

1. ИЗМЕРВАНЕ НА ТОК, НАПРЕЖЕНИЕ И МОЩНОСТ СЪС СТРЕЛКОВИ И ЦИФРОВИ ИЗМЕРВАТЕЛНИ УРЕДИ

Целта на упражнението е да се запознаят студентите с основните аналогови и цифрови уреди за измерване на електрическо напрежение, ток и активна мощност, както и с начините за разширяване на техните измервателни обхвати.

1.1. Задачи за изпълнение

1. Да се измери постоянен електрически ток с магнитоелектрически амперметър при различни обхвати, реализирани чрез електрически шунтове и с цифров амперметър.
2. Да се измери постоянно електрическо напрежение с магнитоелектрически волтметър при различни обхвати, реализирани чрез допълнителни резистори и с цифров волтметър.
3. Да се измери активна, реактивна и пълна електрическа мощност в променливотокова верига с цифров ватметър. Да се определи $\cos\varphi$ на товара, като се измерят токът и напрежението на товара.

1.2. Теоретични постановки и методически указания

1.2.1. Теоретични постановки

1.2.1.1. Измерване на електрически ток. Уредът за измерване на електрически ток се наричат *амперметър* и се означава с *A*. Той може да бъде стрелкови или цифров. Амперметърът се свързва последователно на консуматорите или в клона на веригата, в който трябва да се измери токът. За да не се изменя работният режим на веригата при включване на амперметъра, той трябва да има много малко съпротивление, т.е. малка собствена консумация. Идеален амперметър би бил този, който има нулево съпротивление. Отклонението на стрелката или светлинното петно на електромеханичните амперметри се дължи на протичащия ток през бобината на уреда.

Всеки стрелкови амперметър има *константа по ток*, която се определя от зависимостта

$$(1.1) \quad C_A = \frac{I_H}{\theta_H},$$

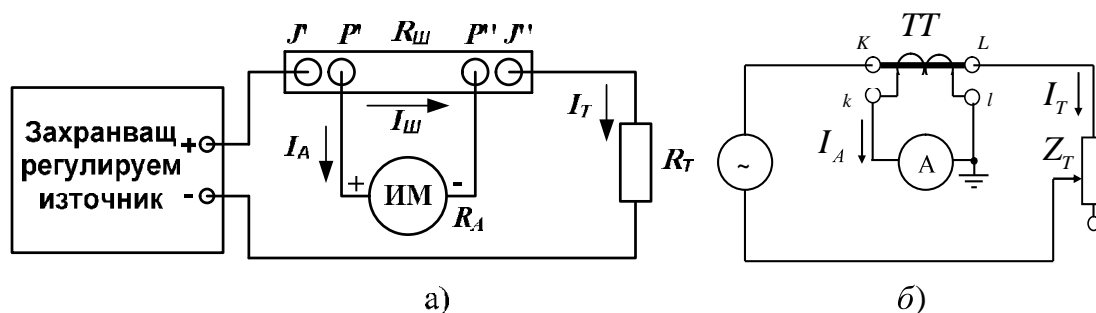
където I_H е номиналната стойност (обхватът) на амперметъра, а θ_H е номиналният (общ) брой скални деления от скалата на уреда. Размерността ѝ е например А/дел; mA/дел; μ A/дел. и др. и представлява тази стойност на тока, която предизвиква отклонение на стрелката на едно деление от скалата. Ако показанието на стрелката на уреда е θ_X скални деления, то стойността на измервания ток е

$$(1.2) \quad I_X = C_A \theta_X.$$

Когато измерваният ток I_X е по-голям от I_H , се налага разширяване на

обхвата на уреда, което се извършва чрез **шунтов резистор (шунт)** или **токов трансформатор (ТТ)**. Кой от двата начина ще се приложи, зависи главно от вида на тока (постоянен или променлив) и от измервателния уред, т.е. неговия "**принцип**" на действие. Обикновено шунтът се използва при разширяване обхвата на уреда при постоянен ток, а токовият трансформатор - само при променлив ток.

Разширяването на обхвата на амперметъра чрез шунт е показано на фиг.1.1а. Ролята на амперметър се изпълнява от измервателен механизъм (ИМ) с обхват по ток I_A .



Фиг.1.1.

Шунтът $R_{ш}$ отклонява част от измервания ток I_T през товарния резистор R_T . Така през измервателния уред протича ток I_A , по-малък или равен на номиналния ток на ИМ. Обикновено шунтът е нискоомен, четириклемен резистор с два двойни извода - токови (J', J'') и потенциални (P', P''). Той се включва във веригата на тока чрез токовите изводи, а към потенциалните изводи се включва ИМ, чийто обхват по ток се разширява. С m се означава коефициентът, показващ колко пъти е увеличен обхватът на ИМ, т.е.

$$(1.3) \quad m = \frac{I'_H}{I_H},$$

където I'_H е разширеният номинален обхват на стрелковия амперметър, като $I_H < I'_H$. Коефициентът m се нарича **коефициент на шунтиране** или **шунтов множител**. Обикновено той се определя така, че разширеният обхват на уреда I'_H да бъде със стойност, кратна и по-голяма от номиналния обхват I_H на ИМ. Съпротивлението на шунта $R_{ш}$ има стойност, която зависи от вътрешното съпротивление R_A на ИМ и от шунтовия множител m . $R_{ш}$ се определя от формулата

$$(1.4) \quad R_{ш} = \frac{R_A}{m - 1}.$$

При разширяване на обхвата на ИМ по ток чрез шунт новата константа на стрелковия амперметър е

$$(1.5) \quad C'_A = \frac{I'_H}{\theta_H} = \frac{mI_H}{\theta_H} = mC_A,$$

а оттук стойността на измервания ток е

$$(1.6) \quad I_X = I_T = C'_A \theta_X,$$

където θ_X са отчетените скални деления от скалата на уреда.

Разширяването на обхвата на амперметър чрез токов трансформатор е показано на фиг.1.1б. Първичната намотка (K, L) на токовия трансформатор ТТ се свързва последователно на консуматора или в клона, в който трябва да се измери токът, а към вторичната намотка (k, l) е свързан амперметърът. ТТ се характеризира с **номинален коефициент на трансформация (номинално преводно отношение)** k_{IH} и показва колко пъти измерваният ток $I_X = I_T$ (през първичната намотка) е по-голям от тока през вторичната намотка I_A . Разширеният обхват на уреда е

$$(1.7) \quad I'_H = k_{IH} I_H,$$

Номиналният коефициент на трансформация се определя по формулата

$$k_{IH} = \frac{I_{1H}}{I_{2H}},$$

където I_{1H} и I_{2H} са номиналните обхвати на първичната и вторичната намотка, отбелязани върху токовия трансформатор. Изборът на ТТ трябва да бъде направен така, че $I'_H = I_{1H} > I_X$ и $I_{2H} \leq I_H$.

При разширяване на обхвата на амперметъра чрез ТТ новата константа на уреда е

$$(1.8) \quad C'_A = \frac{I'_H}{\theta_H} = \frac{k_{IH} I_H}{\theta_H} = k_{IH} C_A,$$

а стойността на измервания ток е

$$(1.9) \quad I_X = I_T = C'_A \theta_X.$$

Към вторичната намотка на ТТ могат да се свързват последователно един или повече амперметри или токови вериги на други уреди с незначителни (нискоомни) съпротивления. Работният режим на ТТ е близък до режима на късо съединение. Затова вторичната му намотка не трябва да се оставя отворена. Ако през първичната намотка протича ток и вторичната е отворена, то във вторичната се получават пренапрежения, които са опасни за обслужващия персонал и за самия трансформатор.

Предимството на ТТ е, че позволява не само да се разшири обхватът на уредите, но и да се осигури галванично **развързване** на веригата на измервателните уреди от електрическите вериги с високо напрежение. Това

дава възможност за заземяване на вторичната намотка и предпазване на обслужващия персонал от опасност при пробив на изолацията.

Измерването на ток с цифров амперметър. Като цифров амперметър най-често се използва цифров мултиметър в режим на измерване на ток. Измерването се извършва, като предварително главният превключвател се поставя на подходящ обхват по ток и уредът се свързва с токовете си клеми последователно на консуматора (товара) и със съответната полярност.

2.2.1.2. Измерване на електрическо напрежение. Уредът за измерване на електрическо напрежение се наричат *волтметър* и се означава с V . Той може да бъде стрелкови или цифров. Волтметърът се включва паралелно на консуматора (генератора) или към точките, между които се измерва напрежението. За да не се изменя работният режим на веригата при включването на волтметъра, той трябва да има много голямо съпротивление, т.е малка собствена консумация. Между волтметрите и амперметрите с един и същ принцип на действие съществува разлика главно в големината на вътрешното съпротивление на уреда. Единствено магнитоелектрическите милivolтметри могат да се използват и като милиамперметри с обхват няколко милиампера.

Отклонението на стрелката при стрелковия волтметър се дължи на протичащия ток I_V през бобината му. Този ток не трябва да бъде по-голям от

$$I_{VH} = \frac{U_H}{R_V},$$

където U_H е номинална стойност на напрежението (обхват на ИМ), а R_V е вътрешното му съпротивление. **Константата на ИМ по напрежение е**

$$(1.10) \quad C_V = \frac{U_H}{\theta_H},$$

където θ_H е общият брой скални деления на уреда. Размерността ѝ е например V/дел; mV/дел и др. Ако стрелката на уреда се отклонява на θ_X скални деления, то стойността на измерваното напрежение е

$$(1.11) \quad U_X = C_V \theta_X.$$

Когато измерваното напрежение е по-голямо от U_H , се налага разширяване на измервателния обхват на волтметъра чрез **допълнителен резистор** или **напрежителен трансформатор (НТ)**. Изборът се прави в зависимост от вида и големината на измерваното напрежение, както и от принципа на действие на уреда. Чрез допълнителен резистор се разширява измервателният обхват както в постояннотокови, така и в променливотокови вериги. Напрежителният трансформатор се използва само при променливотокови вериги, когато измерваното напрежение е по-високо от 1000V.

Разширяване на обхвата на волтметър чрез допълнителен резистор е показано на фиг.1.2а. Ролята на волтметър се изпълнява от ИМ с обхват по напрежение U_H . Допълнителният резистор се включва последователно на

напрежителната верига на ИМ. Ако U'_H е разширеният обхват на стрелковия волтметър, а R_D е съпротивлението на допълнителния резистор, то токът през напрежителната намотка I_V трябва да е равен или по-малък от номиналната стойност I_{VH} . Тогава

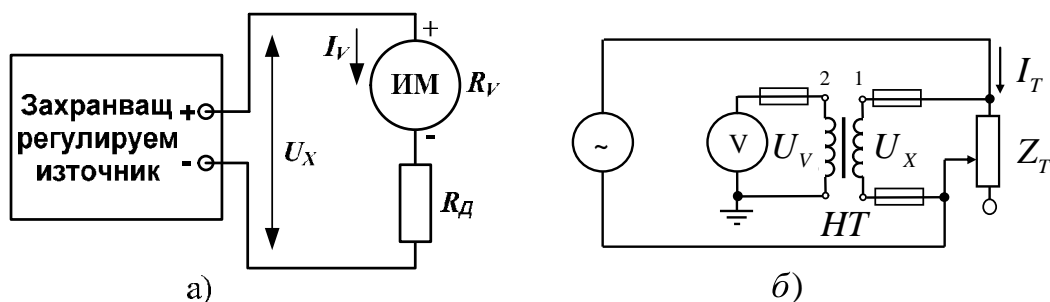
$$I_{VH} = \frac{U_H}{R_V + R_D}.$$

Разширеният обхват на стрелковия волтметър е

$$(1.12) \quad U'_H = nU_H.$$

Числото n се нарича **допълнителен множител** и показва колко пъти е увеличен обхватът по напрежение. Стойността на съпротивлението на допълнителния резистор R_D се определя с израза

$$(1.13) \quad R_D = R_V(n - 1).$$



Фиг.1.2.

Обикновено стойността на U'_H се подбира така, че да бъде кратна на стойността на U_H , като се спази условието $U_X \leq U_H^1$.

При разширяване на обхвата новата константа на стрелковия волтметър е

$$(1.14) \quad C'_V = \frac{U'_H}{\theta_H} = \frac{nU_H}{\theta_H} = nC_V,$$

а оттук и стойността на измерваното напрежение

$$(1.15) \quad U_X = U_V = C'_V \theta_X,$$

където θ_X са отчетените скални деления.

Разширяването на обхвата на волтметър чрез напрежителен трансформатор е показано на фиг.1.2б. Първичната намотка 1 на напрежителния трансформатор (НТ) се включва към изводите, между които се измерва напрежението, а към вторичната намотка 2 се свързват волтметри и напрежителните вериги на други уреди. Работният режим на НТ е близък до режима на празен ход, а за предпазване от късо съединение се поставят предпазители във веригите на първичната и вторична намотка. За предпазване

на вторичната намотка от пренапрежения при евентуален електрически пробив на изолацията между двете намотки вторичната намотка се заземява.

Напрежителният трансформатор се характеризира с **номинален коефициент на трансформация** k_{UH} (**номинално преводно отношение**), който показва колко пъти измерваното напрежение U_X е по-голямо от напрежението U_V , измервано от волтметъра, т.е. $U_X = k_{UH} U_V$. Разширеният обхват на уреда е $U'_H = k_{UH} U_H$.

Номиналното преводно отношение е $k_{UH} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}$,

където U_{1H} и U_{2H} са номиналните обхвати на първичната и вторичната намотка на НТ. Те са означени върху указателната табела на трансформатора. Изборът на трансформатора се прави така, че $U'_H = U_{1H} > U_X$ и $U_{2H} \leq U_H$.

При разширяване на обхвата на волтметъра чрез НТ новата константа на уреда е

$$(1.16) \quad C'_V = \frac{U'_H}{\theta_H} = \frac{k_{UH} U_H}{\theta_H} = k_{UH} C_V,$$

а стойността на измерваното напрежение е

$$(1.17) \quad U_X = C'_V \theta_X.$$

Измерването на напрежение с цифров волтметър. Като цифров волтметър най-често се използва цифров мултиметр в режим измерване на напрежение. Измерването се извършва, като предварително главният превключвател се поставя на подходящ обхват по напрежение и уредът се свързва паралелно с напрежителните клеми на консуматора (генератора) със съответната полярност.

1.2.1.3. Измерване на активна мощност. Уредите за измерване на електрическа мощност се наричат **ватметри** и се означават с W . Всеки ватметър има две вериги (бобини) - токова и напрежителна. През токовата верига се пропуска токът на консуматора (генератора), чиято мощност се измерва. Тя се включва последователно на консуматора (генератора), както се включва амперметър. Съпротивлението ѝ е незначително. Напрежителната верига се включва така, че на изводите ѝ да се подаде напрежението на консуматора (генератора), т.е. както се включва волтметър. Съпротивлението ѝ е много голямо. Всъщност ватметърът е фазовочувствително умножително устройство на три електрически величини: ток, напрежение и $\cos \varphi$, където φ е фазовата разлика между тока и напрежението. В случай на синусоиден режим показанието му е пропорционално на $UI \cos \varphi$. В най-общия случай тези величини могат да се вземат от два независими източника. Когато U и I представляват съответно ефективните стойности на напрежението и тока на даден консуматор (генератор), а φ е фазовата разлика между тях, тогава

$$(1.18) \quad P = UI \cos(\widehat{U, I}) = UI \cos \varphi,$$

е активната мощност на консуматора (генератора) и ватметърът може да бъде градуиран в единиците за мощност. Обхватът на ватметъра за мощност е

$$(1.19) \quad P_H = U_H I_H \cos \varphi_H,$$

където U_H е номиналното напрежение на напрежителната верига, I_H е номиналният ток на токовата верига, а $\cos \varphi_H$ е коефициентът на мощността, при който е градуиран ватметърът. Ако θ_H е общият брой скални деления на уреда, константата на ватметъра е

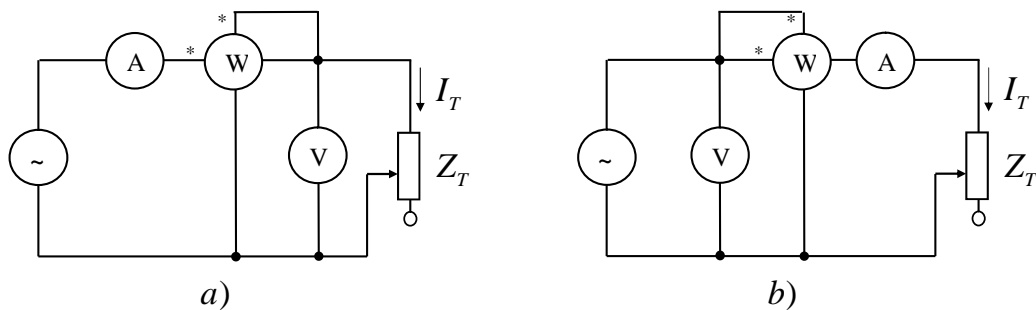
$$(1.20) \quad C_w = \frac{P_H}{\theta_H}.$$

Размерността ѝ е например W/дел; mW/дел; μ W/дел и т.н. За случая на $\cos \varphi_H = 1$ той не се отбелязва върху скалата.

Ако показанието на ватметъра е θ_x скални деления, измерваната активна мощност е

$$(1.21) \quad P_x = C_w \theta_x.$$

Възможни са два начина на свързване на напрежителната и токовата верига спрямо консуматора - схеми A-V или V-A, показани съответно на фиг.1.3а и фиг.1.3б.



Фиг.1.3.

Схемата A-V се използва при малко съпротивление (импеданс) на консуматора Z_T , а V-A - при голямо. Ватметърът по правило се свързва съвместно с амперметър и волтметър. По този начин се контролират стойностите на тока и напрежението и се избягва недопустимото претоварване на една от двете или и на двете вериги, защото това не може да се забележи от собственото му показание. Още по-опасно е, когато товарът Z_T е силно реактивен. Тогава $\cos \varphi$ има малка стойност, стрелката е в началото на скалата, но токът или напрежението могат да надхвърлят номиналните стойности. В тези случаи е целесъобразно да се използват ватметри с малък $\cos \varphi$.

При някои от измервателните уреди, включително и ватметрите, посоката на отклонението на стрелката зависи от посоката на тока в обината на уреда

(от посоката на пренасяне на енергията по линията). За да се осигури правилно отклонение, трябва да се съблюдава т.нар. съгласувано свързване на генераторните изводи. Те се отбелязват върху изводните клеми със стрелка (\downarrow), звездичка (*), буква, "+" , "-" и т.н.

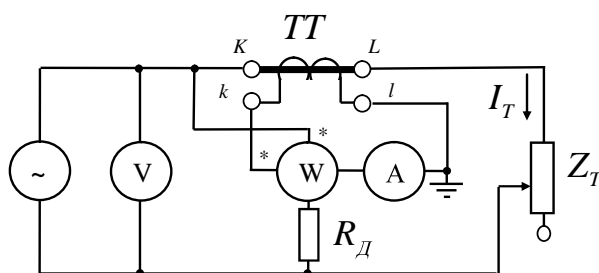
Разширяването на обхвата на ватметъра в зависимост от измерването, може да бъде по ток, по напрежение, или едновременно по ток и по напрежение. Разширяването на обхвата по ток се извършва както при амперметрите, а по напрежение - както при волтметрите. Например разширяването на обхвата на ватметъра по ток чрез ТТ и по напрежение чрез допълнителен резистор е показано на фиг.1.4.

За правилното отклонение на стрелката на ватметъра е задължително генераторният извод * на напрежителната верига да се свърже с генераторния извод K на първичната намотка на ТТ и генераторният извод * на токовата верига да се свърже с генераторния извод k на вторичната намотка на ТТ. При така разширения обхват на ватметъра номиналната активна мощност, която вече може да бъде измерена, е

$$(1.22) \quad P'_H = nU_H k_{IH} I_H \cos \varphi_H,$$

а новата константа на уреда се определя с израза

$$(1.23) \quad C'_W = \frac{P'_H}{\theta_H}.$$



Фиг.1.4.

Ако θ_X са отчетените скални деления, на които се отклонява стрелката на уреда, то измерената активна мощност е

$$(1.24) \quad P_X = C'_W \theta_X.$$

За определяне на стойността на $\cos \varphi$ се използват показанията за активна мощност P_X на ватметъра, както и показанията на контролните уреди - волтметъра U_X и амперметъра I_X .

$$(1.25) \quad \cos \varphi = \frac{P_X}{S_X} = \frac{P_X}{U_X I_X},$$

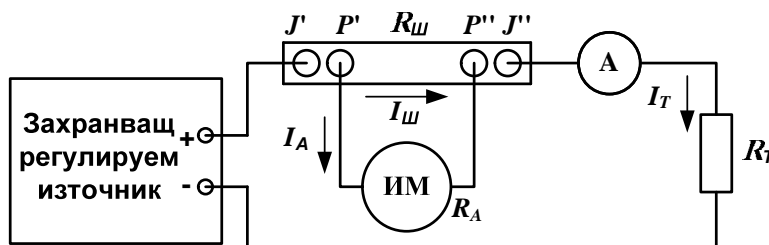
където пълната мощност $S_X = U_X I_X$.

1.2.2. Методически указания за изпълнение на задачите

При изпълнение на задача 1 за измерване на постоянен ток с разширяване обхвата на амперметъра чрез шунт и с цифров амперметър се свързва схемата от фиг.1.5. В случая като ИМ се използва милиамперметър с номинален обхват $I_H = \frac{U_H}{R_V}$. Към уреда има комплект шунтове, като на

съответните клеми са означени съответните обхвати. Като цифров амперметър се използва цифров мултиметр в режим измерване на ток.

Изборът на обхватите на милиамперметъра и цифровия амперметър се извършва по ориентировъчната стойност на тока, изчислена на базата на захранващото напрежение и съпротивлението на консуматора (товара) R_T .



Фиг.1.5.

Таблица 1.1

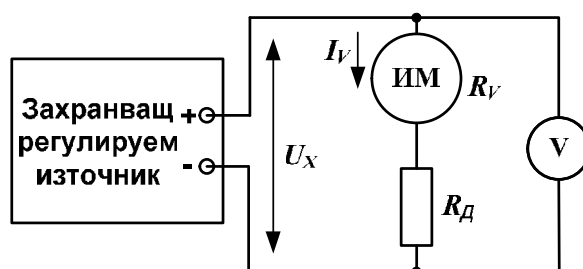
$I_x = var$					
$I_H = A, \theta_H = \text{дел}, R_A = \Omega,$ $C_A = \text{mA/дел}$					
$I'_H = A, m = , R_{ш} = \Omega, C'_A = A/\text{дел}$					
θ_x	дел				
I_x	A				
$I_{DMM,x}$	A				

Таблица 1.2

$I_x = const$					
$I_H = A, \theta_H = \text{дел}, R_A = \Omega,$ $C_A = A/\text{дел}$					
I'_H	A				
m	-				
$R_{ш}$	Ω				
C'_A	A/дел				
θ_x	дел				
I_x	A				
$I_{DMM,x}$	A				

Правят се няколко измервания при промяна на тока за един и същи обхват на уреда и резултатите се записват в табл. 1.1. Измерва се един и същи ток при различни обхвати на уредите и резултатите се записват в таблица 1.2. Да се обърне внимание на полярността при включване на уреда! При обработката на резултати се използват формули 1.1, 1.3, 1.4, 1.5 и 1.6.

При изпълнение на задача 2 за измерване на постоянно напрежение с разширяване на обхвата на волтметър чрез допълнителен резистор и с цифров волтметър се свързва схемата от фиг.1.6. Като ИМ се използва милivolтметър с номинален обхват U_H , а за цифров волтметър се използва цифров мултиметр в режим измерване на напрежение. Правят се няколко измервания при различни стойности на напрежението за един и същи обхват на уредите и резултатите се записват в таблица 1.3. Измерва се едно и също напрежение за различни обхвати на уреда и резултатите се записват в таблица 1.4. Използват се формули 1.10, 1.12, 1.13, 1.14 и 1.15.



Фиг.1.6.

Таблица 1.3

$U_x = var$						
$U_H = \text{V}, \theta_H = \text{дел}, R_V = \text{k}\Omega,$						
$C_V = \text{V/дел}$						
$U'_H = \text{V}, n = , R_D = \text{k}\Omega, C'_V = \text{V/дел}$						
θ_x	дел					
U_x	V					
$U_{DMM,x}$	V					

Таблица 1.4

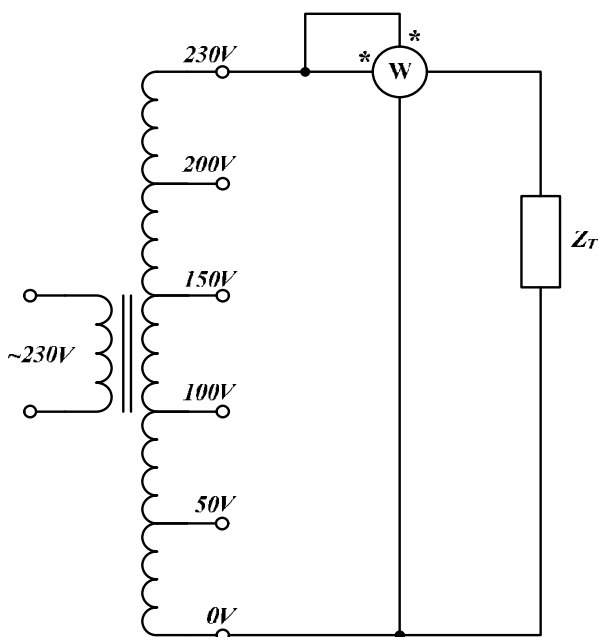
$U_x = const$						
$U_H = \text{V}, \theta_H = \text{дел}, R_V = \Omega,$						
$C_V = \text{V/дел}$						
U'_H	V					
n	-					
R_D	k Ω					
C'_V	V/дел					
θ_x	дел					
U_x	V					
$U_{DMM,x}$	V					

При изпълнение на задача 3 за измерване на мощност с ватметър се свързва схемата от фиг.1.7. Да се осигури правилно свързване на началата на токовата и напрежителната верига на ватметъра!

Измерва се активната - P , реактивната - Q и пълната - S мощност при различни товари, а измерените и обработени резултати се нанасят в таблица 1.5, като $\cos \varphi$ се изчислява по формула 1.25.

Таблица 1.5

Режим на товара	U	I	P	Q	S	cosφ измерено	cosφ изчислено
	V	A	W	var	VA	-	-
1							
2							
3							



Фиг.1.7.

1.3. Контролни въпроси

1. Кое е правилно - шунтът да се включи във веригата, в която протича измерваният ток, а паралелно на него амперметърът, или обратно?
2. Възможно ли е да се разшири обхватът на амперметъра с токов трансформатор в постояннотокови вериги?
3. Къде се включва допълнителният резистор към волтметъра при разширяване на неговия обхват?
4. Възможно ли е да се обърне посоката на отклонение на стрелката при аналогов ватметър?
5. Как се подбират параметрите на токовия трансформатор, с който трябва да се разшири обхватът на амперметъра?
6. При измерване на мощността на консуматор с ватметър, кога се използва V-A схема и кога A-V схема?