябва да е включено захранването
- ако измервате съпротивление между две точки на една верига, в която има включен и кондензатор за кратко ще чуете сигнал, който след това ще прекъсне. Това означава, че просто кондензаторът се е разредил и след това е прекъснал веригата.



фиг.17.5

### Измерване на непрекъснатост на верига

Една от най-важните функции на мултиметърът е измерването на свързаност (непрекъснатост) на верига. Тази функция е важна защото дава информация дали няма прекъсване в електрическата верига. Поставете превключвателя на най-малкия обхват за измерване на съпротивления, на знака който изглежда като разпръскващи се вълни от високоговорител (зумер). Някои от най-простите модели мултиметри може и да не притежават тази функция. При наличие на верига уреда ще има показание 0.00 или близко до 0.00 (фиг. 17.6).



фиг.17.6

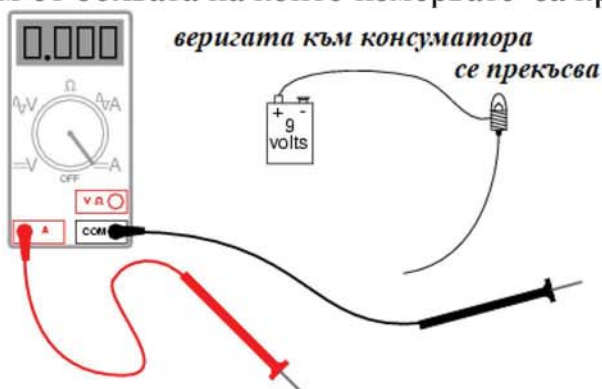
### Измерване на ток

Измерването на ток е доста трудно. Трудността произтича от това, че уредът (мултиметърът като амперметър) трябва да се включи последователно във веригата на измервания консуматор. При измерване на ток поставете превключвателя на скалата означена със знак за ток А. Черната сонда се поставя в буксата с надпис COM, а червената сонда в буква с надпис А или mA(фиг.17.7).

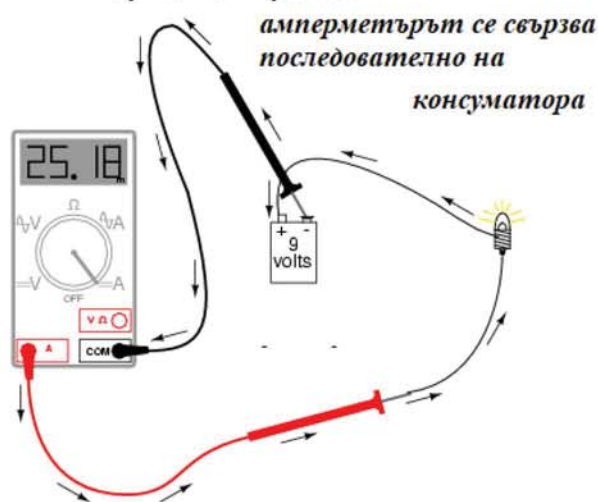
В постояннотокови вериги, черната сонда трябва да се свърже към минуса на захранването, а червената към консуматора. Ако свържете сондите обратно – показанието на дисплея ще е с обратен знак(ще се появи минус на дисплея) (фиг.17.8).



Също така добре е да използвате сонди с крайници крокодили, за да може токът да протича устойчиво през уреда без ръцете ви да са заети с това. От особена важност е да определите точния диапазон на протичащия ток. Трябва да вземете предвид и пусковия ток на определени консуматори, който може да е по-голям от обхвата на който измервате за кратък интервал от време.



фиг.17.7

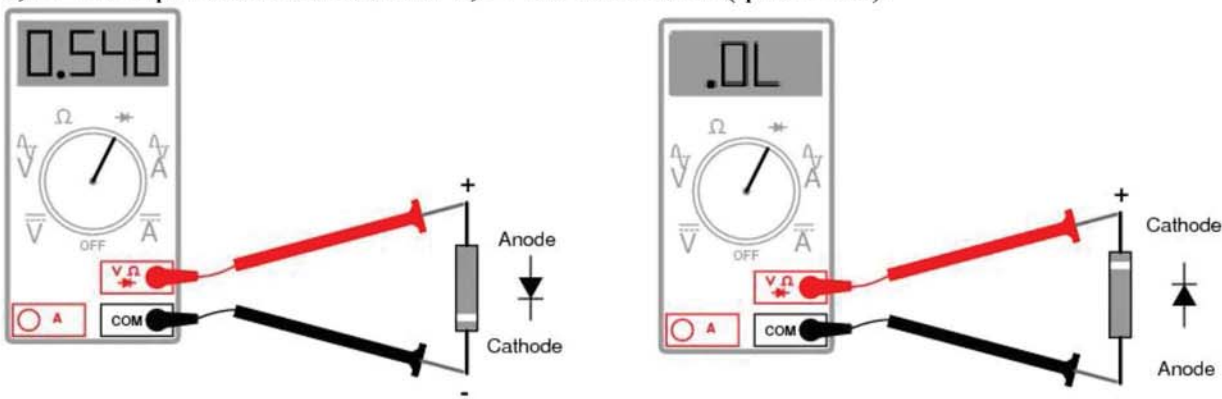


фиг.17.8

Ако се налага да измервате по-големи токове, трябва да поставите червената сонда в буксата, на която пише 10A. Когато не е сигурно точно какъв ток се очаква през дадена верига, винаги е по-добре да се започне със сонда поставена в буксата за 10A. В близост до тази буква обикновено има надпис unfused, което означава че при измерване със сонда включена в тази буква нямаме предпазител.

### Проверка на диоди

Често се налага с мултимера да се направи проверка на изправителни диоди и светодиоди (LED). За целта превключвателя трябва да бъде поставен на означението за диод. След това се прави внимателен оглед на диода и се търси идентификация на катода, обикновено това е лента в края на корпуса на диода. При свързване в права посока, полученото на уреда показание показва пада на напрежение върху диода в посоката на пропускане. Числото, което се появи може да е 0,2V за германиев диод или 0,5V за силициев(фиг. 17.9).



фиг.17.9

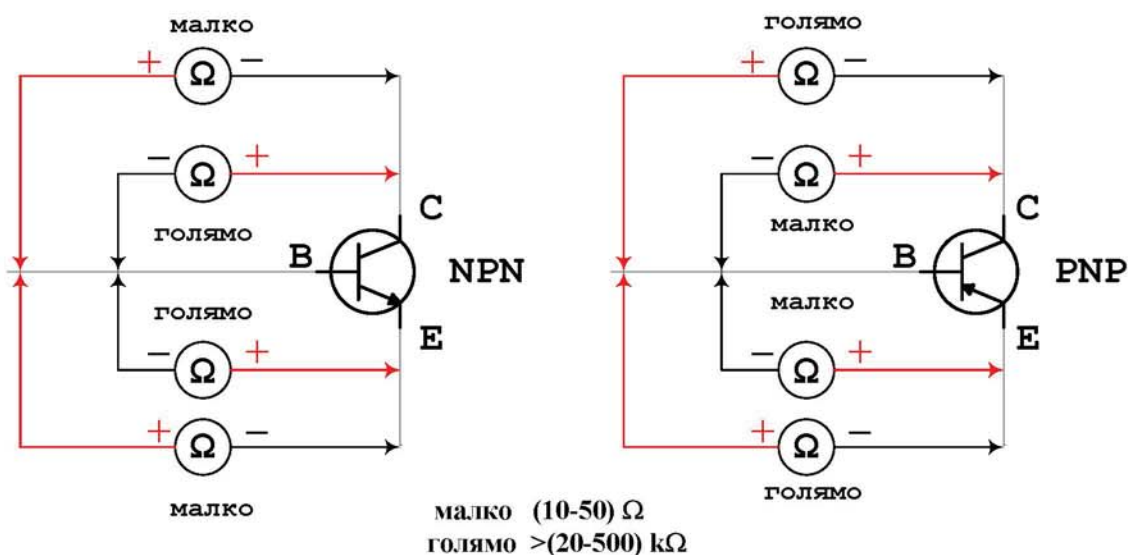
Ако сте поставили сондите обратно ще се появи индикация I OL – претоварване. Ако и в двете положения на свързване на сондите към диода се

появява символа за претоварване значи диода е прекъснат. Ако и в двете положения се появява някаква стойност значи диода е пробит, т.е. даден накъсо. При LED по-дългото краче отговаря на „+“, а по-късото на „-“. След като определим полярността внимателно докосваме положителния край (респ. анода) с червената сонда, а отрицателния – с черната. LED диода трябва да светне, ако сме спазили поляритета. Ако падът на напрежение в светодиода е по-голям от 2V уредът ще даде неправилното показание, че светодиодът е прекъснат!

### **Проверка на транзистори и измерване на коефициента на усилване по ток транзистори**

#### **Проверка на транзистори**

За целта превключвателя трябва да бъде поставен на означението за диод. След това се прави внимателен оглед на транзистора и се търси идентификация на изводите база, емитер и колектор по каталог. Проверяваме прехода база-емитер или база-колектор по подобие на проверката на диод.



фиг.17.10

Проверката на транзистор може да бъде направена и по начина показан на фиг.17.10.

#### **Измерване на коефициента на усилване по ток транзистори**

Някои уреди имат отделен куплунг за измерване на коефициента на усилване по ток транзистори. За да измерим усилването на транзистор трябва да сложим превключвателя на деление означено с  $h_{FE}$  (ако го има). Виждаме означението PNP за прав и NPN за обратен транзистор. Подреждането на отворите е E за емитер, C за колектор и B за база. Когато поставим транзистора според означенията, на дисплея ще видим усилването на транзистора по ток. Показаната стойност трябва да се приема за приблизителна, защото тя зависи от подадения тестов ток.

#### **Измерване на други електронни елементи с мултиметър**

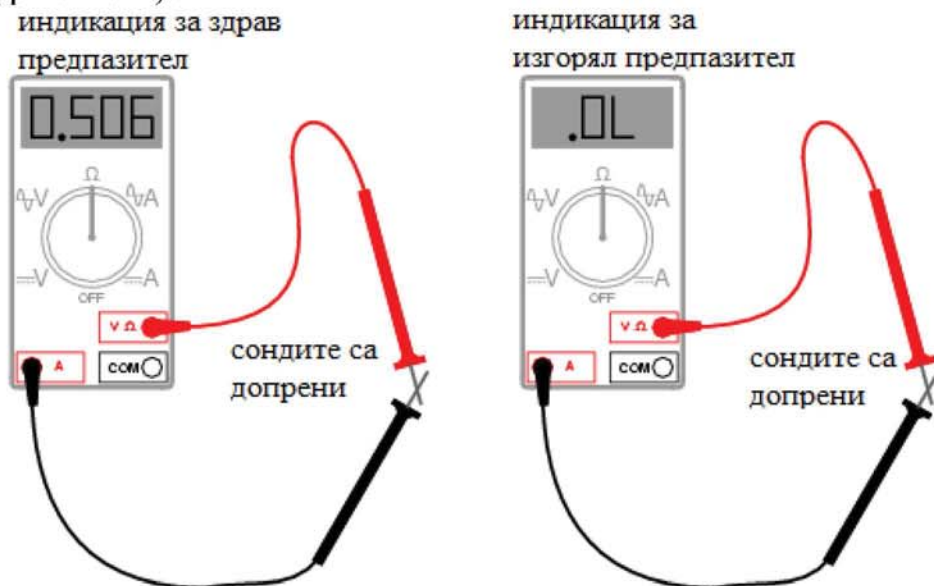
Някои уреди имат отделни входове (цокли) за термодвойки, кондензатори, бобини и др..



При измерване на кондензатори, те трябва предварително да се разредят, като се дадат накъсо изводите му. След това се поставя в предвидения за целта цокъл, като се внимава за полярността му ако е поляризиран.

### Допълнителни съвети

Понякога се случва да оставите превключвателя на измерване на ток, а да включите сондите между фаза и нула. Това ще доведе до късо съединение, през мултиметъра ще премине голям ток и предпазителя му ще изгори. За да смените предпазителя на мултиметъра трябва да го отворите. Може да се провери дали е изгорял предпазителят по показания начин, като червената сонда се поставя на mA(фиг.17.11).



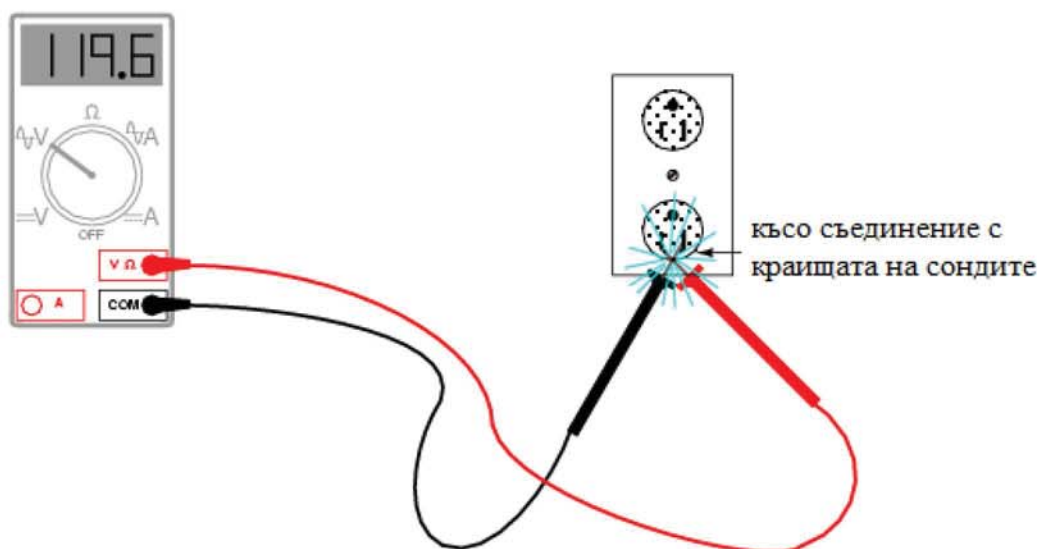
фиг.17.11

Мултиметрите от висок клас може да имат автоматичен избор на диапазон **autoranging**. В този случай мултиметърът сам настройва вътрешните си вериги, за да измери коректно подаденото към него напрежение, ток или съпротивление.

Подсветката на дисплея от своя страна позволява извършването на измервания в слабо осветени места, например през нощта на открито. Автоматичното изключване е функция, много полезна за по-разсеяните потребители, която съхранява батерията. Някои уреди имат извод за свързване към компютър. Те използват специален софтуер, позволяващ резултатите от измерванията да се запаметят, да се представят графично и да се запишат в компютър.

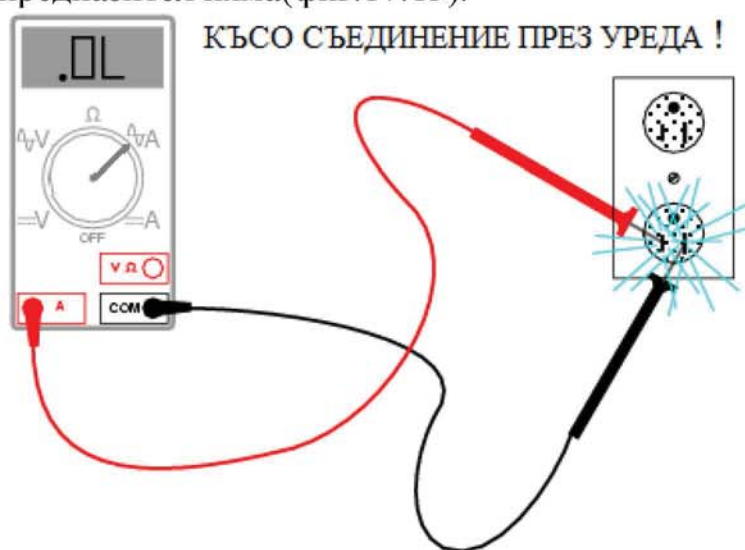
### Внимание! Важно

1. Никога не превишавайте граничните стойности, посочени на скалата за всеки обхват на измерване.
2. Не докосвайте неизолираните краища на сондите при измерване и внимавайте да не направите късо съединение с тях(фиг.17.12).
3. Никога не измервайте съпротивление в схема с включено захранващо напрежение. В режим на измерване на съпротивление не измервайте напрежение - това може да доведе до повреда на уреда.



фиг.17.12

4. Най-честата причина за изгаряне на мултиметъра е ако се опитаме да измерваме напрежение, а сме забравили превключвателя в зоната на токовите измервания. Получаваме пълно късо съединение и дори предпазителя няма да спаси уреда от безвъзвратна повреда. Освен това, най-често на буксата с надпис 10A предпазител няма(фиг.17.13).



фиг.17.13

5. Никога не използвайте уреда за измерване на напрежение по-високо от обхватите на уреда.

6. Когато стойността на измервания параметър е неизвестна, уредът се настройва на максимален обхват.

7. Преди да преминете към избор на друг параметър за измерване, задължително отстранете сондите от предишното измерване. Ако не го направите - това може да доведе до повреда.

### ***Програма на работа***

1. Да се реализира постановката от фиг.2. за измерване на постоянно напрежение на галваничен елемент.



2. Да се реализира постановката от фиг.3. за измерване на променливо напрежение на електрозахранващата мрежа.
3. Да се реализира постановката от фиг.4. за измерване на съпротивлението на резистор или друг консуматор.
4. Да се реализира постановката от фиг.6. за проверка на непрекъснатост на електрическа верига и предпазител.
5. Да се реализира постановката от фиг.8. за измерване на постоянен ток.
6. Да се реализира постановката от фиг.9. за проверка на диоди и биполярни транзистори.

### ***Контролни въпроси***

1. Какво е означено със знак „-“ и „~“?
2. Какво означава надпис COM, надпис  $\Omega$ , надпис V и надпис A.
3. Как се използва цифровият уред като зумер?
4. Защо не трябва да се измерват напрежения по-големи от обхвата на уреда?
5. Какво ще стане ако токът през уреда, като амперметър е по-голям от максималния обхват по ток?

## ОСЦИЛОСКОП И НАЧИН НА УПОТРЕБА

### *Цел на упражнението*

1. Да се запознаят студентите как се измерва с осцилоскоп .
2. Да се направят измервания свързани с измерване на постоянни и променливи периодични.
3. Да се направят измервания свързани с измерване на честота и амплитуда на периодичен електрически сигнал.

### **Работа с осцилоскоп. Измерване на напрежение. Измерване на честота.**

Осцилоскопът, наричан още осцилограф (от руски), или цифров осцилоскоп (DSO - digital storage oscilloscope), е съвременен електронен инструмент за наблюдение на периодични електрически сигнали (под формата на напрежение) върху двуизмерна скала (дисплей). Получената диаграма се нарича осцилограма. Нанесена върху две координатни оси:  $X$  и  $Y$ , осцилограма дава точна информация за промените на напрежението за определен период от време за разлика от волтметъра, например, който измерва само моментната стойност на напрежението. Разгънатият образ на измереният и обработен сигнал позволява да се анализират не само големината, но и формата, амплитудата и честотата му.

Неелектрически сигнали (звук, вибрации) могат да бъдат превърнати в напрежение и също да се измерват с осцилоскоп.

Осцилоскопът е един от най-често използваните уреди в научно-изследователски лаборатории. Осцилоскопът е незаменим уред в сфери като медицината, ЕКГ, инженерството, телекомуникациите

Осцилоскопите най-често се делят на еднолъчеви и двулъчеви.

### **Основни параметри**

Мащаб свързан с вертикална развивка на  $Y$  канал - константа  $C_y$ , V/div – обикновено от 5 mV/дел до 10 V/дел.

Мащаб свързан с хоризонтална развивка - константа  $C_x$ , s/div – обикновено от 0.01  $\mu$ s/дел до 50 ms/дел.

Честотна лента  $\Delta_f$ , MHz – определя се основно от горната гранична честота на амплитудно-честотната характеристика на усилвателите. Тя обикновено е около 10 MHz.

Входно съпротивление на  $Y$  канал – в граници 0.5 до 2 M $\Omega$ .

Входен капацитет на канал  $Y$  – зависи от съединителния кабел и е около 100 pF, а с подходящ накрайник може да се намали до 10 pF.

Максималното допустимо напрежение на вход  $Y$  е от 30 V до 300 V.

### **Измервани величини**

Измервани величини: напрежение от пик до пик, максимално, минимално и средно напрежение, амплитуда, ефективна стойност (*Root mean square*, **RMS**)



или rms), честота на сигнала, период на функцията, време на нарастване на напрежението, време на намаляване на напрежението, коефициент на запълване.

Панелът на осцилоскопа се състои от следните основни сектори: **екран** (дисплей, който най-често е LED) или компютърен екран; **вертикални контролери** (вертикална амплитудна развивка) на сигнала; **хоризонтални контролери** (хоризонтална времева развивка); **тригерен контрол**, тригерирането осъществява синхронизацията и е необходимо с цел стабилизиране на изображенията на сигнала, нивото на сигнала и вида му, има и бутони за управление на екрана като фокус, интензитет и търсещ лъч.

### Окомплектовка

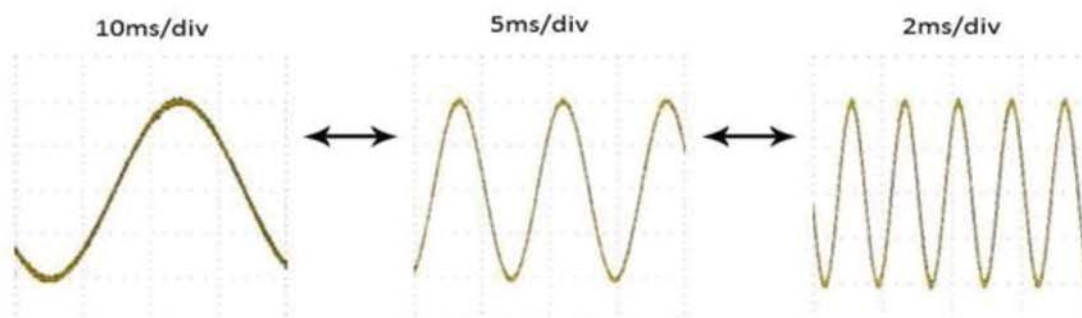
В допълнение към основното устройство има една (или повече, в многоканалните осцилоскопи) сонда с щипка за земя.

### Работа с осцилоскоп

При работа с осцилоскоп първоначално на екрана виждаме една хоризонтална права линия върху оста  $X$ . Това е нулевата линия, когато към осцилоскопа не е включен никакъв източник на напрежение. Нарича се нулева, защото съответства на напрежение равно на нула. Тази нулева линия може да се мести по вертикала на осцилоскопа.

Ако на входът на осцилоскопа се подаде **постоянно** напрежение получената осцилограма ще бъде права хоризонтална линия изместена по вертикала, като разликата между получената осцилограма и нулевата линия ще е пропорционална на стойността на напрежението. Когато измерваме и изучаваме **променливо** напрежение, говорим за амплитуда на напрежението. Когато тя излиза извън екрана, се налага вертикална корекция на изобразената осцилограма, т.е. увеличава се обхвата. По-малък обхват е необходим за напрежение с по-малки стойности.

В хоризонтално направление се регулира времевия интервал (хоризонтална развивка по време). Чрез това регулиране можем да променяме броя на периодите на сигнала наблюдавани на екрана, както е показано на фиг.17.14.



Фиг.17.14

### Синхронизация

Синхронизация се налага за стабилизиране графиката на напрежението на дисплея. При осцилоскопи с повече от един канал, трябва да се направи избор на канал за синхронизация, също се избира ниво на синхронизация и самата синхронизация става по нарастващ или спадащ фронт на сигнала. При липса на синхронизация сигнала е тип „черга“. За получаване на неподвижно

изображение е необходимо да се извърши синхронизация. Има няколко вида синхронизация: автоматична, единична, външна и HOLD-OFF.

- **автоматичната** синхронизация се използва за измерване на периодично повтарящи се сигнали, тя може да бъде по един от каналите или по захранващата електрическа мрежа
- **единична** синхронизация се използва при единични сигнали, при нея също се избира нивото на синхронизацията, отново се избира по нарастващ или спадащ фронт на сигнала да се прави. може да се приложи и при пулсиращи през определен период единични сигнали;
- **външната** синхронизация се използва, когато осцилоскопа има вход (извод) за външна синхронизация;
- **HOLD-OFF**, тази функция е много полезна в случаите, когато искаме да визуализираме сложни сигнали, които се състоят от повече от една честота.

В случай на нестабилен сигнал (сигналят се движи, поради което отчитането му е трудно или невъзможно) се прилага:

- ръчно „успокояване“ на сигнала с помощта на потенциометъра LEVEL от зона TRIGGER

- натискане на бутона RUN/STOP, за „паузиране“ на сигнала.

### **Заклучение**

В заключение ще добавим, че осцилоскопа си остава едно широко разпространено, универсално и точно измервателно средство, чрез което можем да изследваме характера на електрически и неелектрически сигнали с изключителна прецизност. Използването му в автодиагностиката, медицината, производството и настройката на аудио и видеотехниката и почти във всяка съвременна лаборатория, правят осцилоскопа незаменим помощник на учения, инженера и радиолюбителя и на всеки, който е любознателен за естеството на света, в който живеем.

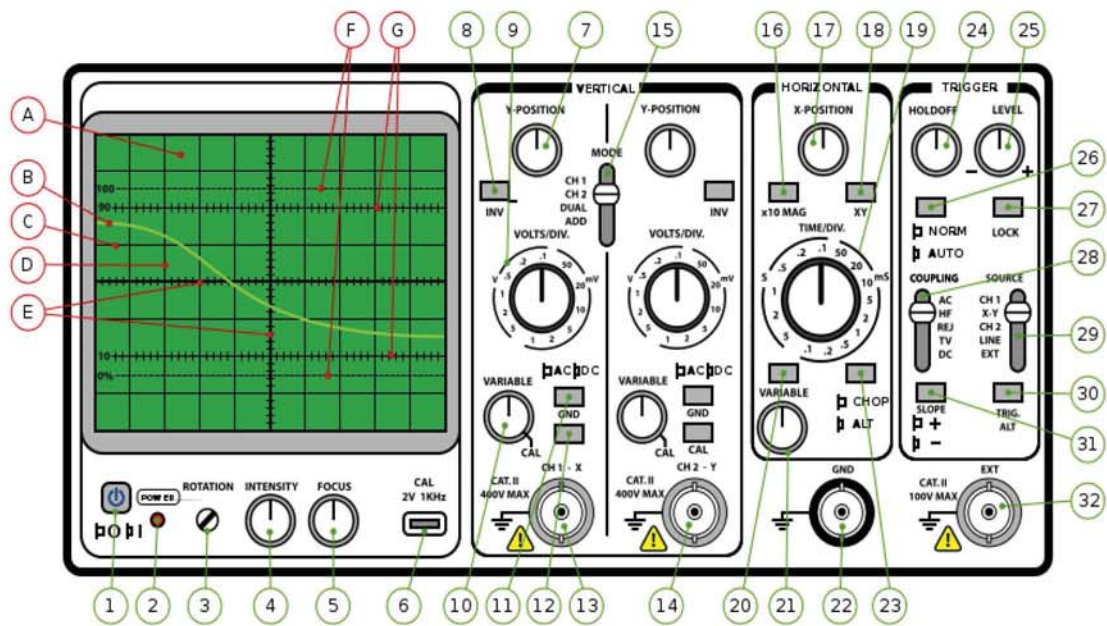
### **Двуканален двулъчев осцилоскоп**

На фигура 17.15 е показан преден панел на двуканален двулъчев осцилоскоп.

#### **Екран**

**А** е екран. Най-често екранът е LED и обикновено е около 100 mm от ъгъл до ъгъл. **В** е сигнал наблюдаван на екрана. Екранът е покрит с мрежа от хоризонтални (**С**) и вертикални (**Д**) линии, наречена „решетка“, която разделя екрана на квадрати, наречени. Решетката обикновено е широка 10 реда и 8 колони. Централните хоризонтални и вертикални линии (**Е**) обикновено са по-дебели от останалите и допълнително разграфени. Това помага на по-лесното определяне на амплитуди и времеинтервали.

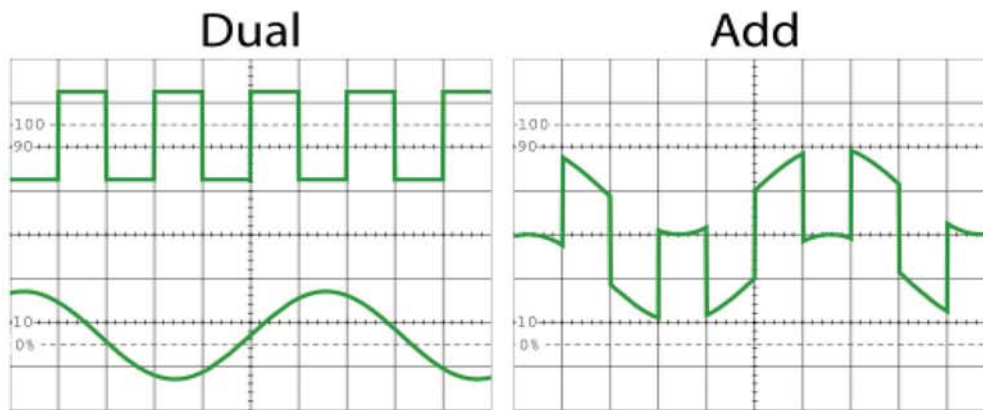




Фиг.17.15

### Управление и калибриране

- 1 - е бутонът за включване / изключване на захранването.
- 2 - е индикатор за захранване
- 3 - завъртане на сигнала. Това се извършва само от сервиза.
- 4 - яркост на лъча.
- 5 - фокусировка на лъча
- 6 - сигнал за калибровка
- 7 - контролира вертикалната позиция на лъча.
- 8 - обръща поляритета на съответния канал.
- 9 - мащаб свързан с вертикална развивка - volts / div.. Задава амплитудата на лъча и се променя стъпално.
- 10 - плавно управление на амплитудата. Трябва да е поставен на CAL за да е в сила мащаба на 9
- 11 - е превключвател AC / DC. Когато е на променлив ток AC, всеки постояннотоков компонент на напрежението се филтрира чрез кондензатор. Когато е настроен на DC, сигналът се показва такъв, какъвто е.
- 12 - е превключвател на GND. Като е избран, входният сигнал се игнорира и лъчът показва 0V.
- 13 - е вход на сигнал на канал 1. Тук е включена сондата на осцилоскопа.
- 14 - е вход на сигнал на канал 2. Тук е включена сондата на осцилоскопа.
- 15 - начин на комбиниране на каналите, показан на фигура 17.16. Когато е зададен на CH 1 се показва само Канал 1, или CH2 за Канал 2. Когато е избран DUAL, показва и двата канала. ADD се използва за сумиране на двата входни сигнала. Чрез обръщане на поляритета на единия канал се извършва изваждане на сигналите.
- 19 - мащаб свързан с хоризонтална развивка - константа  $C_x$ , s/div. Варира от около 0,1 милисекунди до около 1 секунда
- 17 - хоризонтално позициониране на сигнала.
- 16 - мащаб хоризонтална развивка  $\times 10$ .



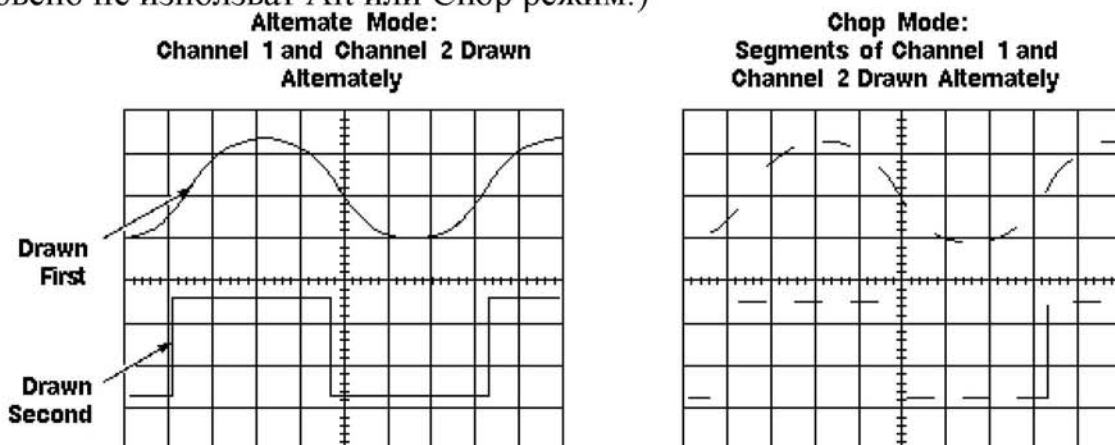
Фиг.17.16

18 - режим XY. Напрежението на Канал 1 се подава по хоризонталната ос а напрежението на Канал 2 по вертикалната ос. Това може да бъде изключително полезно за анализ на честоти или фазови разлики.

21 - плавно управление на развивката. За да изберете нестандартна времева база, натиснете 20 и регулирайте 21, докато се получи правилната настройка. За да се върнете към калибрирана времева база, натиснете отново 20.

22 - е GND Земя.

23 - Alternate-алтернативен режим изтегля всеки канал последователно. Използвайте този режим със средни до високочестотни сигнали, когато мащабът е зададен на 0,5 ms или по-малък. Режимът Chop осцилоскопът показва малки части от всеки сигнал, като превключва между тях. Скоростта на превключване е твърде бърза, за да може да се забележи. Обикновено използваме този режим с бавни сигнали, изискващи 1 ms на деление или по-малко. Следващата фигура 17.17 показва разликата между двата режима. (Цифровите осцилоскопи обикновено не използват Alt или Chop режим.)

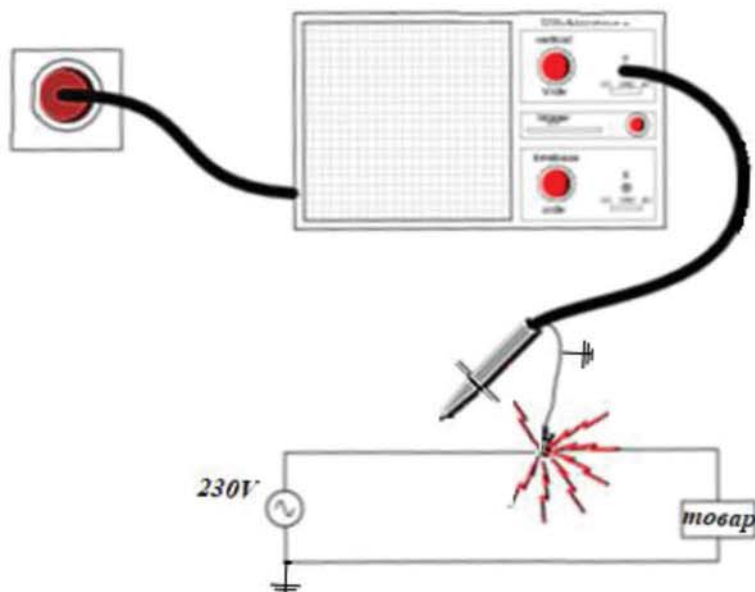


Фиг. 17.17

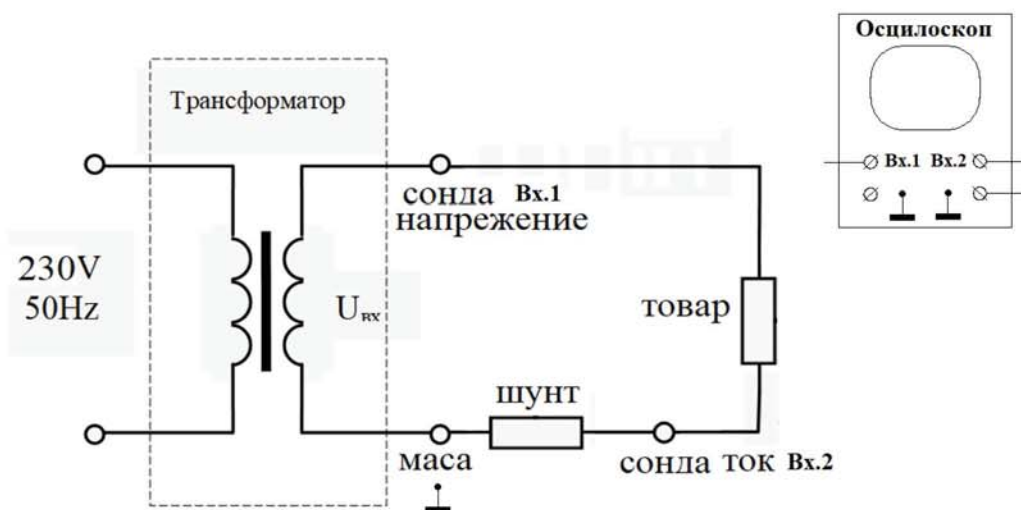
Все пак, трябва да бъдете много внимателни, когато свързвате осцилоскоп към електрозахранваща система, на която звездния център е заземен. Ако свържем щипката на сондата към точка с електрически потенциал по-висок от нулата можем да повредим сондата и осцилоскопа. Щипката на сондата е свързана към защитния проводник на електрическата инсталация. Например на



фигура 17.18, ако щипката на сондата се свърже към фазата на мрежата се получава късо съединение!



Фиг. 17.18  
Схема на опитната постановка



Фиг. 17.19

### Програма на работа

1. Да се реализира постановката от фиг.17.19. за измерване на променливо синусоидално напрежение.

За измерване на напрежение се използва един от каналите  $Y$  на осцилоскопа. Ако работим на канал  $YI$ , поставяме синхронизацията в положение “CH1”. Обхватният превключвател (входен делител) на канал  $Y$  се поставя на най големия обхват, т.е. на най-малката чувствителност.

След подаване на измерваното напрежение на вход  $YI$ , поставяме обхватният превключвател на подходяща позиция съобразена със сигнала на екрана. Потенциометърът за плавно регулиране трябва да бъде на “cal -калибровка” за да бъде вярна константата  $C_Y$  [  $V/дел$  ]. При неустойчив образ използваме

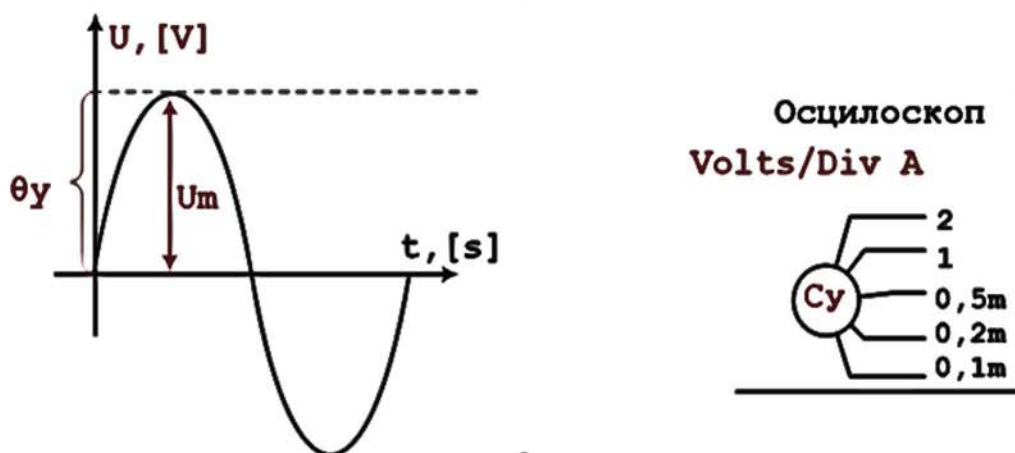
потенциометърът за плавно регулиране на хоризонталната развивка до получаване на стабилен образ.

Измерване на максимална стойност на напрежение е показано на фиг. 17.20. По деленията на вертикалните линии отчитаме разстоянието  $\theta_y$ . Чрез константата  $C_y$  и разстоянието  $\theta_y$ , за максималната стойност на измерваното напрежение получаваме:

$$U_m = \frac{1}{2} C_y \cdot \theta_y \quad (17.1)$$

Ако напрежението е синусоидално, ефективната му стойност ще бъде:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 \frac{C_y \cdot \theta_y}{2} \quad (17.2)$$



Фиг. 17.20

Попълваме получените резултати в таблица 17.1.

Таблица 17.1

№	$\theta_y$	$C_y$	$U_m$	$U$
	деления	V/деление	V	V

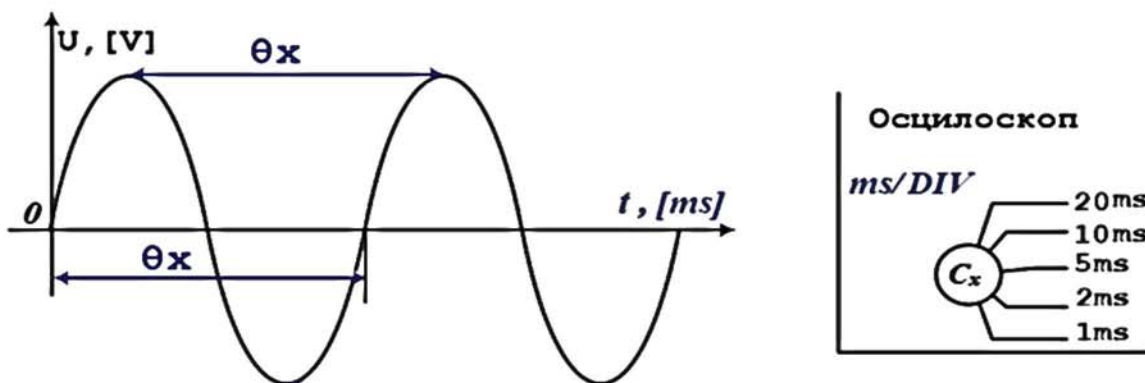
При цифровите осцилоскопи има възможност за автоматично измерване на максимална стойност и размах на синусоидата.

2. По постановката от фиг.17.19. да се измери честотата и периода на променливо синусоидално напрежение.

Периодът  $T$  и честотата  $f$  на изследваните електрически величини могат да се определят лесно от образа, който се наблюдава на екрана на осцилоскопа (фиг. 17.21). Отчитаме разстоянието  $\theta_x$  за един период на периодичната величина. Като използваме мащабът за време  $C_x$  на хоризонталната развивка и разстоянието  $\theta_x$ , определяме периода и честота по формулите:

$$T = \theta_x \cdot C_x, s; \quad f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\theta_x \cdot C_x}, Hz \quad (17.3)$$





Фиг. 17.21

Попълваме получените резултати в таблица 17.2.

Таблица 17.2

$N\theta$	$\theta x$	$C_x$	$T$	$f$
	деления	ms/деление	s	Hz

При цифровите осцилоскопи има възможност за автоматично измерване на честота на синусоида.

3. По постановката от фиг.17.19 да се измери фазовият ъгъл между напрежение и ток при различен характер на товара.

**Контролни въпроси**

1. За какво се използва осцилоскопът?
2. Как се измерва максимална стойност на напрежение с осцилоскоп?
3. Как се измерва честота на периодичен сигнал с осцилоскоп?
5. Как се измерва фазова разлика между два периодични сигнала с осцилоскоп?

## СЕМИНАРНИ УПРАЖНЕНИЯ И ЗАДАЧИ

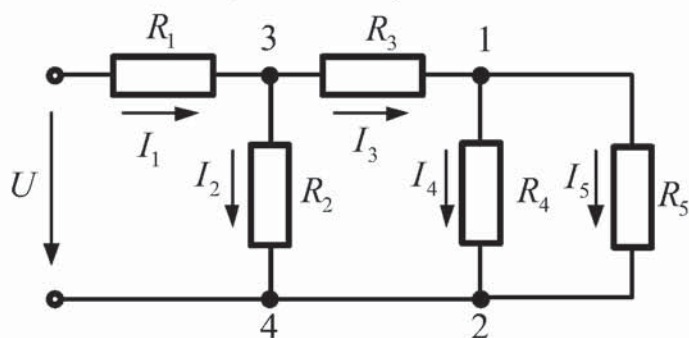
### СЕМИНАРНО УПРАЖНЕНИЕ №1

#### АНАЛИЗ НА ВЕРИГИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛНО, ПАРАЛЕЛНО И СМЕСЕНО СВЪРЗВАНЕ НА СЪПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ПОСТОЯНЕН ТОК

**Зад.1.** Дадена е електрическа верига (Фиг.С1) параметри:  $R_1 = 12,5\Omega$ ;  $R_2 = 15\Omega$ ;  $R_3 = 13\Omega$ ;  $R_4 = 6\Omega$ ;  $R_5 = 3\Omega$ . Да се определят:

а. токовете във всички клонове на веригата, при входно захранване  $U = 200V$ ;

б. консумираната активна мощност от веригата  $P$ .

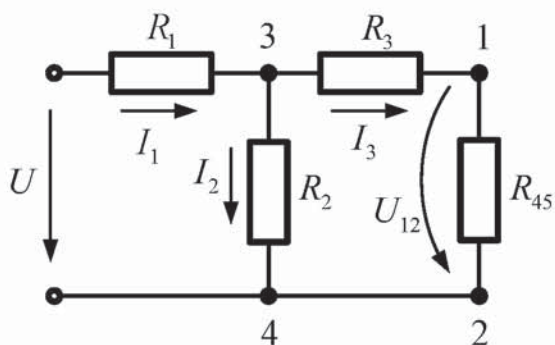


Фиг.С 1

#### Решение:

1. Необходимо е да се определи еквивалентното съпротивление  $R_e$  на цялата верига. Започва се разглеждането на веригата отзад напред:

$$R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{6 \cdot 3}{6 + 3} = \frac{18}{9} = 2\Omega$$



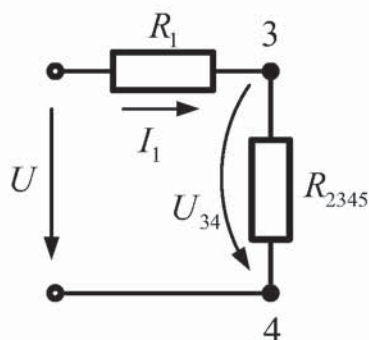
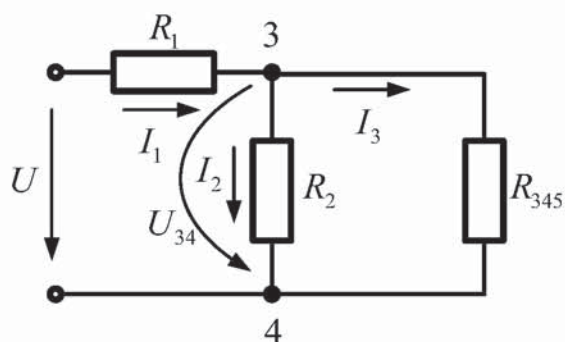
Забележка: При еквивалентните преобразувания е необходимо да се знае следното:

✓ В участъците, където схемата не е променяна, всички токове и напрежения се запазват (в случая токове  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$ );

✓ В участъците, където е направена промяна, изходните токове се губят (в случая токове  $I_4$  и  $I_5$ ).

$$R_{345} = R_3 + R_{45} = 13 + 2 = 15\Omega$$





$$R_{2345} = \frac{R_2 \cdot R_{345}}{R_2 + R_{345}} = \frac{15 \cdot 15}{15 + 15} = 7,5 \Omega$$

$$R_{12345} = R_1 + R_{2345} = 12,5 + 7,5 = 20 \Omega$$

2. Определят се съответните токове, като анализът се започва отпред назад.

$$I_1 = \frac{U}{R_{12345}} = \frac{200}{20} = 10 \text{ A}$$

$$U_{34} = I_1 \cdot R_{2345} = 10 \cdot 7,5 = 75 \text{ V}$$

$$I_2 = \frac{U_{34}}{R_2} = \frac{75}{15} = 5 \text{ A}$$

Токът  $I_3$  може да се определи като за възел 3 се приложи първи закон на Кирхоф.

$$I_1 = I_2 + I_3 \Rightarrow I_3 = I_1 - I_2 = 10 - 5 = 5 \text{ A}$$

$$U_{12} = I_3 \cdot R_{45} = 5 \cdot 2 = 10 \text{ V}$$

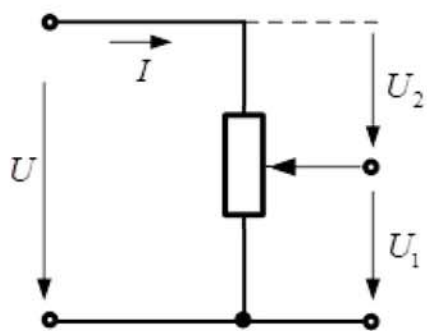
$$I_4 = \frac{U_{12}}{R_4} = \frac{10}{6} = 1,67 \text{ A}$$

$$I_5 = \frac{U_{12}}{R_5} = \frac{10}{3} = 3,33 \text{ A}$$

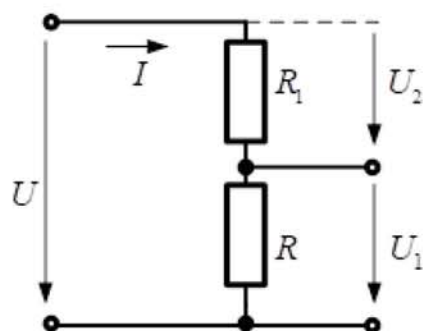
3. Определяне на консумираната активна мощност:

$$P = U \cdot I_1 = 200 \cdot 10 = 2000 \text{ W} = 2 \text{ kW}$$

**Зад.2.** На схемата на Фиг.С.2 е показан реостат. Пълното съпротивление на целия реостат е  $R_0 = 450 \Omega$ , а съпротивлението между крайния извод и подвижния контакт е  $R = 150 \Omega$ . Напрежението, което е приложено към целия реостат е  $U = 300 \text{ V}$ . Да се определят напреженията  $U_1$  и  $U_2$  между подвижния контакт и всеки от крайните изводи на реостата.



Фиг.С2



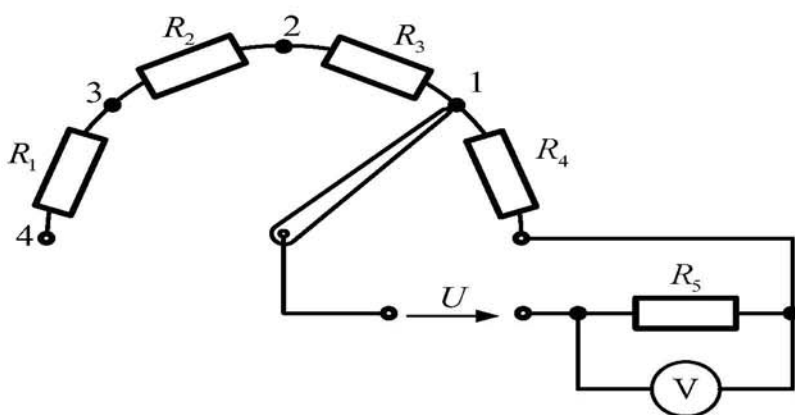
Фиг.С3

\* Разглеждат реостата като две последователно свързани съпротивления, чиято обща стойност е  $R_o = 450\Omega$ , а част от нея е  $R = 150\Omega$ .  $R_1 + R = 450\Omega$

Фиг.С3

Отговор:  $U_1 = 100,5V$ ;  $U_2 = 199,5V$

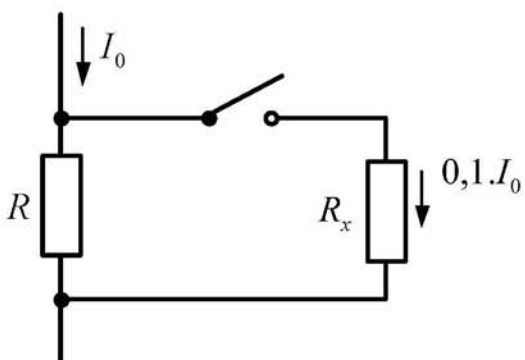
**Зад.3.** Дадена е схемата от Фиг.С4. Всички съпротивления са в омосе и имат стойности съответно:  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10\Omega$ , а съпротивлението  $R_5 = 20\Omega$ .



Как ще се изменя напрежението върху съпротивление  $R_5$  (показание на волтметра при различните превключвания) при условие, че захранващото напрежение е  $U = 200V$ .

Фиг.С4

Отговор: 133,3; 100; 80; 66,67V



Фиг.С5

**Зад.4.** Дадена е схемата, която е показана на Фиг.С5. Стойността на съпротивлението  $R = 5\Omega$ , а токът, протичащ през него има стойност  $I_o$ . Какво съпротивление  $R_x$  трябва да се включи паралелно на него така, че през него да протича ток  $0,1I_o$ .

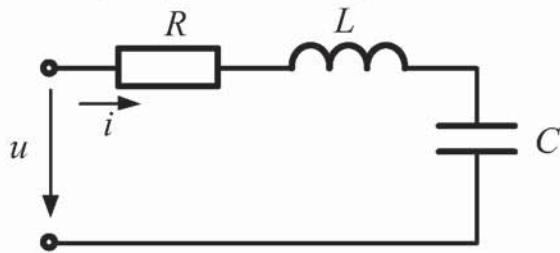
Отговор:  $R_x = 45\Omega$



**АНАЛИЗ НА ПРОСТИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕРИГИ ПРИ СИНУСОИДАЛНО ЗАХРАНВАНЕ. ЗАКОН НА ОМ. ИМПЕДАНС, МАКСИМАЛНА, ЕФЕКТИВНА И МОМЕНТНА СТОЙНОСТ НА СИНУСОИДАЛНИТЕ ВЕЛИЧИНИ. НАЧАЛНИ ФАЗИ И ФАЗОВА РАЗЛИКА.**

**Зад.1.** За веригата на *Фиг.С1* е известно:  $R = 8\Omega$ ;  $L = 0,3\text{H}$ ;  $C = 1\mu\text{F}$ . През елементите на веригата протича синусоидален ток с моментна стойност  $i = 1,2 \sin(314.t + 26^\circ)\text{A}$ . Да се определят:

- момента стойност на напрежението на входа на веригата;
- консумираните от веригата активна и пълна мощност.



**Фиг.С1**

**Решение:**

1. Ъгловата честота е  $314\text{s}^{-1}$ . Следователно реактивните съпротивления ще имат следните стойности:

$$X_L = \omega L = 314 \cdot 0,3 = 94,2\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 3184,7\Omega$$

2. Реактивното съпротивление на веригата ще има стойност

$$X = X_L - X_C = 94,2 - 3184,7 = -3090,5\Omega$$

3. Пълното съпротивление(импедансът)  $z$  ще има стойност:

$$z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{8^2 + (-3090,5)^2} = 3091,51\Omega$$

4. Напрежението на входа на веригата ще има общия вид:  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ .

Необходимо е да бъдат определени  $U_m$  и началната фаза  $\psi_u$ .

$$U_m = I_m \cdot z = 1,2 \cdot 3090,51 = 3708,61\text{V}$$

5.  $I_m$  се взема от моментната стойност на тока, който е зададен в условието на задачата т.е.  $i = 1,2 \sin(314.t + 26^\circ)\text{A}$ . От този израз са известни  $I_m = 1,2\text{A}$  и  $\psi_u = 26^\circ$ . Фазовата разлика между тока и напрежението се дава с израза  $\varphi = \psi_u - \psi_i$ . Следователно:  $\psi_u = \varphi + \psi_i$

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{-3090,5}{8} = -89,85^\circ$$

$$\psi_u = \varphi + \psi_i = -89,85^\circ + 26^\circ = -63,85^\circ$$

Следователно:

$$u = 3708,61 \sin(314t - 63,85^\circ)\text{V}$$

6. Ефективните стойности на тока и напрежението ще бъдат:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{3708,61}{\sqrt{2}} = 2622,38V$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{1,2}{\sqrt{2}} = 0,85A$$

$$\varphi = -89,85^\circ$$

Консумираната пълна мощност от веригата е:

$$S = U \cdot I = 2622,38 \cdot 0,85 = 2229,02VA$$

Консумираната активна мощност от веригата е:

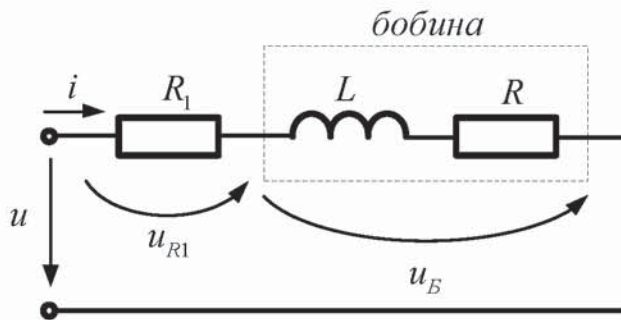
$$P = U \cdot I \cos \varphi = 2622,38 \cdot 0,85 \cdot \cos(-89,85^\circ)$$

$$P = 5,83W$$

**Зад.2.** Последователно на съпротивление  $R_1 = 20\Omega$  е свързана бобина с параметри  $R = 6,7\Omega$ ;  $L = 43,6mH$  (Фиг.С2). Да се изчислят тока и напрежението върху съпротивлението  $R_1$  и бобината, ако приложеното

напрежение е с ефективна стойност  $U = 220V$  и  $f = 50Hz$ . Да се определят активната и реактивната мощности консумирани от веригата.

Отговор:



Фиг.С2

$$I = 7,33A; \text{ фазовата разлика } \varphi = 27,15^\circ \quad U_{R_1} = 146,6V; U_B = 111,8V$$

$$P = 1434,6W; Q = 736 \text{ var}$$

**Зад.3.** Верига от последователно съединени резистор със съпротивление  $R = 3\Omega$ , индуктивност  $L = 8,4mH$  и капацитет  $15\mu F$  е захранена от източник на синусоидално напрежение с ефективна стойност  $U = 20V$  и  $f = 50Hz$ . Да се определят ефективните стойности на тока във веригата и напрежението върху всеки елемент, фазовата разлика и консумираната активна мощност.

Отговор:  $I = 4A$ ;  $\varphi = 53,13^\circ$ ;  $U_R = 12V$

$$U_L = 101V; U_C = 85V; P = 48W$$

**Зад.4.** Бобина е включена към променливо напрежение с ефективна стойност  $U = 150V$ . Токът, който протича през нея е  $I = 6A$ , а консумираната активна мощност  $P = 540W$ . Да се изчислят  $R$  и  $L$  на бобината, ако честотата на захранващото напрежение е  $f = 50Hz$ .

Отговор:  $R = 15\Omega$ ;  $L = 63,7mH$

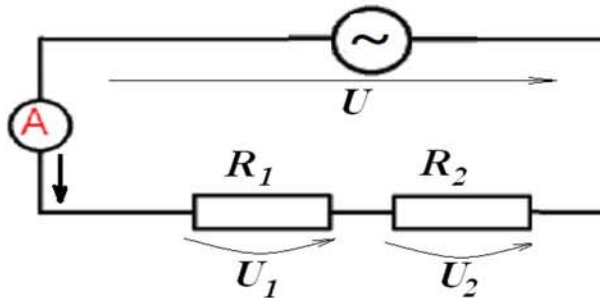
**Зад.5.** Електрически бойлер се захранва от електрически контакт с напрежение  $230V$  и честота  $50Hz$ . Активната (електрическа) мощност на бойлера е  $P = 3000W$ .



Да се определи токът  $I$  през електрическия бойлер и неговото активно (електрическо) съпротивление  $R$  по време на работа.

Отговор:  $I=13,04A$ ;  $R=17,63\Omega$

**Зад.6.** Електрически консуматор (проточен бойлер) с мощности по фабрична табела  $P_2=6kW$  (мощност при  $U=230V$ ) е захранен чрез кабел(мостов кабел) към променливо напрежение  $U=230V$  с честота  $50Hz$ . Да се изчисли големината на тока във веригата, ако съпротивление на проводника на кабела е  $R_1=0,7\Omega$ (общо съпротивление на фазовия и нулевия проводник).



Да се определи съпротивлението на електрическия консуматор (проточен бойлер)  $R_2$ . Да се определи токът  $I$  през електрическия бойлер отчитайки съпротивлението на кабела  $R_1=0,7\Omega$ . Да се определи напрежението върху консуматора по време на работа  $U_2$  в конкретния случай. Да се определи действителната мощност на консуматора  $P_{конс}$  по време на работа и топлинните загуби  $P_{кабел}$  в кабела (електрическа енергия преобразувана в топлина).

Отговор:  $R_2=8,82\Omega$ ;  $I=24,17A$ ;  $U_2=213,1V$ ;  $P_{конс}=5149,8W$ ;  $P_{кабел}=408,9W$

СЕМИНАРНО УПРАЖНЕНИЕ №3

ПРИМЕРНИ РЕШЕНИ ЗАДАЧИ ПРИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕРИГИ  
СЪС СИНУСОИДАЛНО ЗАХРАНВАНЕ

**Зад.1.** Даден е синусоидален източник на е.д.н. със моментна стойност  $e=200\sqrt{2}\sin(2000t-30^\circ)$ , V. Да се определят:

- а) Максималната стойност  $E_m$ ; б) ефективната стойност  $E$ ;  
в) кръговата честота  $\omega$ ; г) честотата  $f$ ; д) началната фаза  $\Psi_e$ .

Решение:

Моментната стойност на запис на синусоидални електрически величини има следния формат:  $e = E_m \sin(\omega \cdot t + \Psi_e)$ , където

$e$  - моментна стойност на синусоидалната величина;

$E_m$  - максимална стойност (амплитуда);

$\omega$  - ъглова честота,  $S^{-1}$

$\Psi_e$  - начална фаза,  $^\circ$

Следователно,

а) Максималната стойност  $E_m = 200\sqrt{2} = 282,84$  V;

б) Ефективната стойност  $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{200\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = 200$ , V (Ефективните

стойности на синусоидалните величини са винаги  $\sqrt{2}$  пъти по-малки от максималните);

в) Кръговата (ъгловата) честота е  $\omega = 2000$ ,  $s^{-1}$

г) Честотата  $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{2000}{2 \cdot 3,14} = 318,31$  Hz, понеже  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

д) Началната фаза  $\Psi_e = -30^\circ$

**Зад.2.** Да се определи фазовата разлика между тока и напрежението:

а)  $\varphi = ?$  ако са дадени моментните стойности на тока и напрежението:

$i = 5\sin(1500t - 25^\circ)$ , A и  $u = 155\sin(1500t + 42^\circ)$ , V.

б)  $\varphi = ?$  за клон от електрическа верига, който съдържа последователно свързани резистор, бобина и кондензатор със следните стойности на съпротивленията:

$$R = 20 \Omega$$

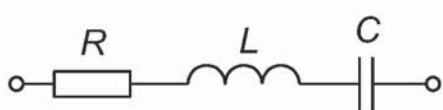
$$X_L = 10 \Omega$$

$$X_C = 20 \Omega$$

Решение:

а) Фазовата разлика по дефиниция е разлика между началните фази на напрежението и тока, следователно:  $\varphi = \Psi_u - \Psi_i = 42 - (-25) = +67^\circ$





б) За клон съдържащ последователно свързани резистор, бобина и кондензатор, фазовата разлика се определя чрез формулата:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right) = \arctg\left(\frac{10 - 20}{20}\right) = \arctg\left(\frac{-10}{20}\right) = \arctg(-0,5) = -26,57^\circ$$

$$10 \rightarrow \boxed{-} \rightarrow 20 \rightarrow \boxed{=} \rightarrow -10 \rightarrow \boxed{\begin{matrix} \bullet \\ - \\ \bullet \end{matrix}} \rightarrow 20 \rightarrow \boxed{=} \rightarrow -0,5 \rightarrow \boxed{2ndF} \rightarrow \boxed{\tan^{\tan^{-1}}} \rightarrow -26,57^\circ$$

**Зад.3.** Ако ефективната стойност на синусоидален ток е  $I = 3\text{A}$ , а честотата на захранващия източник е  $f = 60\text{Hz}$ , да се запише израза за моментната стойност на тока при начална фаза  $\psi_i = +33,50^\circ$

Решение:

- Пресмята се ъгловата честота:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 60 = 376,99 \text{ s}^{-1}$ ;

- Изчислява се максималната стойност (амплитудата) на тока:

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I = \sqrt{2} \cdot 3 = 4,24 \text{ A}$$

- Премахва се към моментна стойност на запис на тока:

$$i = I_m \sin(\omega \cdot t + \Psi_i) = 4,24 \sin(376,99 \cdot t + 33,50^\circ) \text{ A}$$

**Зад.4.** Ако са дадени честотата  $f = 110 \text{ Hz}$ , индуктивност на бобината  $L = 30 \text{ mH}$  и капацитет на кондензатора  $C = 300 \text{ }\mu\text{F}$ , да се определят техните съпротивления  $X_L = ?$  и  $X_C = ?$

Решение:

- Пресмята се ъгловата честота:  $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 110 = 691,15 \text{ s}^{-1}$

- Пресмята се съпротивлението на бобината:

$$X_L = \omega \cdot L = 691,15 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 20,73 \text{ }\Omega$$

- Пресмята се съпротивлението на кондензатора:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{691,15 \cdot 300 \cdot 10^{-6}} = 4,82 \text{ }\Omega$$

**Зад.5.** За даден клон от електрическа верига да са дадени следните параметри:  $R = 5\text{ }\Omega$ ,  $X_L = 10\text{ }\Omega$  и  $X_C = 15\text{ }\Omega$ .



а) Определете стойността на пълното съпротивление на клона  $z = ?$

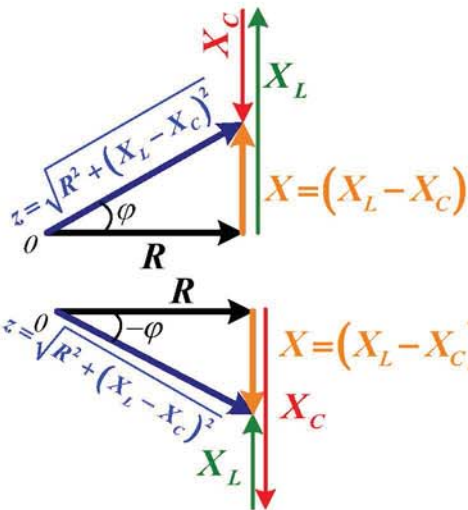
б) Начертайте триъгълника на съпротивленията за конкретния случай;

Решение:

а) Пълното съпротивление (импеданса) на клона ще бъде:

$$z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{5^2 + (-5)^2} = 7,07 \text{ }\Omega$$

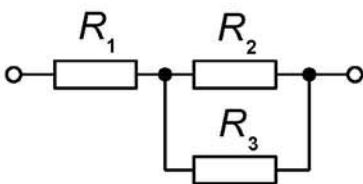
б) Триъгълник на съпротивленията:



Когато  $X_L > X_C$ , веригата има индуктивен характер и фазовата разлика е положителна.

Когато  $X_C > X_L$ , веригата има капацитивен характер и фазовата разлика е отрицателна.

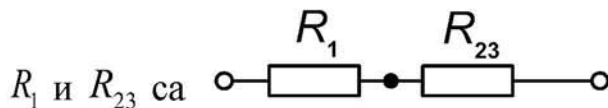
**Зад.6.** Да се изчисли еквивалентното съпротивление  $R_e = ?$  за дадената електрическа верига, ако  $R_1 = 5\Omega$ ;  $R_2 = 10\Omega$ ;  $R_3 = 15\Omega$



Решение:

Резистори  $R_2$  и  $R_3$  са свързани в паралел. Прилагаме съкратената формула за намиране на еквивалентното им съпротивление:

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{10 \cdot 15}{10 + 15} = 6 \Omega$$



$R_1$  и  $R_{23}$  са свързани последователно.

Окончателно за еквивалентното съпротивление на трите резистора ще се получи:

$$R_e = R_1 + R_{23} = 5 + 6 = 11 \Omega$$



## СЕМИНАРНО УПРАЖНЕНИЕ №4

### ПРИЛОЖЕНИЕ НА КОМПЛЕКСНИТЕ ЧИСЛА ЗА ЗАПИС НА СИНУСОИДАЛНИ ФУНКЦИИ, АКТИВНИ И РЕАКТИВНИ СЪПРОТИВЛЕНИЯ. КОМПЛЕКСНИ СЪПРОТИВЛЕНИЯ. ОСНОВНИ ЗАКОНИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ВЕРИГИ В КОМПЛЕКСНА ФОРМА

*Функционални възможности на научен калкулатор с приложения и примери за работа с комплексни числа*



В настоящото ръководство е описана работата с калкулатор CITIZEN SR-260N. При други марки и модели калкулатори действията са аналогични. Използвани са следните означения:

$\boxed{\phantom{0}}$  - въвеждане на число;

$\boxed{\phantom{0}}$  - функционален бутон, знак за аритметично действие;

**1. Работа с паметта на калкулатора(не е приложимо в комплексен режим)**

$\boxed{X \rightarrow M}$  - запазва съдържанието на дисплея в паметта;

$\boxed{RM}$  - показва на дисплея съдържанието на паметта;

$\boxed{M+}$  - събира числото на дисплея с това в паметта;

$\boxed{+/-}$  - променя знака на числото, което е в

момента на дисплея;

*Пример:*  $(3 \cdot 5) + (2 \cdot 10) = 15 + 20 = 35$

$3 \boxed{]} \rightarrow \boxed{X} \rightarrow 5 \boxed{]} \rightarrow \boxed{=} \rightarrow \boxed{M+} \rightarrow 2 \boxed{]} \rightarrow \boxed{X} \rightarrow 10 \boxed{]} \rightarrow \boxed{=} \rightarrow \boxed{M+} \rightarrow \boxed{RM} \rightarrow 35$

- Наличието на число в паметта на калкулатора се индикира чрез буквата „M“ в най-лявата част на дисплея

- За да се нулира паметта се процедира по следния начин:  $0 \boxed{]} \rightarrow \boxed{X \rightarrow M}$

**2. Приоритет на действията:** първо се изпълняват действията **умножение** и **деление**, след което **събиране** и **изваждане**.

**3. Представяне на десетично число в експоненциална форма**

$5000 = 5 \cdot 10^3$        $5 \boxed{]} \rightarrow \boxed{EXP} \rightarrow 3 \boxed{]}$

След, като се въведе числото в експоненциален вид, то може да участва в пресмятания, например:

$$5 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^{-4} = 4999,9994 = 4,99 \cdot 10^3$$

5] → [EXP] → 3] → [=] → 6] → [EXP] → 4] → [+/-] → [=] → 4999,9994 → [F ↔ E] →  
→ 4,99..<sup>03</sup>

Бутонът [F ↔ E] служи за представяне на резултатът от изчисленията в експоненциален вид (по 10 на определена степен).

Полученият резултат 4,99..<sup>03</sup> означава  $4,99 \cdot 10^3$

$$\frac{1,5}{2 \cdot 10^3} = 0,00075 = 7,5 \cdot 10^{-4}$$

1,5] → [÷] → 2] → [EXP] → 3] → [=] → 0,00075 → [F ↔ E] →  $7,5 \cdot 10^{-4}$

**4. Пресмятане на тригонометрични функции с калкулатор.** Бутонът

[DRG] служи за промяна на мерната единица за отчитане на ъглите. Бутонът

[DRG] се натиска няколкократно, докато на дисплея в горния десен ъгъл се появи индикацията **DEG** (отчитане в градуси (*degree*)).

**Пример:**  $\sin(60^\circ) = 0,866$       60] → [Sin] → 2] → [EXP] → 0,866

Действията са аналогични при другите тригонометрични функции – *cos*, *tg*. Ако се търси котангенсът от даден ъгъл, се използва връзката между тангенс и котангенс:

$$\cotg(\alpha) = \frac{1}{\tg(\alpha)}$$

Калкулаторът може да пресмята и големината на ъгъла, ако имаме пресметнатата стойност на някоя от неговите тригонометрични функции:

**Пример:**  $\sin(\alpha) = 0,866$ ,  $\alpha = ?$        $\alpha = \arcsin(\sin(\alpha)) = \arcsin(0,866) = 60^\circ$

0,866] → [2ndF] → [Sin] → 60

*Примери на други действия:*

$3^2 = 9$ 3] → [x <sup>2</sup> ] → 9]	$3^4 = 81$ 3] → [x <sup>y</sup> ] → 4] → [=] → 81
$\frac{1}{5} = 0,2$ 5] → [2ndF] → [ $\frac{1}{x}$ ] → 0,2	$\sqrt[4]{81} = 3$ 81] → [2ndF] → [ $\frac{\sqrt{x}}{x^y}$ ] → 3
$\sqrt{9} = 3$ 9] → [√] → 3	$\ln(5) = 1,609$ 5] → [ln] → 1,609
$\sqrt[3]{8} = 2$ 8] → [2ndF] → [ $\sqrt[3]{x}$ ] → 2	$e^5 = 148,41$ 5] → [2ndF] → [ln] → 148,41



Бутонът **2ndF** (или **Shift** при някои модели) активира втората функция на съответния бутон за извършване на дадена математическа операция. Втората функция на всеки бутон е написана над него.

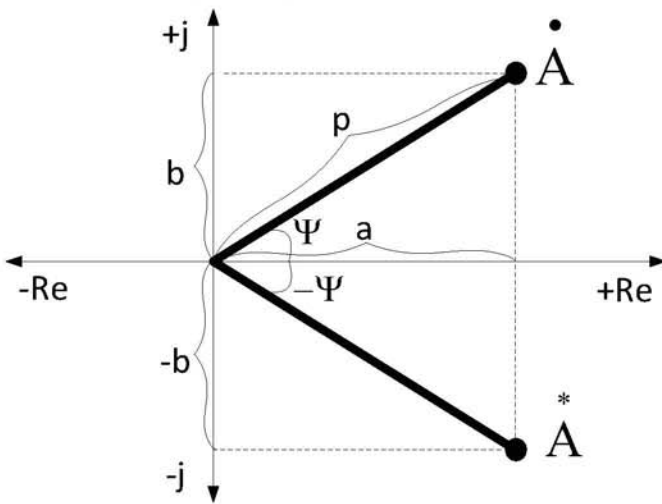


**5. Работа със скобите на калкулатора** – При извършване на сложни алгебрични действия в помощ могат да се използват скобите на калкулатора.

**Пример:**  $(5 + 3) \cdot 6 + (3 - 5) \cdot 8 = 48 - 16 = 32$

$( \rightarrow 5 \rightarrow + \rightarrow 3 \rightarrow ) \rightarrow \times \rightarrow 6 \rightarrow + \rightarrow ( \rightarrow 3 \rightarrow - \rightarrow 5 \rightarrow ) \rightarrow \rightarrow \times \rightarrow 8 \rightarrow = \rightarrow 32$

**6. Работа с комплексни числа.**



Комплексните числа се бележат с точка отгоре и имат три основни форми на запис:

**6.1. Алгебрична форма:**

$\dot{A} = (a + j.b)$ , където:

$a$  - реална част на комплексното число. Представява проекцията на числото върху реалната ос.

$b$  - имагинерна част на комплексното число. Представява проекцията на числото върху имагинерната ос.

$j$  - комплексен оператор. Той има следните свойства:  $j = \sqrt{-1} = e^{j\frac{\pi}{2}}$ . Още

$$\frac{1}{j} = -j \quad \text{и} \quad j^2 = -1$$

**6.2. Експоненциална форма:**

$$\dot{A} = p \cdot e^{j\Psi} = p \angle \Psi$$

$p$  - модул на комплексното число. Представява дължината на радиус-вектора на комплексното число (хипотенузата на образувания правоъгълен триъгълник).

$\Psi$  - аргумент на комплексното число. Ъгълът заключен между радиус вектора и положителната част на абсисната ос. Ако Ъгълът се отчита обратно на часовниковата стрелка е положителен, а ако се отчита по часовниковата стрелка е отрицателен.

В Електротехниката е прието множителят  $e^j$  да се заменя със ъгълче „ $\angle$ “, в което се вписва аргумента. Целта на тази субституция е само опростяване на записа.

Връзката между модула, аргумента, реалната и имагинерната част е следната:

$$a = p \cdot \cos \Psi; \quad b = p \cdot \sin \Psi; \quad p = \sqrt{a^2 + b^2}; \quad \Psi = \arctg\left(\frac{b}{a}\right)$$

**ВАЖНО!** Модулът на едно комплексно число е винаги положително число

**6.3. Тригонометрична форма на комплексните числа:**

$$\dot{A} = p \cdot \cos \Psi + j \cdot p \cdot \sin \Psi$$

**6.4. Ръчно пресмятане на действия с комплексни числа:**

**6.4.1. Умножение и деление.**

Ръчно могат да се извършват действията умножение и деление на комплексни числа, но числата трябва да бъдат в експоненциална форма:

- Умножение: “Модулите се умножават, а аргументите се събират”

$$A_1 \angle \Psi_1 \cdot A_2 \angle \Psi_2 = A_1 \cdot A_2 \angle \Psi_1 + \Psi_2$$

- Деление: “Модулите се делят, а аргументите се изваждат”

$$\frac{A_1 \angle \Psi_1}{A_2 \angle \Psi_2} = \frac{A_1}{A_2} \angle \Psi_1 - \Psi_2$$

Примери:  $45 \angle 30^\circ \cdot 3 \angle -25^\circ = 45 \cdot 3 \angle 30^\circ + (-25^\circ) = 135 \angle +5^\circ$

$$\frac{45 \angle 30^\circ}{3 \angle -25^\circ} = \frac{45}{3} \cdot \angle 30^\circ - (-25^\circ) = 15 \angle +55^\circ$$

**6.4.2. Събиране и изваждане.**

Действията събиране и изваждане на комплексни числа, могат да се извършват ръчно само в алгебрична форма:

- Събиране: “Събират се реална с реална част и имагинерна с имагинерна част”

$$(a_1 + j \cdot b_1) + (a_2 + j \cdot b_2) = (a_1 + a_2) + j \cdot (b_1 + b_2)$$

- Изваждане: “Изваждат се реална с реална част и имагинерна с имагинерна част”

$$(a_1 + j \cdot b_1) - (a_2 + j \cdot b_2) = (a_1 - a_2) + j \cdot (b_1 - b_2)$$

- Примери:

$$(5 + j \cdot 10) + (-3 - j \cdot 20) = \{5 + (-3)\} + j \cdot \{10 + (-20)\} = (2 - j10)$$

$$(5 + j \cdot 10) - (-3 - j \cdot 20) = \{5 - (-3)\} + j \cdot \{10 - (-20)\} = (8 + j30)$$

**6.5. Пресмятане на действия с комплексни числа с помощта на калкулатор:**

За да можете да пресмятате действия с калкулатор, той трябва да притежава научни функции. В общият случай трябва да има следните бутони:

$$\boxed{2ndF} \text{ или } \boxed{\text{Shift}}, \overset{CPLX}{\boxed{00 \rightarrow 0}}, \overset{R \rightarrow P}{\boxed{a}}, \overset{P \rightarrow R}{\boxed{b}},$$

**6.5.1. Влизане в комплексен режим на пресмятане** – За да пресмятате с калкулатора действия с комплексни числа, първо трябва да влезете в „комплексен режим“:



$$\boxed{2\text{ndF}} \rightarrow \boxed{00 \rightarrow 0} \xrightarrow{\text{CPLX}} \boxed{\text{DEG}} \xrightarrow{\text{CPLX}} \boxed{0.}$$

Друго важно нещо е през цялото време, мерната единица за ъглите да бъде „DEG“

6.5.2. Преобразуване на комплексно число от алгебрична в експоненциална форма  $(a_1 + j \cdot b_1) = A \angle \Psi$ :

$$a_1 \rightarrow \boxed{a} \rightarrow b_1 \rightarrow \boxed{b} \rightarrow \boxed{2\text{ndF}} \xrightarrow{R \rightarrow P} \boxed{a} \rightarrow A \rightarrow \boxed{b} \rightarrow \Psi$$

Пример:  $(3 + j \cdot 10) = 10,44 \angle 73,3^\circ$

$$3 \rightarrow \boxed{a} \rightarrow 10 \rightarrow \boxed{b} \rightarrow \boxed{2\text{ndF}} \xrightarrow{R \rightarrow P} \boxed{a} \rightarrow 10,44 \rightarrow \boxed{b} \rightarrow 73,3^\circ$$

$$(4 - j \cdot 15) = 15,52 \angle -75,1^\circ$$

$$4 \rightarrow \boxed{a} \rightarrow 15 \rightarrow \boxed{+/-} \rightarrow \boxed{b} \rightarrow \boxed{2\text{ndF}} \xrightarrow{R \rightarrow P} \boxed{a} \rightarrow 15,52 \rightarrow \boxed{b} \rightarrow -75,1^\circ$$

6.5.3. Преобразуване на комплексно число от експоненциална в алгебрична форма  $A \angle \Psi = (a_1 + j \cdot b_1)$ :

$$A \rightarrow \boxed{a} \rightarrow \Psi \rightarrow \boxed{b} \rightarrow \boxed{2\text{ndF}} \xrightarrow{P \rightarrow R} \boxed{b} \rightarrow a_1 \rightarrow \boxed{b} \rightarrow b_1$$

Пример:  $10,44 \angle 73,3^\circ = (3 + j \cdot 10)$

$$10,44 \rightarrow \boxed{a} \rightarrow 73,3 \rightarrow \boxed{b} \rightarrow \boxed{2\text{ndF}} \xrightarrow{P \rightarrow R} \boxed{b} \rightarrow 3 \rightarrow \boxed{b} \rightarrow 10$$

$$15,52 \angle -75,1^\circ = (4 - j \cdot 15)$$

$$15,52 \rightarrow \boxed{a} \rightarrow 75,1 \rightarrow \boxed{+/-} \rightarrow \boxed{b} \rightarrow \boxed{2\text{ndF}} \xrightarrow{P \rightarrow R} \boxed{b} \rightarrow 4 \rightarrow \boxed{b} \rightarrow -15$$

6.5.4. Извършване на аритметични действия с комплексни числа с помощта на калкулатор: Калкулаторът може да извършва действията събиране, изваждане, умножение и деление на комплексни числа единствено в алгебрична форма.

$$(a_1 + j \cdot b_1) \left( \begin{array}{c} \boxed{+} \\ \boxed{-} \\ \boxed{\times} \\ \boxed{\div} \end{array} \right) (a_2 + j \cdot b_2) = (a_3 + j \cdot b_3) = A \angle \Psi$$

$$a_1] \rightarrow [a] \rightarrow b_1] \rightarrow [b] \rightarrow \left[ \begin{array}{c} + \\ - \\ \times \\ \div \\ \cdot \\ - \\ \cdot \end{array} \right] \rightarrow a_2] \rightarrow [a] \rightarrow b_2] \rightarrow [b] \rightarrow [=] \rightarrow a_3] \rightarrow [b] \rightarrow b_3$$

$$\rightarrow [2ndf] \rightarrow [a] \xrightarrow{R \rightarrow P} A] \rightarrow [b] \rightarrow \Psi]$$

Примери:  $\frac{(5 - j \cdot 10)}{(10 + j \cdot 20)} = (-0,3 - j \cdot 0,4) = 0,5 \angle -126,87^\circ$

$$5] \rightarrow [a] \rightarrow 10] \rightarrow \left[ \begin{array}{c} + \\ - \\ \times \\ \div \end{array} \right] \rightarrow [b] \rightarrow \left[ \begin{array}{c} \cdot \\ - \\ \cdot \end{array} \right] \rightarrow 10] \rightarrow [a] \rightarrow 20] \rightarrow [b] \rightarrow [=] \rightarrow -0,3 \rightarrow [b] \rightarrow -0,4$$

$$\rightarrow [2ndf] \rightarrow [a] \xrightarrow{R \rightarrow P} 0,5] \rightarrow [b] \rightarrow -126,87^\circ]$$

Калкулаторът винаги помни последният резултат от изчисленията и с него може да се продължи да се пресмята:

$$(14,2 \angle 13,61^\circ) \cdot (-2 + j3) = (13,8 + j3,34) \cdot (-2 + j3) = (-37,63 + j34,72) = 51,2 \angle 137,3^\circ$$

$$14,2] \rightarrow [a] \rightarrow 13,61] \rightarrow [b] \rightarrow [2ndF] \xrightarrow{P \rightarrow R} [b] \rightarrow 13,80 \rightarrow [b] \rightarrow 3,34 \rightarrow [X] \rightarrow$$

$$\rightarrow 2] \rightarrow \left[ \begin{array}{c} + \\ - \\ \times \\ \div \end{array} \right] \rightarrow [a] \rightarrow 3] \rightarrow [b] \rightarrow [=] \rightarrow -37,63 \rightarrow [b] \rightarrow 34,72 \rightarrow$$

$$\rightarrow [2ndf] \rightarrow [a] \xrightarrow{R \rightarrow P} 51,2] \rightarrow [b] \rightarrow 137,3^\circ]$$

## 7. Табулация на калкулатора

### 7.1. Табулиране на калкулатора за работа с определена точност

Калкулаторът може предварително да се програмира за изчисляване с определена точност (до определен знак след десетичната запетая)

Пример: С точност до втория знак:

$$[2ndF] \rightarrow \left[ \begin{array}{c} TAB \\ F \rightarrow E \end{array} \right] \rightarrow [2] \rightarrow \left[ \begin{array}{c} DEG \\ 0.00 \end{array} \right]$$

На екрана се получава 0.00.

7.2. Програмиране на калкулатора за работа с максимална точност (по подразбиране), при условие, че предварително е била зададена конкретна точност:

$$[2ndF] \rightarrow \left[ \begin{array}{c} TAB \\ F \rightarrow E \end{array} \right] \rightarrow [.] \rightarrow \left[ \begin{array}{c} DEG \\ 0. \end{array} \right]$$

## 8. Функционални възможности на калкулатор CITIZEN SR-260N за работа с комплексни числа.

**A. Преминаване от алгебрична в експоненциална форма на комплексното число;**





Алгоритъмът за работа е следния: Необходимо е да се извършат операции с комплексните числа  $\dot{A}_1 = (a_1 + jb_1)$  и  $\dot{A}_2 = (a_2 + jb_2)$ . Комплексните числа е необходимо да бъдат в алгебрична форма.

получава се:

$$\begin{array}{l}
 a_1 \boxed{a} \quad b_1 \boxed{b} \quad \boxed{+} \quad a_2 \boxed{a} \quad b_2 \boxed{b} \quad \boxed{=} \rightarrow a \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \boxed{=} \rightarrow b \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \boxed{\times} \quad \text{запис } (a + jb) \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \boxed{\div}
 \end{array}$$

За да се получи резултата  $(a + jb)$  в експоненциална форма, т.е.  $p \angle \psi$ , е необходимо да се продължи по следния начин, но без да се правят други включвания (калкулаторът е запомнил резултата  $(a + jb)$ ).

получава се:

$$\boxed{2ndF} \nearrow \begin{cases} \boxed{R \rightarrow P} \\ \boxed{a} \rightarrow p \\ \boxed{b} \rightarrow \psi \end{cases} \\
 \text{запис: } p \angle \psi$$

Примери:

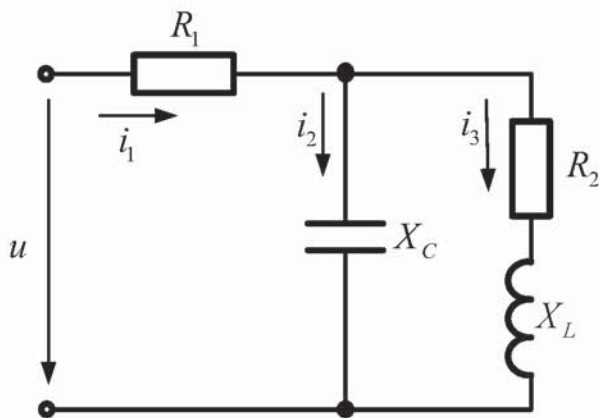
1)  $(2 + j4) \cdot (-5 + j8) = (-42 - j4) = 42,19 \angle -174,56^\circ$

2)  $\frac{(-18 - j20)}{(-2 + j3)} = (-1,85 + j7,23) = 7,46 \angle 104,32^\circ$

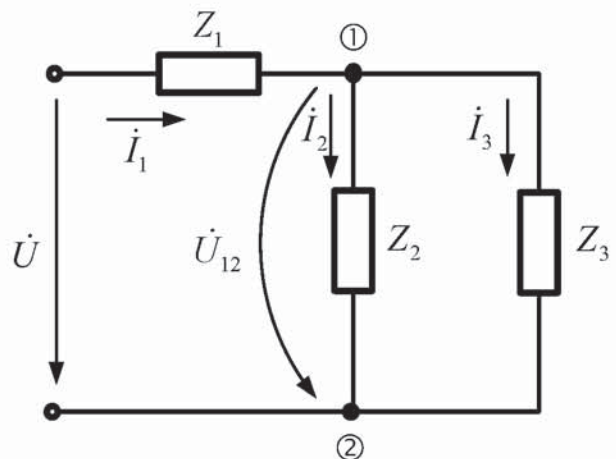
3)  $\frac{(1,2 - j0,4)}{(989 - j1004)} = (8 \cdot 10^{-4} + j4,07 \cdot 10^{-4}) = 8,98 \cdot 10^{-4} \angle 27^\circ$

**Зад.1.** За веригата, която е показана на Фиг.С2 е дадено:

$$R_1 = 6\Omega; R_2 = 6\Omega; X_L = \omega L = 4\Omega; X_C = \frac{1}{\omega C} = 4\Omega \text{ и } u = 120\sqrt{2} \sin(\omega t + 30^\circ) \text{ V.}$$



Фиг.С2



Фиг.С3

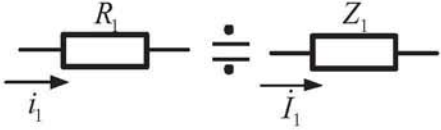
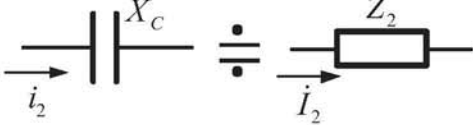
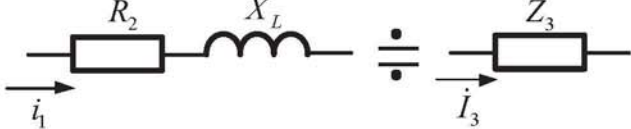


Да се определят моментните стойности на токовете и пълната, активната и реактивна мощност, консумирани от веригата.

**Решение:**

1. За веригата от Фиг.С2 се съставя заместваща схема (Фиг.С3), в която всички величини се заменят с техните комплексни образи.

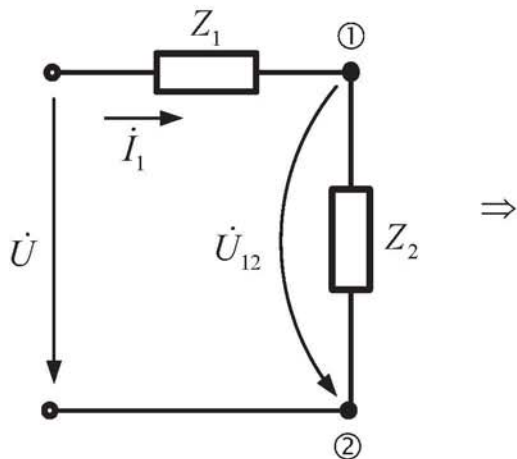
✓ комплексни съпротивления

	$Z_1 = R_1 = 6\Omega$
	$Z_2 = -jX_C = -j4\Omega$
	$Z_3 = R_2 + jX_L = (4 + j4)\Omega$

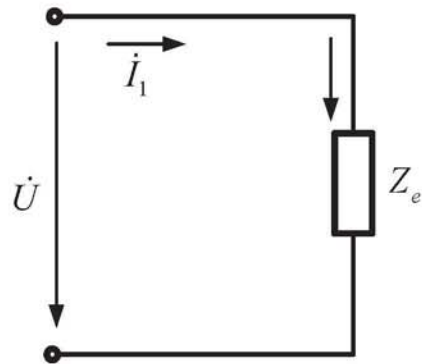
✓ определя се комплексната ефективна стойност на приложеното напрежение.

$$\dot{U} = \frac{120\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \angle 30^\circ = 120 \angle 30^\circ = (104 + j60)V$$

Забележка: Дели се на  $\sqrt{2}$ , за да се премине от максимална стойност  $U_m$  към ефективна  $U$ .



Фиг.С4



Фиг.С5

✓ еквивалентно съпротивление на  $Z_2$  и  $Z_3$  (Фиг. С4);

$$Z_{23} = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} = \frac{(-j4) \cdot (4 + j4)}{-j4 + 4 + j4} = (4 - j4) = 5,66 \angle -45^\circ \Omega$$

✓ еквивалентно съпротивление на цялата верига (Фиг. С5);

$$Z_e = Z_1 + Z_{23} = 6 + 4 - j4 = 10 - j4 = 10,77 \angle -21,8^\circ \Omega$$

✓ изчислява се ток  $\dot{I}_1$  по закона на Ом;

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{Z_e} = \frac{(104 + j60)}{(10 - j4)} = (6,7 + j8,76) = 11,15 \angle 51,78^\circ \text{ A}$$

✓ изчислява се напрежението  $\dot{U}_{12}$  между възлите ① и ②;

$$\dot{U}_{12} = \dot{I}_1 \cdot Z_{23} = (6,7 + j8,76) \cdot (4 - j4) = (61,84 + j8,24) = 62,39 \angle 7,59^\circ \text{ V}$$

✓ изчисляват се токовете  $\dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$  по закона на Ом;

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{12}}{Z_2} = \frac{(61,84 + j8,24)}{-j4} = (-2,06 + j15,46) = 15,6 \angle 97,59^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{12}}{Z_3} = \frac{(61,84 + j8,24)}{4 + j4} = (8,76 + j6,7) = 11,03 \angle -37,41^\circ \text{ A}$$

✓ моментни стойности на токовете;

$$\dot{I}_1 = 11,15 \angle 51,78^\circ \text{ A} \quad i_1 = 11,15\sqrt{2} \sin(\omega t + 51,78^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_2 = 15,6 \angle 97,59^\circ \text{ A} \quad i_2 = 15,6\sqrt{2} \sin(\omega t + 97,59^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_3 = 11,03 \angle -37,41^\circ \text{ A} \quad i_3 = 11,03\sqrt{2} \sin(\omega t - 37,41^\circ) \text{ A}$$

✓ определяне на мощностите.

$$\dot{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}_1^* = (104 + j60) \cdot (6,7 + j8,76)$$

$$\dot{S} = (1222,4 - j509,04) \text{ VA} = 1324,15 \angle -22,61^\circ \text{ VA}$$

Реалната част на  $\dot{S}$  е консумираната активна мощност, а имагинерната – реактивната.

$$P = 1222,4 \text{ W} \quad Q = -509,04 \text{ var}$$

Забележка:

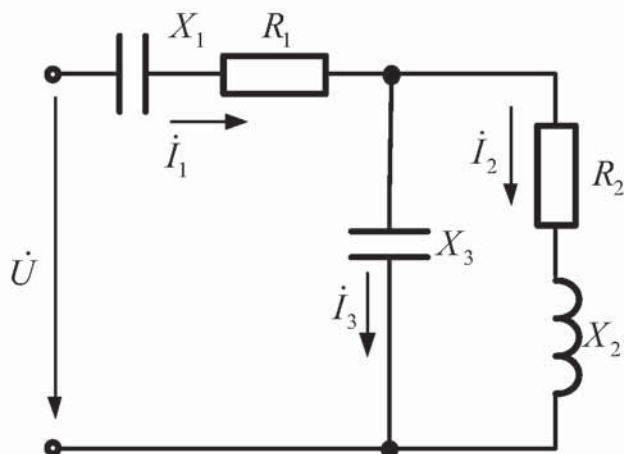
✓  $I_1^*$  е комплексно спрегнатия ток на  $\dot{I}_1$ . Получава се, като се смени знака пред имагинерната част.

$$\dot{I}_1 = (6,7 + j8,76) \text{ A} \Rightarrow \dot{I}_1^* = (6,7 - j8,76) \text{ A}$$

✓ Отрицателната реактивна мощност  $Q$  показва, че тя има капацитивен характер.

**Зад.2.** За схемата, която е показана на Фиг.С6 е известно:  
 $X_1 = 100\Omega$ ;  $X_2 = 50\Omega$ ;  $X_3 = 50\Omega$ ;  $R_1 = 75\Omega$ ;  $R_2 = 20\Omega$ . Да се определят:





Фиг. С6

$$\dot{I}_2 = 1,2 \angle -53,13^\circ \text{ A}; \quad \dot{I}_3 = 1,3 \angle 105,07^\circ \text{ A}$$

$$i_1 = 0,48\sqrt{2} \sin(\omega t + 36,87^\circ) \text{ A}$$

$$i_2 = 1,2\sqrt{2} \sin(\omega t - 53,13^\circ) \text{ A} \quad i_3 = 1,3\sqrt{2} \sin(\omega t + 105,07^\circ) \text{ A}$$

а. Комплексните ефективни стойности на токовете  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$  и запишат моментните стойности;

б. Консумираната активна мощност  $P$ .

Отговор:

$$P = 46,1 \text{ W}; \quad \dot{I}_1 = 0,48 \angle 36,87^\circ \text{ A}$$

**ПРИМЕРИ ЗА РАБОТА С КОМПЛЕКСНИ ЧИСЛА**

**Зад.1.** Да се изчислят и запишат комплексните ефективни стойности в алгебричен вид за следните синусоидални величини:

а)  $u=335,6\sqrt{2}\sin(150t-25^\circ)$ , V ;  $\Rightarrow \dot{U} = (a + jb) = ?$  V

б)  $i=10\sin(600t+30^\circ)$ , A  $\Rightarrow \dot{I} = (a + jb) = ?$  A

Решение:

а)  $u = 335,6\sqrt{2}\sin(150t - 25^\circ)$ , V

- От записа на моментната стойност се получава:

$U_m = 335,6\sqrt{2}$  V ;  $\omega = 150$  s<sup>-1</sup>;  $\Psi_u = -25^\circ$

- Премахва се към комплексна ефективна стойност на синусоидалната

величина:  $\dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \angle \Psi_u = \frac{335,6\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \angle -25^\circ = 335,6 \angle -25^\circ$  V

- Полученото напрежение се преобразува в алгебрична форма:

$\dot{U} = 335,6 \angle -25^\circ = (304,16 - j141,83)$

$335,6 \angle \rightarrow [a] \rightarrow 25 \angle \rightarrow \begin{matrix} + \\ / \\ - \end{matrix} \rightarrow [b] \rightarrow [2ndF] \rightarrow [b] \xrightarrow{P \rightarrow R} 304,16 \rightarrow [b] \rightarrow -141,83$

б)  $i = 10\sin(600t + 30^\circ)$ , A

- От записа на моментната стойност се получава:

$I_m = 10$  A ;  $\omega = 600$  s<sup>-1</sup>;  $\Psi_i = 30^\circ$

- Премахва се към комплексна ефективна стойност на синусоидалната

величина:  $\dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \angle \Psi_i = \frac{10}{\sqrt{2}} \angle 30^\circ = 7,07 \angle 30^\circ$  A

- Полученият ток се преобразува в алгебрична форма:

$\dot{I} = 7,07 \angle 30^\circ = (6,12 + j3,54)$  A

$7,07 \angle \rightarrow [a] \rightarrow 30 \angle \rightarrow [b] \rightarrow [2ndF] \rightarrow [b] \xrightarrow{P \rightarrow R} 6,12 \rightarrow [b] \rightarrow 3,54$

**Зад.2.** Дадени са комплексните ефективни стойности на тока и напрежението:

$\dot{I} = (+6 - 12j)$  A и  $\dot{U} = (-12 - 45j)$  V.

а) Изчислете комплексните ефективни стойности на тока и напрежението в експоненциална форма  $\Rightarrow \dot{U}(\dot{I}) = A \angle \psi^\circ = ?$

б) Ако ъгловата честота е  $250$  s<sup>-1</sup>, запишете моментните стойности на тока  $i$  и напрежението  $u$ .

Решение:

а) Преобразуваме в експоненциална форма:



- За тока:  $\dot{I} = (6 - j12) = 13,42 \angle -63,43^\circ$ , A

$$6 \rightarrow [a] \rightarrow 12 \rightarrow \left[ \begin{array}{c} + \\ \diagdown \\ - \end{array} \right] \rightarrow [b] \rightarrow [2ndF] \xrightarrow{R \rightarrow P} [a] \rightarrow 13,42 \rightarrow [b] \rightarrow -63,43$$

- За напрежението:  $\dot{U} = (-12 - j45) = 46,57 \angle -104,93^\circ$  V

$$12 \rightarrow \left[ \begin{array}{c} + \\ \diagdown \\ - \end{array} \right] \rightarrow [a] \rightarrow 45 \rightarrow \left[ \begin{array}{c} + \\ \diagdown \\ - \end{array} \right] \rightarrow [b] \rightarrow [2ndF] \xrightarrow{R \rightarrow P} [a] \rightarrow 46,57 \rightarrow [b] \rightarrow -104,93$$

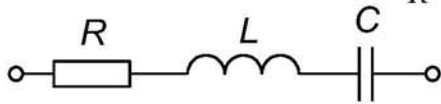
б) Записват се моментните стойности на тока и напрежението при ъгловата честота дадена по условие  $\omega = 250 \text{ s}^{-1}$ :

$$i = I_m \sin(\omega \cdot t + \Psi_i) = 13,42\sqrt{2} \sin(250 \cdot t - 63,43^\circ), \text{ A}$$

$$u = U_m \sin(\omega \cdot t + \Psi_u) = 46,57\sqrt{2} \sin(250 \cdot t - 104,93^\circ), \text{ V}$$

**Зад.3.** За даден клон от електрическа верига да са дадени следните параметри:

$$R = 5\Omega, \quad X_L = 10\Omega \text{ и } X_C = 15\Omega.$$



а) Определете стойността на комплексното съпротивление на клона  $Z = ?$

б) Определете стойността на пълното съпротивление на клона  $z = ?$

в) Начертайте триъгълника на съпротивленията за конкретния случай;

Решение:

а) Комплексното съпротивление на клона ще бъде:

$$Z = R + jX_L - jX_C = 5 + j10 - j15 = (5 - j5) \Omega$$

б) Пълното съпротивление (импеданса) на клона ще бъде:

$$z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{5^2 + (-5)^2} = 7,07 \Omega$$

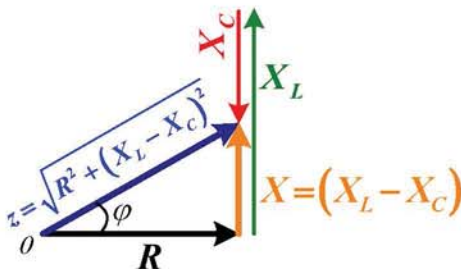
Друг начин за намиране на пълното съпротивление е от експоненциалната форма на комплексното съпротивление:

$$Z = R + jX = z \angle \varphi$$

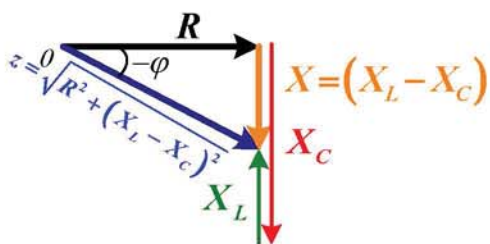
$$Z = (5 - j5) = 7,07 \angle -45^\circ \Omega$$

От тук следва, че  $z = \sqrt{R^2 + X^2} = 7,07 \Omega$ , а фазовата разлика е  $\varphi = -45^\circ$

в) Триъгълник на съпротивленията:

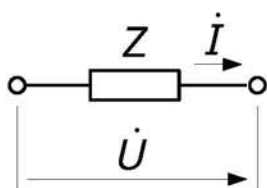


Когато  $X_L > X_C$ , веригата има индуктивен характер и фазовата разлика е положителна.



Когато  $X_C > X_L$ , веригата има капацитивен характер и фазовата разлика е отрицателна.

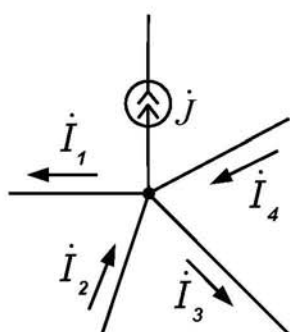
**Зад.4.** Да се изчисли комплексната ефективна стойност на тока  $\dot{I} = ?$  като се използва закона на Ом в комплексен вид при условие че са дадени следните входни данни  $Z = (2 - 5j) \Omega$  и  $\dot{U} = 500|_{+35^\circ} V$



Решение: Съгласно закона на Ом,

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{500|_{35^\circ}}{(2 - j5)} = \frac{(409,58 + j286,79)}{(2 - j5)} = (-21,2 + j90,4) = 92,85|_{103,2^\circ} A$$

**Зад.5.** Даден е следният възел от електрическа верига.



а) Съставете уравнение по I закон на Кирхоф за възела;

б) Определете комплексната ефективна стойност на тока

$\dot{I}_4 = ?$  ако е дадено:

$$\dot{I}_1 = (+1 - 2j)A; \quad \dot{I}_2 = (-15 + 4j)A;$$

$$\dot{I}_3 = (+5 - 6j)A; \quad \dot{J} = (+7 - 20j)A$$

Решение:

а) Първи закон на Кирхоф се отнася за възел от

електрическата верига и има следната формулировка: “Сумата от всички токове, протичащи през клоновете, имащи връзка с даден възел е равна на нула“.

Обикновено, влизащите към възела токове се взимат със знак „-“, а тези които излизат със знак „+“. **В уравненията по I закон на Кирхоф участват и клонове с идеални източници на ток, като техните токове се записват също от**

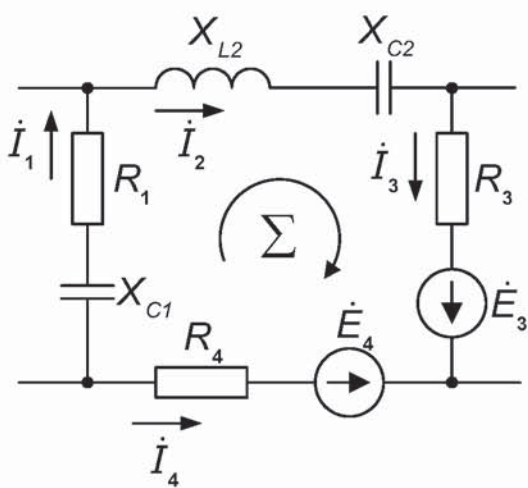
**лявата страна на уравнението:**  $\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = 0$

За конкретния случай: 
$$+\dot{I}_1 - \dot{I}_2 + \dot{I}_3 - \dot{I}_4 + \dot{J} = 0$$

б) Изразява се търсения ток от горното уравнение:

$$\dot{I}_4 = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{J} = (1 - j2) - (-15 + j4) + (5 - j6) + (7 - j20) =$$





$$\dot{I}_4 = (28 - j32) = 42,52 \angle -48,81^\circ \text{ A}$$

1) Даден е следният контур от електрическа верига за синусоидален ток.

а) Запишете уравнение по II Закон на Кирхоф за контура;

б) Определете комплексната ефективна стойност на тока  $\dot{I}_2 = ? \text{ A}$  ако са дадени следните параметри за контура:

$$R_1 = 5 \Omega; R_3 = 10 \Omega; R_4 = 15 \Omega; X_{L2} = 22 \Omega;$$

$$X_{C1} = 6 \Omega; X_{C2} = 10 \Omega; \dot{E}_3 = (159 - 50j) \text{ V};$$

$$\dot{E}_4 = (-20 + 120j) \text{ V}; \dot{I}_1 = 12 \text{ A}; \dot{I}_3 = (+6 - 8j) \text{ A};$$

$$\dot{I}_4 = 22 \text{ A};$$

Решение:

а) Втори закон на Кирхоф се отнася за контур от електрическата верига и има следната формулировка: "Сумата от всички спадове на напрежение в клоновете на един контур е равна на сумата от електродвижещите напрежения в контура":

$$\sum_{k=1}^n \dot{U}_K = \sum_{k=1}^n \dot{E}_K \quad \text{или} \quad \sum_{k=1}^n (Z_K \cdot \dot{I}_K) = \sum_{k=1}^n \dot{E}_K$$

Знакът на отделните спадове на напрежение в клоновете на контура (събираемите в лявата страна) се определя в зависимост от това дали посоката на тока през разглеждания клон от контура съвпада с посоката на сумиране. Ако посоките съвпадат знакът пред съответното събираемо е „+“. В противен случай, знакът е „-“.

Знакът на електродвижещите напрежения от дясната страна на уравнението се определя в зависимост от това дали стрелката на съответния източник на е.д.н. съвпада по посока с посоката на сумиране в контура. Ако посоките съвпадат, съответното е.д.н се записва със „+“. В противен случай, знакът е „-“.

В избраните контури не трябва да участват клонове с идеални източници на електродвижещ ток.

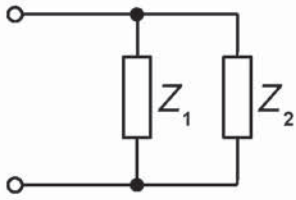
а) За конкретния случай се записва уравнение по II закон на Кирхоф:

$$\dot{I}_1 (R_1 - jX_{C1}) + \dot{I}_2 (jX_{L2} - jX_{C2}) + \dot{I}_3 R_3 - \dot{I}_4 R_4 = \dot{E}_3 - \dot{E}_4$$

б) Изразява се търсеният ток, заместват се известните величини и се извършват изчисленията. При правилно смятане трябва да се получи отговор:

$$\dot{I}_2 = (-1,5 - j32,42) = 32,45 \angle -92,65^\circ \text{ A}$$

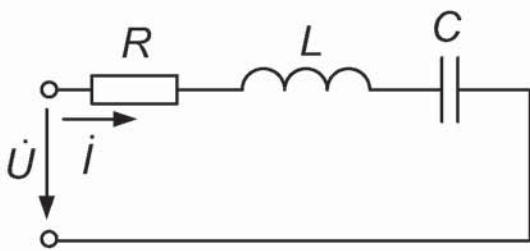
**Зад.6.** Да се изчисли еквивалентното комплексно съпротивление  $Z_e = ?$  за дадената верига, ако  $Z_1 = (5 - 5j) \Omega$  и  $Z_2 = (3 + 12j) \Omega$



Решение:

В случая имаме две комплексни съпротивления, свързани в паралел(успоредно). Използва се съкратената формула за намиране на еквивалентно съпротивление при успоредно свързване:

$$Z_E = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(5 - j5) \cdot (3 + j12)}{(5 - j5) + (3 + j12)} = (8,1 - j1,46) \Omega$$



2) Да се пресметне комплексната ефективна стойност на напрежението  $\dot{U} = ?$ , което трябва да се приложи на входа на веригата, за да протече синусоидален ток със комплексна ефективна стойност  $\dot{i} = (+8 - j3) \text{ A}$ , ако  $R = 4\Omega$ ,  $L = 10\text{mH}$ ,  $C = 120\mu\text{F}$  и

$$\omega = 2500 \text{ s}^{-1}.$$

Решение:

- Изчисляват се реактивните съпротивления:

$$X_L = \omega \cdot L = 2500 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 25 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2500 \cdot 120 \cdot 10^{-6}} = 3,33 \Omega$$

- Определя се комплексното съпротивление на клона:

$$Z = R + jX_L - jX_C = 4 + j25 - j3,33 = (4 + j21,67) \Omega$$

- Изчислява се по закона на Ом в комплексна форма търсеното напрежение:

$$\dot{U} = \dot{I} \cdot Z = (+8 - j3) \cdot (4 + j21,67) = (97,01 + j161,36) \text{ V}$$

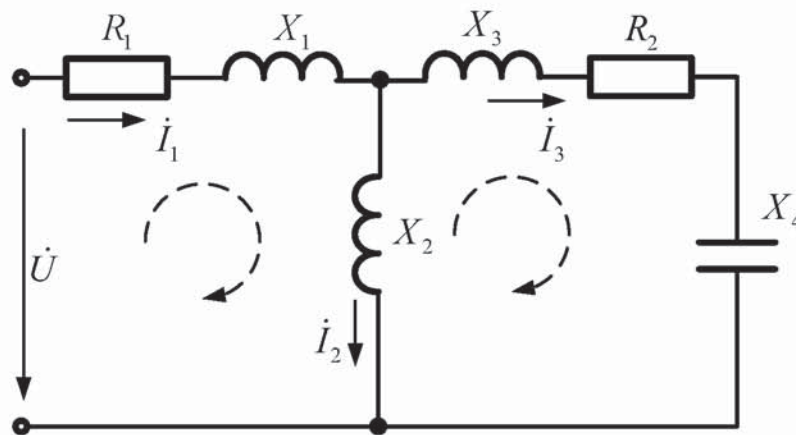
$$\dot{U} = 188,28 \angle +58,99^\circ \text{ V}$$



### АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕРИГИ ЧРЕЗ ЗАКОНИТЕ НА КИРХОФ

Практическите правила за запис на първи и втори закон на Кирхоф са дадени в едноименната глава. Разгледан е и проблема за прилагане на законите на Кирхоф за случая на наличие на източник на ток във веригата. Показан е реда за решаване на задачата без и с преобразуване на източника на ток в източник на е.д.н. Всичко това е илюстрирано с конкретни задачи.

**Зад.1.** За схемата, която е показана на *Фиг.С1* е дадено:  $R_1 = 40\Omega$ ;  $X_1 = 20\Omega$ ;  $X_2 = 40\Omega$ ;  $X_3 = 20\Omega$ ;  $R_2 = 40\Omega$ ;  $X_4 = 60\Omega$ ;  $u = 200\sqrt{2} \sin(\omega t), V$ . Да се определят токовете в схемата и напрежението върху съпротивлението  $X_4$ .



*Фиг.С1*

Решение:

✓ Необходимият брой уравнения по първи и втори закони на Кирхоф са съответно:

$$n = q - 1 = 2 - 1 = 1 \quad \text{уравнение по I закон}$$

$$k = p - (q - 1) = 3 - (2 - 1) = 2 \quad \text{уравнения по II закон}$$

където:  $q$  - брой възли;  $p$  - брой клонове

✓ Записва се системата уравнения за един от възлите и за обозначените на *фиг. С1* контури за запис по втори закон на Кирхоф.

$$\begin{cases} -\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0 \\ (R_1 + jX_1)\dot{I}_1 + jX_2\dot{I}_2 - U = 0 \\ [R_2 + j(X_3 - X_4)]\dot{I}_3 - jX_2\dot{I}_2 = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} -\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0 \\ (40 + j20)\dot{I}_1 + j40\dot{I}_2 + 0\dot{I}_3 = 200 \\ 0\dot{I}_1 - j40\dot{I}_2 + (40 - j40)\dot{I}_3 = 0 \end{cases}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 200 & j40 & 0 \\ 0 & -j40 & (40 - j40) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 \\ (40 + j20) & j40 & 0 \\ 0 & -j40 & (40 - j40) \end{vmatrix}} = \frac{-8000}{(-3200 - j2400)} = 2 \angle -36,87^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ (40 + j20) & 200 & 0 \\ 0 & 0 & (40 - j40) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 \\ (40 + j20) & j40 & 0 \\ 0 & -j40 & (40 - j40) \end{vmatrix}} = \frac{-8000 + j8000}{(-3200 - j2400)} = 2,83 \angle -81,87^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} -1 & 1 & 0 \\ (40 + j20) & j40 & 200 \\ 0 & -j40 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 \\ (40 + j20) & j40 & 0 \\ 0 & -j40 & (40 - j40) \end{vmatrix}} = \frac{-j8000}{(-3200 - j2400)} = 2 \angle 53,13^\circ \text{ A}$$

Токовете могат да бъдат записани и в алгебрична форма т.е.

$$\dot{I}_1 = 2 \angle -36,87^\circ \text{ A} = (1,6 - j1,2) \text{ A} \quad \rightarrow i_1 = 2\sqrt{2} \sin(\omega t - 36,87^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_2 = 2,83 \angle -81,87^\circ \text{ A} = (0,4 - j2,8) \text{ A} \quad \rightarrow i_2 = 2,8\sqrt{2} \sin(\omega t - 81,87^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_3 = 2 \angle 53,13^\circ \text{ A} = (1,2 + j1,6) \text{ A} \quad \rightarrow i_3 = 2\sqrt{2} \sin(\omega t + 53,13^\circ) \text{ A}$$

Напрежението на съпротивление  $X_4$  се получава по закона на Ом:

$$\dot{U}_C = \dot{I}_3 \cdot (-jX_4) = (1,2 + j1,6) \cdot (-j60) = (96 - j72) = 120 \angle -36,87^\circ \text{ V}$$

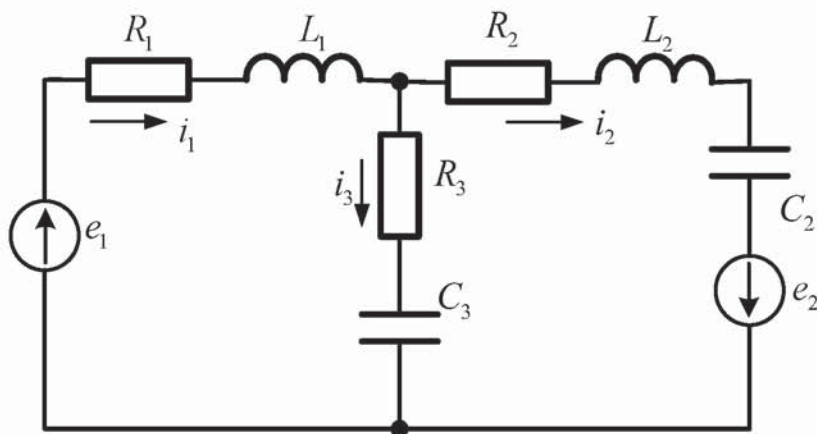
Забележка: Ако в схемата на електрическата верига са включени

измервателни уреди (амперметър  $\textcircled{A}$  ; волтметър  $\textcircled{V}$  ) то те измерват **ефективните стойности на величините**, т.е. когато получим резултата като комплексна ефективна стойност, записана в експоненциален вид, то показанието на уреда е модула, а аргумента не се отчита. За конкретния случай на тази задача, ако в трите клона има свързани амперметри, а паралелно на  $X_4$  - волтметър, то техните показания ще бъдат:



$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= 2 \angle -36,87^\circ \text{ A} \rightarrow \boxed{A_1} = 2 \text{ A} \\ \dot{I}_2 &= 2,83 \angle -81,87^\circ \text{ A} \rightarrow \boxed{A_2} = 2,83 \text{ A} \\ \dot{I}_3 &= 2 \angle 53,13^\circ \text{ A} \rightarrow \boxed{A_3} = 2 \text{ A} \\ \dot{U}_C &= 120 \angle -36,87^\circ \text{ V} \rightarrow \boxed{V} = 120 \text{ V} \end{aligned}$$

**Зад.2.** За веригата, показана на Фиг.С3 е дадено:  $R_1 = R_2 = R_3 = 10\Omega$ ;  
 $L_1 = 10\text{mH}$ ;  $L_2 = 20\text{mH}$ ;  $C_2 = 50\mu\text{F}$ ;  $C_3 = 100\mu\text{F}$ ;  
 $e_1 = 200\sqrt{2} \sin(1000t) \text{ V}$ ;  $e_2 = 100 \sin(1000t + 45^\circ) \text{ V}$ .



Фиг.С3

Да се определят:

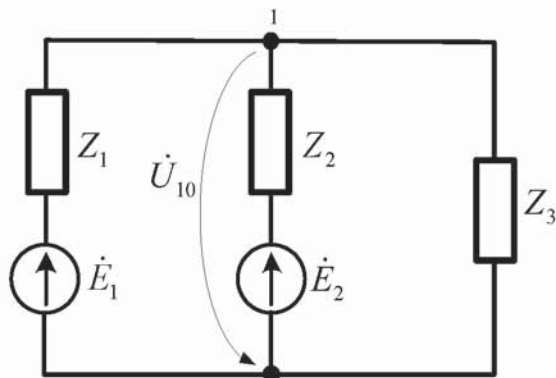
- моментните стойности на токовете в клоновете;
- активната, реактивната и пълната мощност консумирани в клон с  $R_3$  и  $C_3$ .

Отговор:

$$i_1 = 19,04 \sin(1000t - 21,08^\circ) \text{ A};$$

$$i_2 = 11,18 \sin(1000t - 18,44^\circ) \text{ A};$$

$$i_3 = 7,9 \sin(1000t - 26,57^\circ) \text{ A}; P_3 = 312,5 \text{ W}; Q_3 = -312,5 \text{ var}; S_3 = 442 \text{ VA}$$



Фиг.С4

**Зад.3.** За веригата, показана на Фиг.С4 е известно:

$$Z_1 = j10\Omega; Z_2 = -j60\Omega; Z_3 = 12\Omega;$$

$$\dot{E}_1 = 100 \text{ V}; \dot{E}_2 = 600 \angle 90^\circ \text{ V}$$

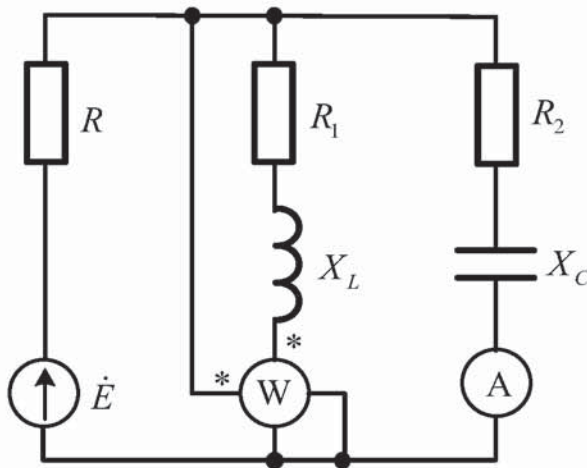
Да се изчисли напрежението  $\dot{U}_{10}$ .

Отговор:  $U_{10} = 120 \angle -90^\circ \text{ V}$

**Зад.4.** За веригата от *Фиг.С5* е известно:  $R = 8\Omega$ ;  $R_1 = R_2 = 40\Omega$ ;

$X_L = X_C = 30\Omega$ ;  $\dot{E}_1 = 120V$  Да се намерят комплексните ефективни стойности на клоновите токове и показанията на уредите, включени във веригата.

Отговор:



**Фиг.С5**

$$\dot{I}_1 = 3,058A; \dot{I}_2 = 1,911 \angle -36,87^\circ A;$$

$$\dot{I}_3 = 1,911 \angle 36,87^\circ A; \dot{I}_A = 1,911A;$$

$$P_W = 146,1W$$

**Зад.5.** В електрическа верига (кухня) три паралелно (успоредно) свързани електрически консуматори са захранвани с променливо напрежение  $U=230V$  и честота  $50Hz$ . Трите консуматора са: проточен бойлер  $P_1 = 3000W$ ; готварска печка  $P_2 = 6000W$  електрическа кана за вода  $P_3 = 2000W$ .

Да се изчисли големината на тока  $I_1, I_2, I_3$  през всеки един консуматор и тока  $I$  в общия клон на електрическата верига.

Отговор:  $I_1=13,04A, I_2=26,08A, I_3=8,7A, I=47,82A$



## ЛИТЕРАТУРА

1. Цветков Д. и др., Основи на електротехниката и електрониката, Техника, София, 1989.
2. Тонев И. и др., Електротехника и електрониката, Техника, София, 1991.
3. Петров Д. и др., Електротехника и електрониката, Ръководство за лабораторни упражнения, Университетско издателство „В. Априлов”, Габрово, 1999.
4. Е. Фердинандов, П. Павлова, Основи на оптоелектрониката I и II част, "Техника", 1993 .
5. Георгиев Г., С. Салтиел, Практикум по квантова електроника и лазерна техника, София, Университетско издателство "Св.Климент Охридски", 1993
6. Узунов П., П.Петров, К.Иванов., Теоретична електротехника – теоретичен курс и приложения, част 1, „Габрово Принт” ЕООД, 2008.
7. Узунов П., П.Петров, К.Иванов, Теоретична електротехника – теоретичен курс и приложения, част 2, „Габрово Принт” ЕООД, 2010.
8. Станев, И., П.Петров, Д.Петров, П.Узунов., Примери и задачи по теоретична електротехника, ч. I. - Габрово: Университетско издателство «Васил Априлов», 2000.
9. Станев, И., П. Петров, Д. Петров, П. Узунов и др. Примери и задачи по теоретична електротехника, част II. Университетско издателство “Васил Априлов” - Габрово, 2000
10. Станев, И., Теоретична електротехника, част II, Габрово, Издателство ЕКС-ПРЕС,2009.
11. Фархи, С.Л., С.П.Папазов, Теоретична електротехника- част I, Техника, София ,1987 г.
12. Фархи, С.Л., С.П.Папазов, Теоретична електротехника- част II, Техника, София ,1990 г.
- 13.<https://en.wikipedia.org/wiki>
- 14.<https://www.google.com>

# С Ъ Д Ъ Р Ж А Н И Е

стр.

ПРЕДГОВОР .....	3
Организация на работата в лабораторията и указания за провеждане на пораженията .....	4
Изисквания по техническа безопасност при работа с електрически съоръжения .....	6
Кратки сведения за измерванията и измервателните уреди .....	8
ЛАБОРАТОРНИ УПРАЖНЕНИЯ.....	10
<i>Лабораторно упражнение №1. Измерване на електрическо напрежение и електрически ток .....</i>	10
<i>Лабораторно упражнение №2. Измерване на активни съпротивления....</i>	16
<i>Лабораторно упражнение №3. Измерване на активна мощност при постоянен и еднофазен променлив ток .....</i>	23
<i>Лабораторно упражнение №4. Измерване на електрическа енергия с еднофазен електромер.....</i>	28
<i>Лабораторно упражнение №5. Изследване на линейна неразклонена електрическа верига при променлив ток .....</i>	33
<i>Лабораторно упражнение №6. Изследване на трифазна верига с консуматори свързани в звезда .....</i>	41
<i>Лабораторно упражнение №7. Изследване на бобина с феромагнитна сърцевина при синусоидално напрежение.....</i>	48
<i>Лабораторно упражнение №8. Изследване на еднофазен трансформатор</i>	54
<i>Лабораторно упражнение №9. Изследване на инвертиращ интегрален операционен усилвател.....</i>	61
<i>Лабораторно упражнение №10. Изследване на импулсни устройства....</i>	67
<i>Лабораторно упражнение №11. Изследване на еднофазни неуправляеми полупроводникови токоизправители.....</i>	73
<i>Лабораторно упражнение №12. Изследване на симисторен регулатор на променливо напрежение .....</i>	82
<i>Лабораторно упражнение №13. Изследване на трифазен асинхронен двигател с накъсо съединен ротор.....</i>	87
<i>Лабораторно упражнение №14. Изследване на генератор за постоянен ток с паралелно възбуждане .....</i>	94
<i>Лабораторно упражнение №15. Преобразуване на слънчевото излъчване в електрическа енергия с фотоволтаични клетки и модули.....</i>	100
<i>Лабораторно упражнение №16. Проверка на времето за изключване на максималнотокова защита и измерване на ток на сработване на диференциалнотокова защита.....</i>	106
<i>Лабораторно упражнение №17.</i>	
Цифров мултиметър и начин на употреба.....	114
Осцилоскоп и начин на употреба.....	123
СЕМИНАРНИ УПРАЖНЕНИЯ.....	131
<i>Семинарно упражнение №1 Анализ на вериги с последователно, паралелно и смесено свързване на съпротивления при постоянен ток.....</i>	131



<i>Семинарно упражнение №2</i> Анализ на прости електрически вериги при синусоидално захранване. закон на Ом. импеданс, максимална, ефективна и моментна стойност на синусоидалните величини. начални фази и фазова разлика.....	134
<i>Семинарно упражнение №3</i> Примерни решени задачи при електрически вериги със синусоидално захранване основни закони на електрическите вериги в комплексна форма.....	137
<i>Семинарно упражнение №4</i> Приложение на комплексните числа за запис на синусоидални функции, активни и реактивни съпротивления. комплексни съпротивления.....	140
<i>Семинарно упражнение №5</i> Примери за работа с комплексни числа.....	151
<i>Семинарно упражнение №6</i> Анализ на електрически вериги чрез законите на Кирхоф.....	156
Литература .....	160