

4. 2. ИЗМЕРВАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕЛИЧИНИ

Тъй като науката за измерването (метрологията) е единна наука, основните принципи и подходи за измерване на *топлотехническите и хидравлични* величини са сходни с тези при измерването на *електрическите* величини. Основните класификации и определения за методите и грешките при измерваният, разгледани там, са валидни и тук. Освен това в редица случаи е много удобно неелектротехнически величини, в това число и топлотехнически и хидравлични, да се измерват по електрически път, т.е. най-напред да се преобразуват в електрически величини и след това да се използват методите и средствата на електрическите измервания. Все пак отделните видове величини си имат характерни отличия, които внасят специфика при измерването им. Затова най-напред ще бъдат разгледани някои характерни *особености* при измерването на основните *електрически* величини.

4.2.1

Основни сведения за измерването на електрическите величини

4.2.1.1. Видове измервания на електрическите величини

Измерванията на електрическите величини биват:

Преки – когато електрическата величина се измерва с *уред, предназначен за измерването точно на тази величина*. Пряко е измерването на напрежение с волтметър, на ток с амперметър и т. н.

Косвени – когато пряко се измерват една или няколко *спомогателни величини* и по *формула* (по-рядко система уравнения) *от тях се изчислява измерваната величина*. Типичен пример е измерването на съпротивление при постоянен ток с амперметър и волтметър като се използва закона на Ом.

4.2.1.2. Електроизмервателни уреди

I. Видове

Електроизмервателните уреди се подразделят на:

А. Според начина на отчитане на резултата от измерването:

- *Аналогови (стрелкови)*, при които с помощта на скала се отчита отклонението на стрелка;
- *Цифрови*, при които резултатът се отчита от цифров дисплей.

Б. Според вида на измерваната величина:

- *Волтметри*, които измерват електрическо напрежение;
- *Амперметри*, които измерват електрически ток;
- *Омметри*, които измерват електрическо съпротивление;
- *Ватметри*, които измерват електрическа мощност;
- *Електромери*, които измерват електрическа енергия и т. н.

Много удобни са *комбинираните* електроизмервателни уреди (*мултицети*), в които са обединени измерители на няколко електрически величини. Някои модели може да измерват и температура (с помощта на терморезистор).

В. Според устройството им:

- *Електромеханични*;
- *Електронни*.

Г. Според зависимостта на измерваната величина от времето:

- *Постояннотокови* – те измерват постоянни (константни) във времето електрически величини. Обикновено се маркират със знака “—”. При стрелковите уреди трябва да се съобразява поляритета на измерваната величина, за да няма отклонение на стрелката в обратна посока. Когато се очаква честа смяна на посоката на измерваната величина, препоръчително е да се използва измервателен уред с *двустранна скала* (с “нула” в средата);

- *Променливотокови* – те измерват променливи във времето електрически величини. Най-често променливите електрически величини са периодични с период T и честота $f = 1/T$. Обикновено имат означението “~”. В този случай е важен *честотния диапазон*, в който уредът работи без допълнителна честотна грешка;

- *Универсални*, които измерват и постоянни, и променливи величини.

Д. Според мобилността им биват:

- *стационарни* (за табло) и *преносими* (лабораторни и сервизни).

Е. Според възможността за съхранение на резултатите от измерването са:

- *показващи* и *регистраци*.

II. Основни характеристики на електроизмервателните уреди

А. *Обхват*. Това е диапазонът, в който уредът може да измерва без да бъде претоварен и/или грешката да остане в допустимите граници. Най-общо се задава с долната и горната граница на този диапазон. Повечето измервателни уреди са многообхватни. Различаваме фабричният номинален обхват A_H и разширен обхват A_P , ако са предприемани допълнителни действия за увеличаването (*разширяването*) му. A е измерваната електрическа величина, в конкретните случаи $A = U, I, R, W \dots$ Кратността на разширяване на обхвата е:

$$n_A = \frac{A_P}{A_H} \quad (4.2.1)$$

Б. *Точност*. Тя се оценява чрез допуснатите грешки и обикновено се задава с **класа на точност на уреда** ϵ_n . При повечето електромеханични уреди класът на точност се определя от максималната *приведена* грешка ϵ_n , а при електронните – от максималната *относителна* грешка β_n (в проценти).

В. Собствена консумация. За осъществяване на измервателния процес уредът изразходва макар и минимална електрическа енергия, изцяло или частично получавана от измервания верига. Тя зависи главно от неговото *вътрешното съпротивление*. Когато то няма идеалната стойност се променя режимът на работа на изследваното устройство и това води до *методична грешка*. По принцип, ако уреда се включва *последователно*, идеалната стойност за вътрешното му съпротивление е нула, а когато се включва *паралелно* - вътрешното му съпротивление трябва да клони към *безкрайност*.

Г. Константа. Тя е най-характерна за електромеханичните (стрелковите) уреди. Показва каква стойност от измерваната величина съответства на едно скално деление. *Отчетените скални деления* θ_x трябва да се умножат по константата, за се получи *стойността на измерваната величина*. Константата на уреда се определя като обхвата му се раздели на *номиналните деления на скалата* θ_n , т.е. на *числото отбелязано срещу крайното дясно деление от скалата* (то обикновено е различно от броя на “чертичките” на скалата) – $k_{АН} (k_{АР}) = A_H(A_P)/\theta_n$. При многообхватните уреди може да има различни константи за всеки от обхватите (когато скалата е една за всички обхвати). Цифровите уреди директно показват измерваната стойност.

4.2.1.3. Точност на електрическите измервания

Количествена мярка за точността е *грешката на измерването*. Има различни видове грешки според произхода им, начина на изчисляване, характера на изменение, причините и условията на възникване и т.н. *Относителната грешка на измерването* е една добра оценка за неговата точност. Тя зависи от три главни фактора:

а) точността на измервателния уред. *Апаратната грешка* зависи главно от класа на точност уреда. При електромеханичните измервателни уреди обаче класа на точност се определя от *приведената грешка*. Затова при тях *максималната относителна апаратна грешка* трябва да се определя така:

$$\beta_{\max} = \varepsilon_H \frac{A_{H(P)}}{A_X} \% , \quad (4.2.2)$$

където A_x е измерената стойност.

Намаляването на тази грешка може да се постигне чрез използването на по-точни уреди (класът на точност е по-малко число) и работа с възможно най-малкия обхват, при който няма претоварване (обхватът задължително трябва да е по-голям от очакваната измервана стойност).

б) точността на използвания метод. *Методичната грешка* основно зависи от собствената консумация на използваните уреди, а при косвените измервания – и от неточности, заложи в самата измервателна схема и изчислителни формули. Познанието на тези несъвършенства на метода позволява да се правят подходящи *корекции* в получените резултати.

в) субективни грешки. Дължат се на невнимание, незнание и други подобни пропуски на свързаните с измерването хора.

4.2.2

Измерване на електрическо напрежение

4.2.2.1. Метод на измерване

Електрическото напрежение се измерва *пряко* с измервателни уреди, наречени *волтметри*. Те се включват *паралелно* към точките, между които се измерва напрежението (то е разликата в потенциалите на тези точки). Използват се и двата вида волтметри:

- **Стрелкови** – с *магнитоелектрически* измервателен механизъм за постоянни напрежения и *електромагнитни, електродинамични и феродинамични* при променливи напрежения. Последните измерват *ефективната стойност* на променливите напрежения, дори и когато не са синусоидални. Комбинираните уреди използват при променлив ток *детекторен* (изправителен) измервателен механизъм. В общия случай те измерват средната стойност по модул на променливото напрежение. За единство те са градуирани в ефективна стойност за синусоидален режим. На практика това означава следното:

а) ако се измерва *синусоидално напрежение*, то показанието е точно неговата ефективна стойност;

б) ако се измерва *несинусоидално напрежение*, показанието е **средната стойност на напрежението, умножена по**

1,11.

- **Цифрови** – при тях производителите имат два подхода. *По-простите (и по-евтините)* цифрови волтметри измерват *променливите* напрежения както детекторните волтметри, т.е. измерват средната стойност, която показват умножена по **1,11**, т.е. показват вярно ефективната стойност **само при синусоидални напрежения**. По-качествените (и по-скъпи) цифрови волтметри измерват винаги ефективната стойност на променливите напрежения, дори и когато те не са синусоидални. Обикновено върху тях има означението **“true RMS”**. По-рядко се използват и *аналогови електронни волтметри*.

!!! За по-точно измерване на напрежение, при това при пренебрежима собствена консумация, се използват и други измерители на напрежение – *компенсаторите (потенциометри)*. Те биват *постояннотокови* и *променливотокови*, а според участието на човека в процеса на уравнивяването им – *ръчни* и *автоматични*. Това са типични уреди, реализиращи *нулев метод* на измерване, т.е. в процеса на измерване се *уравнивяват*. В първата част е показано използването на компенсатор за измерване на съпротивлението на *терморезистор* чрез сравняването му с *еталонно съпротивление*. **!!!**

4.2.2.2. Избор на обхвата на волтметъра

Естествено задължително е обхватът на волтметъра да е със сигурност по-голям от измерваното напрежение. В противен случай измерваното напрежение не може да бъде отчетено, а при по-големи претоварвания уредът ще бъде вероятно повреден. При многообхватните волметри често няколко обхвата са по-големи от измерваното напрежение. Тогава трябва да се работи с най-малкия от тях, защото при него **измерването е най-точно**. Ако няма никаква ориентираща информация за измерваната стойност, най-напред измерването трябва да се извърши на **най-големия обхват**, при който опасността от претоварване на уреда е най-малка. Ако получената стойност е по-малка от някой от по-малките обхвати, то измерването трябва да се повтори на най-малкия от обхватите, който все пак е по-голям от получената стойност, за да бъде измерването най-точно.

4.2.2.3. Влияние на вътрешното съпротивление на волтметъра

Начинът на включване на волметрите определя изискването те да имат колкото се може *по-голямо вътрешно съпротивление*. Тогава те имат малка собствена консумация и съответно по-малка методична грешка поради това, че почти не променят режима на работа на електрическата верига, където се включват. Това важи особено силно, ако се измерва *електродвижещо напрежение* E (например на източници, термодвойки и др.).

Най-добри в това отношение са цифровите волметри и по принцип всички електронни волметри. От стрелковите волметри с най-голямо съпротивление (респ. най-малка собствена консумация) са магнитоелектрическите и детекторните волметри. Недостатък на електромагнитните и електродинамичните волметри е малкото им вътрешно съпротивление, особено при по-малките обхвати. При многообхватните стрелкови волметри с увеличаването на обхвата им расте и вътрешното им съпротивление.

Най-малка е собствената консумация на *потенциометрите*. При тях в *момента на измерване* през уреда не протича ел. ток, което е *равностойно на безкрайно голямо вътрешно съпротивление*. Това ги прави много подходящи за измерване на *електродвижещо напрежение*, например на термодвойки.

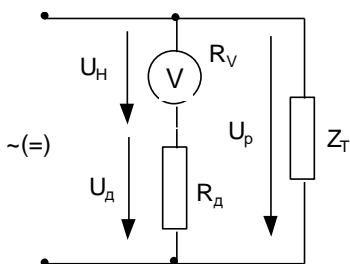
4.2.2.4. Разширяване на обхвата на волтметрите

Ако волтметър има обхват U_H и вътрешно съпротивление R_V и последователно към него свържем допълнително съпротивление R_d (фиг. 4.2.1.), то това ще разшири обхвата му до $U_p = n_v U_H$ с кратност на разширяване на обхвата:

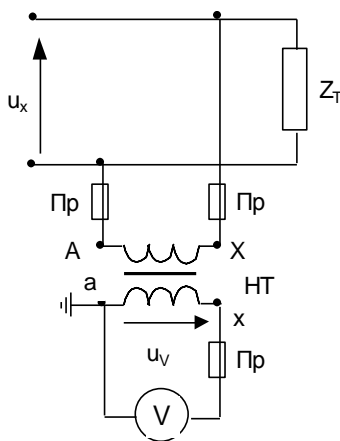
Този начин за разширяване на обхвата е *универсален*. Да не се забравя след разширяването на обхвата да се преизчисли константата на волтметъра с новия (разширения) обхват U_p или просто номиналната (старата) константа да се умножи по кратността на разширяване на обхвата n_v !!!

⚡ Чрез увеличаване на стойността на допълнителното съпротивление R_d може да се получи практически неограничено голям разширен обхват. За да не се допусне пробив на изолацията, **разширеният обхват не трябва да надвишава изпитателното напрежение**. То е означено на кутията на уреда – при електромеханичните с число в киловолти (kV)

(най-често **2**, напоследък и **3**), изписано в петолъчна звезда ☆ !!!



Фиг. 4.2.1. Разширяване на обхвата на волтметър с допълнително съпротивление



Фиг. 4.2.2. Разширяване на обхвата на волтметър с напрежителен трансформатор

Само при променливи напрежения обхватът на волметрите може да се разшири с *напрежителен измервателен трансформатор* (НТ) (фиг. 4.2.2). Първичната намотка A (начало) – X (край) се включва към измерваното променливо напрежение u_x , а измервателният уред се включва към вторичната намотка a (начало) – x (край). За защита от претоварване и къси съединения са включени предпазителите Pr (и в двете намотки), а от съображения за безопасност вторичната верига е заземена. Измереното напрежение $U_x = k_{UH} U_v$, където $k_{UH} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}$ е *номиналното преводно*

отношение (коefficient на трансформация), зависещо основно от отношението на броя на навивките на двете намотки, а U_v е показанието на волтметъра.

Напрежителните трансформатори са *еднофазни* и *трифазни*.

4.2.3

Измерване на електрически ток

4.2.3.1. Метод на измерване

Електрическият ток се измерва *пряко* с измервателни уреди, наречени *амперметри*. Те се включват *последователно* на елемента (клона), чийто ток ще се измерва. И тук също се използват стрелкови и цифрови амперметри. Казаното при волтметрите за използваните измервателни механизми и измерваните стойности при различните видове променливи токове важи напълно при амперметрите.

4.2.3.2. Избор на обхвата на амперметъра

Следват се същите правила и съображения, изложените в т. 4.2.2.2 за волтметрите.

4.2.3.3. Влияние на вътрешното съпротивление на амперметъра

Последователното включване на амперметрите е причина при тях да се изисква *малко вътрешно съпротивление* R_A .

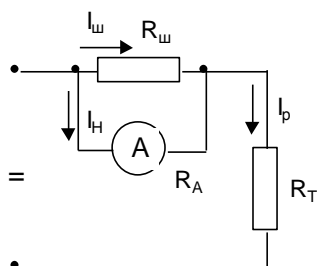
4.2.3.4. Разширяване на обхвата на амперметрите

При постоянен ток обхватът на амперметъра може да се разшири посредством съпротивление $R_{ш}$ (шунт), включено *паралелно* на уреда (фиг. 4.2.3). Ако номиналният обхват I_H трябва да се разшири до $I_p = n_A I_H$, то е нужен шунт със

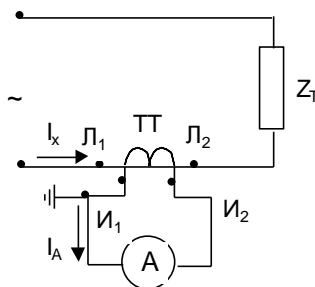
съпротивление: $R_{ш} = \frac{R_A}{n_A - 1}$, където n_A е кратността на разширяване на обхвата от (4.2.1). Ако $k_{АН}$ е номиналната

константа на амперметъра при изходния обхват I_H , то константата при разширения обхват I_p ще бъде вече $k_{Ap} = n_A k_{АН}$.

При променлив ток най-често обхватът на амперметъра се разширява чрез *секционирание на намотката* на уреда, т.е. чрез разделянето ѝ на части (*секции*), които се включват в различни комбинации (последователно, паралелно, смесено). И тук при променлив ток обхватът на амперметъра може да се разшири с токов измервателен трансформатор (ТТ), както е показано на фиг. 4.2.4. Първичната намотка L_1 (начало) – L_2 (край) се включва последователно в клоната, чийто ток се мери, т.е. където би се включил амперметъра, ако не е нужно да се разширява обхвата му. Към вторичната намотка I_1 (начало) – I_2 (край) се включва измервателния уред. Измерваният ток I_x се получава като показанието на амперметъра I_A се умножи по номиналното преводно отношение на ТТ $k_{ТТ} = \frac{I_{1H}}{I_{2H}}$.



Фиг. 4.2.3. Разширяване на обхвата на амперметър с шунт



Фиг. 4.2.4. Разширяване на обхвата на амперметър с токов трансформатор

Когато не е възможно или не е желателно да се прекъсва клоната, където се измерва тока, много удобни са преносимите ТТ с подвижен магнитопровод от вида “токови клещи”. При тях ролята на първична намотка *с една навивка* се изпълнява от проводника с измервания ток.

⚡ Тъй като към вторичната намотка на ТТ се включват уреди с много малко съпротивление, те работят в **режим близък до късо съединение!** Поради това увеличаването на съпротивлението, включено към вторичната намотка и особено прекъсването ѝ е **много опасно** и за ТТ, и за измервателя! **Недопустимо е включването на предпазители във вторичната верига на ТТ!** Препоръчително е включването на ключ между изводите на вторичната намотка (I_1 и I_2), който да е затворен и да гарантира безопасния (само за този вид трансформатори!) режим на късо съединение. При измерване ключът трябва да се отваря, за да може да се отчетат показанията на уредите **!!!**

⚡ Не е желателно волтметър да се включи по схемата за амперметър, но обикновено това не е свързано с повреда на уреда. Но ако погрешно амперметър се включи по схемата за волтметър, това почти винаги води до повреда на уреда. Затова трябва да се внимава при работа с комбинираните измервателни уреди, при които често с един превключвател се сменят вида на уреда (волтметър, амперметър и пр.), обхвата и режима (постояннотоков или променливотоков). **!!!**

4.2.4

Измерване на електрически съпротивления

4.2.4.1. Видове електрически съпротивления

При постоянен ток има само едно съпротивление – “омическото” съпротивление R . То се определя от закона на Ом

$$R = U/I \text{ и се измерва в омове } [\Omega]. \quad (4.2.3)$$

Ако елемента е *нелинеен* това е *статичното* му съпротивление.

При променлив ток елементите се характеризират с *няколко вида съпротивления*. От ефективните стойности на напрежението и тока по закона на Ом се определя *пълното съпротивление (импеданса)* z :

$$z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X^2} \text{ , } [\Omega] \quad (4.2.4)$$

В израза за импеданса освен *активното (омическото) съпротивление* R участва и *реактивното съпротивление* X (при последователна заместваща схема), което зависи от индуктивността L и капацитета C на елемента:

$$X = X_L - X_C \text{ , реактивно съпротивление, } [\Omega] \text{ , } X_L = \omega L \text{ - индуктивно съпротивление, } [\Omega] \text{ , } X_C = \frac{1}{\omega C} \text{ - капацитивно съпротивление, } [\Omega] \text{ , } \omega = 2\pi f \text{ - ъгловата (кръговата) честота, } [\text{rad/s}] \quad (4.2.5)$$

Активното съпротивление е свързано с *активната мощност* (при последователна заместваща схема):

$$R = \frac{P}{I^2} . \quad (4.2.6)$$

При постоянен ток е в сила и връзката $R = \frac{U^2}{P}$.

4.2.4.2. Методи за измерване на електрическо съпротивление

В практиката се налага измерването на електрически съпротивления в много широк диапазон – $10^{-3} \div 10^8 \Omega$. При измерването на *малки съпротивления* проблем са *съпротивленията на съединителните проводници и контактните съпротивления*, които стават съизмерими с измерваните стойности. В първата част са използвани трипроводна и четирипроводна схема на свързване за намаляване на това влияние при измерване на температура. При *много големи съпротивления* (например на изолатори) трябва да се прави разлика между *обемното и повърхностното* съпротивление. В този случай източник на грешки са утечните токове, дължащи се на неидеалните изолации на измервателните уреди и на свързващите проводници.

За измерване на толкова различни по стойност съпротивления се използват няколко метода:

I. Косвени методи

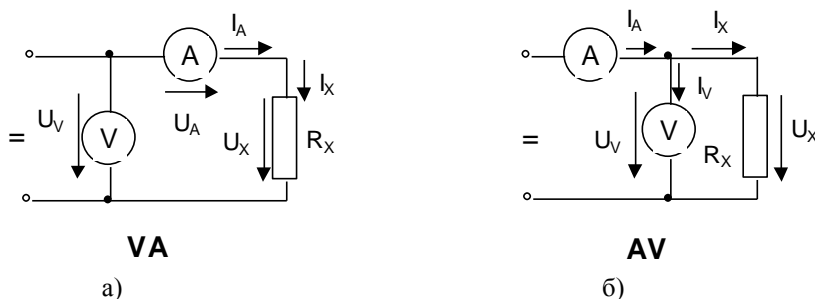
При тях се използва *закона на Ом* и следователно трябва да се знаят стойностите на напрежението и тока на елемента, чието съпротивление се измерва. Нужни са волтметър и амперметър, които са най-разпространените измерителни уреди. При това трябва да се държи сметка за:

а) изразът (4.2.3) дава активното съпротивление само при *постоянен ток*! При променлив ток (и наличие на параметрите L и C) трябва да се използва (4.2.6) и следователно са необходими *амперметър* и *ватметър* за *активна мощност*.

б) ако измервателните уреди имат собствена консумация (неидеални вътрешни съпротивления), не е възможно амперметъра и волтметъра да се свържат така, че и двата да измерват величината, нужна за закона на Ом, т.е.

$$U_V = U_X \text{ и } I_A = I_X . \quad (4.2.7)$$

Наистина, възможни са две схеми на свързване – схема VA (фиг. 4.2.5а) и схема AV (фиг. 4.2.5б), но ако измервателните уреди не са идеални по отношение на собствената консумация, т.е. $R_A \neq 0$ и $R_V \neq \infty$, то и двете схеми не изпълняват едновременно и двете зависимости в (4.2.7).



Фиг. 4.2.5. Схеми за косвено измерване на съпротивление с волтметър и амперметър

По-далечния от измерваното съпротивление уред измерва освен нужната величина от (4.2.7) и една добавка, дължаща се на неидеалното вътрешно съпротивление на по-близкия до съпротивлението уред. Така в схема VA от фиг. 4.2.5а показанията на уредите са:

$$U_V = U_X + U_A = U_X + R_A I_A \text{ , } I_A = I_X \quad (4.2.8)$$

Това, че волтметърът освен нужното напрежение U_X измерва в добавка и напрежителния пад в крайщата на амперметъра, води до *относителна методична грешка*:

$$\beta_{VA} = \frac{\Delta R_X}{R_X} = \frac{R_A}{R_X} (100, \%) \quad , \quad (4.2.9)$$

В схема AV от фиг. 4.2.5б пък амперметърът освен нужният ток I_X измерва в добавка и тока I_V през волтметъра:

$$U_V = U_X \quad , \quad I_A = I_X + I_V = I_X + \frac{U_V}{R_V} \quad , \quad (4.2.10)$$

поради което *методичната относителна грешка* е:

$$\beta_{AV} = \frac{\Delta R_X}{R_X} = -\frac{R_X}{R_X + R_V} (100, \%) \quad . \quad (4.2.11)$$

!!! Мястото на R_X в изразите за методичната грешка (4.2.9) и (4.2.11) показва, че схема VA е по-точна при измерване на **големи** съпротивления, схема AV - при измерване на **малки** съпротивления, като гранично за *голямо/малко* е съпротивлението

$$R_{GP} \approx \sqrt{R_V R_A} \quad . \quad \text{!!!} \quad (4.2.12)$$

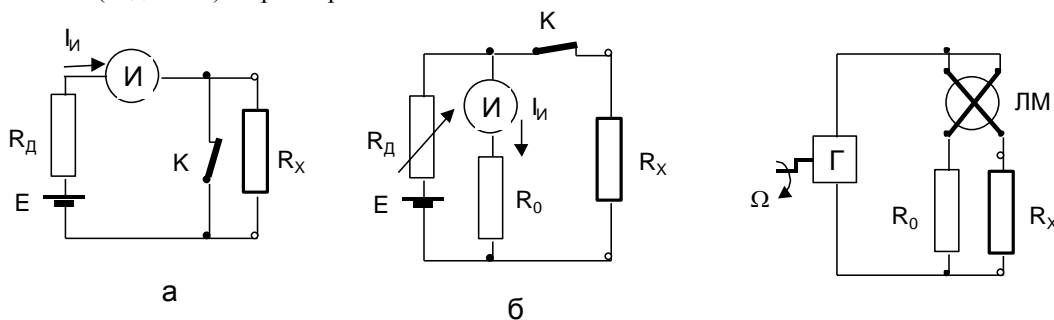
в) косвеният метод за измерване на съпротивление е най-подходящия метод за измерване на *нелинейни съпротивления*. Чрез него *статичното* му съпротивление може да се определи при различни работни условия.

II. Преки методи

При тези методи се използват измервателни уреди, които *директно измерват* електрическо съпротивление. Най-разпространените такива уреди са:

а) омметри

Те биват електромеханични и електронни (аналогови и цифрови). Електромеханичните почти винаги са с магнитоелектрически измервателен механизъм. Освен него те задължително съдържат източник на постоянно напрежение и няколко спомагателни резистора. В зависимост от това как измерваното съпротивление се включва по отношение на измервателния механизъм има два вида омметри – по *последователна схема* (фиг. 4.2.6а) и по *паралелна схема* (фиг. 4.2.6б). И в двата случая идеята е, че токът през магнитоелектрически измервателен механизъм $I_{и}$ ще зависи и от измерваното съпротивление R_X . Анализът на схемите показва, че при последователната схема тази зависимост е обратно пропорционална, поради което скалата им е “обратна” – от безкрайност към нула. Те са подходящи за измерване на големи съпротивления (над 100Ω). При паралелната схема зависимостта на



Фиг. 4.2.6. Схеми на магнитоелектрически омметър – а) – последователна схема; б) – паралелна схема

Фиг. 4.2.7. Схема на магнитоелектрически мегаомметър

тока през механизма от R_X е права и затова скалата им е “права” – от нула към безкрайност. Те са по-подходящи за измерване на по-малки съпротивления (под 100Ω). Недостатък и на двете схеми е, че показанието им силно зависи от напрежението на използвания източник (обикновено батерии), което с течение на времето намалява. Точността им не е висока (клас 1,5 – 2,5), но с тях се работи лесно. Цифровите омметри са по-точни, но и при тях разреждането на захранващите батерии също внася допълнителна грешка.

б) мегаомметри

Те са предназначени за измерване на много големи съпротивления (изолации). Принципът, на който се изграждат, е подобен на този при омметрите. Отличията са, че магнитоелектрическият механизъм е в логотрично изпълнение (*ЛМ* на фиг. 4.2.7), поради което изменението на захранващото напрежение практически не влияе на резултата от измерването. Втората особеност е, че измерването трябва да се извършва при по-високо напрежение, поради което като захранващ източник се използват вградени постояннотокови генератори с ръчно задвижване (*Г* на фиг. 4.2.7) или токоизправители.

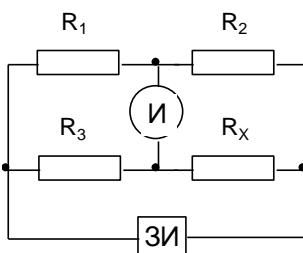
!!! Изпитвателното напрежение е от $100V$ до $5000V$, което изисква строго съблюдаване на правилата за безопасност **!!!**
Точността на мегаомметрите не е висока (1% - 5%), но с тях се работи лесно.

!!! При логометричните механизми съпротивителният момент на подвижната им част не се създава по механичен, а по електрически начин. Поради това, когато не измерват, стрелката им е в *произволно положение* (не е в “нулата”). Това не е белег за повреда, както би било при обикновените (не логометричните) уреди. !!!

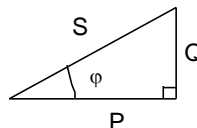
в) измервателни мостове

Измервателните мостове са типични представители на *нулевите измервателни методи*. Според схемата им биват *четирираменни* (мост на Уитстон), *шестраменни* и др. Винаги имат *захранващ диагонал* и *измервателен диагонал*. За измерване на съпротивление се използват *постояннотокови* мостове, при които в *захранващият диагонал* е включен постояннотоков източник (батерии, токоизправител). В *измервателния диагонал* обикновено се включва магнитоелектрически галванометър или друг *високочувствителен индикатор*. Мостовете за измерване на съпротивление биват:

- **уравновесени** – при тях след включване на измерваното съпротивление се *регулират* един или няколко от вградените резистори докато мостът се *уравновеси*, т.е. токът през измервателния диагонал стане равен на нула. Това се установява от нулевото показание на галванометъра при най-голяма негова чувствителност. Отчитат се стойностите на елементите, при които е достигнато равновесието и от условието за равновесие се изчислява измерваното съпротивление. Тези мостове са много точни и почти няма влияние от изменение на напрежението на захранващия източник. Недостатък е, че уравновесяването е сравнително бавен процес и изисква познания за функционирането на конкретния мост. Типичен представител на тези измервателни устройства е Уитстоновият мост (фиг. 4.2.8).



Фиг. 4.2.8. Схема на Уитстонов мост



Фиг. 4.2.9. Триъгълник на мощностите

Условието за равновесие при него е: “когато токът през индикатора *I* е нула, *произведенията* от съпротивления на *срещулежащите* рамена са равни”:

$$R_1 R_x = R_2 R_3 \quad \text{или} \quad R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1} . \quad (4.2.13)$$

Ако равновесието на моста се постига чрез регулиране на стойността на R_3 , мостът се нарича *магазинен*, ако се регулира отношението R_2/R_1 , той е *линеен*.

- **неуравновесени** – при тях токът в измервателния диагонал не се нулира, а по неговата големина се съди за стойността на измерваното съпротивление. Явно предимство е, че резултатът направо се отчита от скалата на индикатора без регулиращи (уравновесяващи) манипулации. При този принцип обаче показанието зависи силно от захранващото напрежение, което намалява точността им.

В първата част за измерване на съпротивлението на термочувствителни преобразуватели са използвани и двата вида мостове.

4.2.5

Измерване на електрическа мощност и енергия

4.2.5.1. Видове електрическа мощност и енергия

I. Електрически мощности

Електрическата мощност и енергия поради близката им физическа природа се измерват по много сходни принципи и схеми. Много съществено е, че при променлив ток и двете величини имат *няколко разновидности*. Физически първо се въвежда **моментната мощност**:

$$p = ui , [W] , \quad (4.2.14)$$

където u и i са моментните стойности на напрежението и тока. Ако режимът е периодичен, нейната средна стойност е **активната мощност**

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt , \quad T = \frac{1}{f} . \quad (4.2.15)$$

При *синусодален режим*

$$P = UI \cos \varphi , [W] , \quad (4.2.16)$$

където φ е *фазовата разлика* между напрежението и тока, а $\cos \varphi$ е *факторът (коэффициентът) на мощността*.

При *периодичен несинусодален режим* след разлагане в ред на Фурие:

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k = UI \kappa_P \quad (4.2.17)$$

Индексът “k” е номерът на хармоника. Постоянната съставка е при $k = 0$ и $\varphi_0 = 0$. В този случай факторът на мощността $\kappa_P \neq \cos \varphi$ (φ е фазовата разлика между *несинусоидалния* ток и *несинусоидалното* напрежение).

Работи се и с **пълната (привидната) мощност**

$$S = UI, [\text{VA}] \quad (4.2.18)$$

и с **реактивната мощност**

$$Q = UI \sin \varphi, [\text{VAr}] \quad \text{при синусоидален режим и} \quad (4.2.19)$$

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k \quad \text{при несинусоидален режим} \quad (4.2.20)$$

Не бива да се забравя, че **триъгълникът на мощностите** (фиг. 4.2.9) е валиден само при синусоидален режим. При несинусоидален режим трябва да се отчита и *деформационната мощност D*.

!!! При постоянен ток активната, пълната и моментната мощности съвпадат !!!

$$P = UI, [\text{W}] \quad (4.2.21)$$

При трифазни вериги съответната трифазна мощност е сумата от мощностите на трите фази. Например активната мощност на един трифазен консуматор е

$$P_{\text{тр}} = P_a + P_b + P_c, \quad (4.2.22)$$

където P_a, P_b, P_c са активните мощности на трите фази, определени от (4.2.16) или (4.2.17), в зависимост от това дали режимът е синусоидален или не. В частния случай на симетричен трифазен консуматор или източник

$$P_{\text{тр}} = 3P_{\phi}. \quad (4.2.23)$$

P_{ϕ} е активната мощност на коя да е от еднаквите фази и съгласно (4.2.16) и (4.2.31) независимо от начина на свързване (звезда или триъгълник)

$$P_{\text{тр}} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi_{\phi}. \quad (4.2.24)$$

Индексът “ ϕ ” се отнася за фазните величини, а ”л” – за линейните.

II. Електрически енергии

Активната електрическа енергия се определя от израза:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt = \int_{t_1}^{t_2} u i dt, \quad (4.2.25)$$

а реактивната енергия:

$$W_p = \int_{t_1}^{t_2} Q dt, \quad (t_2 - t_1) \gg T. \quad (4.2.26)$$

Показаното на фиг. 4.2.10 четириквартантно графично изобразяване напълно е валидно и за електрическите енергии, ако активната мощност P се замени с активната енергия W , а реактивната мощност Q се замени с реактивната енергия W_p . Измервателните единици са съответно *джаул* [J] (SI) и *киловатчас* [kWh] за активна и *киловарчас* [kVAh] за реактивна енергия и техните кратни и подразделения.

4.2.5.2. Измерване на електрическа мощност при постоянен ток

Изразът (4.2.21) показва, че постояннотоквата мощност може да се измерва косвено по същите схеми, както и електрическото съпротивление – фиг. 4.2.5а и фиг. 4.2.5б. Разсъжденията за методичната грешка остават в сила, но относителните методични грешки при двете схеми са:

$$\beta_{VA} = \frac{R_A}{R_T} (100\%) \quad , \quad \beta_{AV} = \frac{R_T}{R_V} (100\%) \quad , \quad (4.2.27)$$

където R_T е съпротивлението на товара (консуматора). И тук при големи съпротивления на товара по точна е схема VA, а при малки – AV, като граничното съпротивление се определя пак от (4.2.12).

Ако е сигурно, че товарът е идеален резистивен, т.е. без индуктивност и капацитет ($\varphi = 0$), VA и AV схемите може да се захранват и с променливо напрежение. При променливо захранване и произволен товар схемите от фиг. 4.2.5 ще измерват *пълната*, а не *активната* мощност!

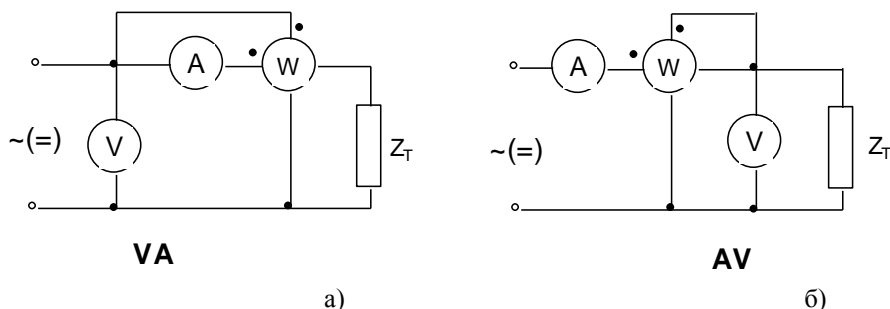
4.2.5.3. Измерване на електрическа мощност в променливотокови еднофазни вериги

При широкото разпространение на уреди за пряко измерване на мощност – *ватметрите* – косвеното измерване на мощност при променлив ток не е целесъобразно. Това не се отнася за пълната мощност, за която съгласно (4.2.18) схемите

от фиг. 4.2.5 са приложими, стига да е сигурно, че волтметърът и амперметърът измерват точно *ефективната стойност* на напрежението и тока.

I. Измерване на активна мощност

Използват се електромеханични и електронни (главно цифрови) еднофазни ватметри за активна мощност. Стрелковите ватметри са с *електродинамичен механизъм* (по-точни са) или с *феродинамичен механизъм* (с по-голям двигателен момент). Във всеки случай имат четири извода – два токови, които се включват последователно на елемента, чиято мощност се измерва, (както амперметъра) и два напрежителни извода, които се включват паралелно на елемента (като волтметър) (фиг. 4.2.10а,б). По един от всяка двойка изводи е *генераторен* и ако не се държи сметка за това може да се получи обратно отклонение при стрелковите ватметри. Генераторните изводи се маркират със звездичка, стрелкичка, а в схемите и с удебелена точка. Аналогично на амперметрите и волтметрите съпротивлението между токовите изводи трябва да е много малко, а между напрежителните – много голямо. И при ватметрите са възможни две схеми на свързване - VA и AV, като изразите за относителните методични грешки са същите като в (4.2.35), ако се счита, че R_V е съпротивлението между напрежителните изводи (на напрежителната верига), а R_A е съпротивлението между токовите изводи на ватметъра (на токовата верига).



Фиг. 4.2.10. VA (а) и AV (б) схеми на свързване на еднофазен ватметър и съпътстващите волтметър и амперметър

!!! Обхватът на ватметрите не се задава с номинална мощност, а с три компоненти: **обхват по напрежение U_H** , **обхват по ток I_H** и **номинален фактор на мощността $\cos \varphi_H$** **!!!** Номиналната константа на електромеханичните ватметри се изчислява от:

$$k_{WH} = \frac{U_H I_H \cos \varphi_H}{\theta_H}, \quad \frac{W}{\text{ск. дел.}} \quad (4.2.28)$$

Най-често номиналният $\cos \varphi_H = 1$ и тогава обикновено не се отбелязва на уреда. При *малкосинусните* ватметри $\cos \varphi_H = 0,5; 0,2$ или $0,1$ и тогава задължително е записан върху скалата.

⚡ За разлика от волтметрите и амперметрите при *ватметрите* е възможно **да се претовари само** напрежителната или *само* токовата верига и същевременно отклонението на стрелката да не надвишава номиналното **!!!** Затова в схемите на фиг. 4.2.10 са включени волтметър и амперметър, по които да се следи да не се надвишат съответно обхватите по напрежение и по ток. В този случай при изчисляване на методичните грешки по формули (4.2.27) R_A трябва да се замести със сбора от съпротивленията на амперметъра и на токовата верига на ватметъра, а R_V – с еквивалентното съпротивление на волтметъра и на напрежителната верига на ватметъра, които са свързани *паралелно*.

n_u и n_i са безразмерните кратности на разширяване обхвата по напрежение и по ток. Номиналният фактор на мощността $\cos \varphi_H$ не може да се променя.

При *променлив ток* обхватът на ватметърът по напрежение може да се разшири с напрежителен измервателен трансформатор *НТ*, а обхватът по ток – с токов измервателен трансформатор *ТТ*. В този случай измерваната мощност се получава от показанието на ватметъра и номиналните преводни отношения на НТ и ТТ:

$$P_x = k_{UH} k_{IH} P_w \quad (4.2.29)$$

Токовите изводи на ватметъра се включват към вторичната намотка на ТТ, а напрежителните изводи – към вторичната намотка на НТ, т.е. аналогично на амперметъра и волтметъра. Докато при тях обаче е безразлично кой от изводите им е свързан към началото и кой към края на вторичната намотка на измервателните трансформатори, то **ватметърът е фазочувствителен уред** (има *генераторни изводи*, най-често означавани върху уреда със звездичка “*”). Затова при свързването му трябва да се спазва **правилото**:

Ако не се спазва това правило, стрелката на ватметъра ще се отклонява в неправилната посока. Правилото важи за всички *фазочувствителни* уреди – електромери, фазомери, косинусфимери и др. С пунктир е показана разгледаната в т. 4.2.3.4 възможност към изводите на вторичната намотка на ТТ да се включи ключ *K*, който да гарантира късото й съединение.

Формули (4.2.4) и (4.2.6) показват, че схемите от фиг. 4.2.10 позволяват косвено да се измерват импеданса, активното и реактивното съпротивление на товара от последователната заместваща схема:

$$R = \frac{P}{I^2}, \quad z = \frac{U}{I}, \quad X = \sqrt{z^2 - R^2} \quad (4.2.30)$$

II. Измерване на реактивна мощност

Реактивната мощност в еднофазни променливотокови вериги се измерва по-рядко. Поради това и еднофазните реактивни ватметри не са толкова разпространени. Те също са електромеханични и електронни (най-често цифрови). Основната идея при тях е да се използват принципите за направа на ватметрите за активна мощност, но напрежението или токът да се дефазират на четвърт период ($\pm\pi/2$), при което фазовата разлика между напрежението и тока ще се промени също с толкова и третият множител в (4.2.16) ще стане синус, т.е. ще се измерва реактивната мощност от (4.2.19). При електродинамичните и феродинамичните ватметри тази дефазация се постига чрез включване на R и $C(L)$ елементи към напрежителната им намотка. Това решение не е сложно, но получената дефазация е честотно зависима.

Само при синусодален режим реактивната мощност може да се измерва косвено по схемите от фиг. 4.2.10а,б като се използва ватметър за активна мощност, а волтметърът и амперметърът са за ефективна стойност. От триъгълника на мощностите (фиг. 4.2.9) и от (4.2.18):

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{U^2 I^2 - P^2} \quad (4.2.31)$$

4.2.5.4. Измерване на електрическа мощност в трифазни вериги

I. Измерване на активна мощност

!!! Трифазната активна мощност се измерва или с еднофазни ватметри (няколко) или с трифазни ватметри (един) !!!
Последните представляват еднофазни ватметри обединени конструктивно, с обща индикация, която е алгебрична сума от показанията на отделните ватметри (елементи), като при нужда са въведени и мащабни множители. Броят на еднофазните ватметри, респективно броя на елементите на трифазните ватметри се определя от:

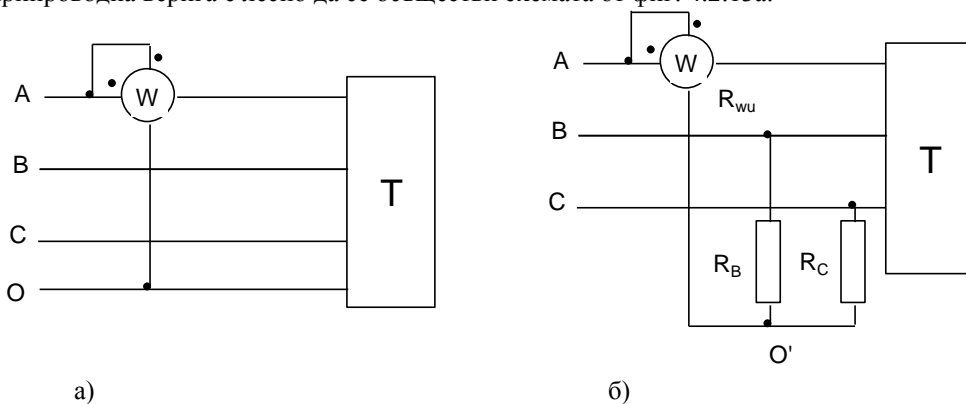
- симетричен или несиметричен е консуматора (товара);
- трипроводна или четирипроводна (с нулев проводник) е веригата.

а) измерване на активна мощност на симетричен трифазен консуматор

От (4.2.23) се вижда, че в този случай за измерването на трифазната мощност е достатъчен един ватметър (елемент), който да се включи така, че да измерва активната мощност на която и да е от трите фази на консуматора и показаниято му да се умножи по три:

$$P_{\text{тр}} = 3P_w \quad (4.2.32)$$

При това няма значение в звезда или триъгълник е свързан товара и трипроводна или четирипроводна е веригата. При четирипроводна верига е лесно да се осъществи схемата от фиг. 4.2.13а.



Фиг. 4.2.11. Измерване на активна мощност на симетричен трифазен консуматор при а) – четирипроводна верига и б) – при трипроводна верига

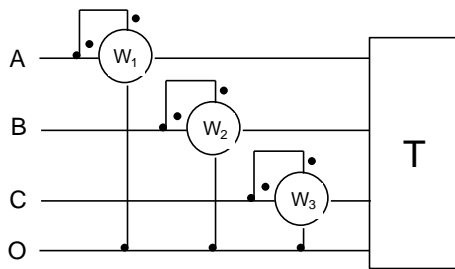
При свързване в триъгълник и при трипроводна звезда може да възникват затруднения, ако е технически невъзможно токовата намотка да се свърже последователно на някоя от фазите и/или напрежителната намотка да се свърже паралелно на фазата (например недостъпен звезден център). Тогава подходяща е схемата с изкуствена нула (фиг. 4.2.11б).

б) измерване на активна мощност на несиметричен трифазен консуматор

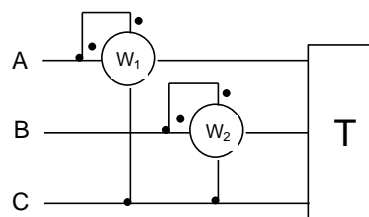
Ако веригата е четирипроводна, са необходими три еднофазни ватметри или триелементен трифазен ватметър както е показано на фиг. 4.2.14. Съгласно (4.2.22) трифазната активна мощност е:

$$P_{\text{тр}} = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} \quad (4.2.33)$$

Арон е показал, че ако веригата е трипроводна, т.е. ако товарът е свързан в триъгълник или в звезда, но без нулев проводник, са достатъчни два еднофазни ватметра или двуелементен трифазен ватметър както е показано на фиг. 4.2.13. Токовете намотки са свързани към кои да е от двата линейни проводника. Напрежителните намотки са свързани към линейния проводник, в който е токовата им намотка, и към линейния проводник, в който няма токова намотка (в примера от фиг. 4.2.13 без токови намотки е проводникът C).



Фиг. 4.2.12. Измерване на активната мощност на несиметричен трифазен консуматор по метода с трите ватметъра



Фиг. 4.2.13. Измерване на активната мощност на несиметричен трифазен консуматор по метода с двата ватметъра (схема на Арон)

Мощността на трифазния консуматор (товар) е:

$$P_{TP} = \pm P_{w1} \pm P_{w2} \quad (4.2.34)$$

!!! При определен характер на товара и при определени стойности на фазовите разлики в отделните фази е възможно отклонението на някой от двата еднофазни ватметъра да е в *обратна посока*. Тогава трябва да се разменят крайщата на напрежителната му намотка и показанието му да се вземе в израза (4.2.34) със знак *минус*. **!!!**

Напрежителните намотки на ватметрите от схемата с трите ватметъра (фиг. 4.2.12) са свързани към *фазните напрежения* на трифазния източник, докато напрежителните намотки на ватметрите от схемата с двата ватметъра (фиг. 4.2.13) са свързани към *линейните напрежения*, които са $\sqrt{3} \approx 1,73$ пъти по-големи от фазните !

II. Измерване на реактивна мощност

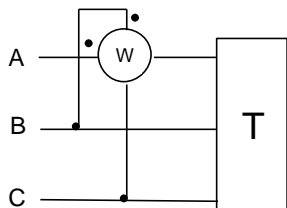
Най-често измерването на реактивна мощност е необходимо именно в трифазните електрически вериги. Възможни са два подхода:

- да се използват еднофазни ватметри за *реактивна мощност*, които се включват както ватметрите в разгледаните вече *схеми за активна мощност*. Поради недостатъците на ватметрите за реактивна мощност този подход не се предпочита.

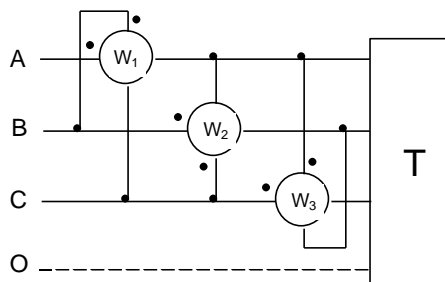
- да се използват еднофазни ватметри за *активна мощност* или *трифазен ватметър за активна мощност*, но напрежителните им намотки да се включат по-специално с цел да се получи допълнителна дефазация от $\pm\pi/2$ между напрежението и тока. Схемите са различни при симетричен и несиметричен товар.

а) измерване на реактивна мощност на симетричен трифазен консуматор

Ако системата линейни напрежения е симетрична и товара е симетричен, независимо дали свързането е звезда или триъгълник, схемата от фиг. 4.2.16 осигурява необходимата допълнителна дефазация. Използваният ватметър е за активна мощност!



Фиг. 4.2.14. Измерване на реактивната мощност на симетричен трифазен товар



Фиг. 4.2.15. Измерване на реактивната мощност на несиметричен трифазен товар при четирипроводна верига

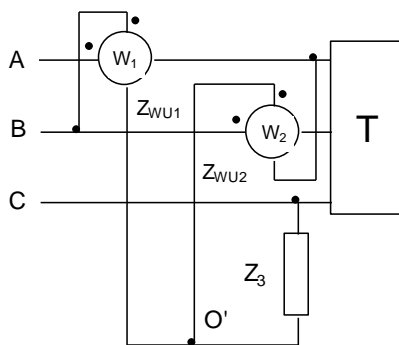
Реактивната мощност на трифазния консуматор при тази схема е:

$$Q_{TP} = \sqrt{3} P_w \quad (4.2.35)$$

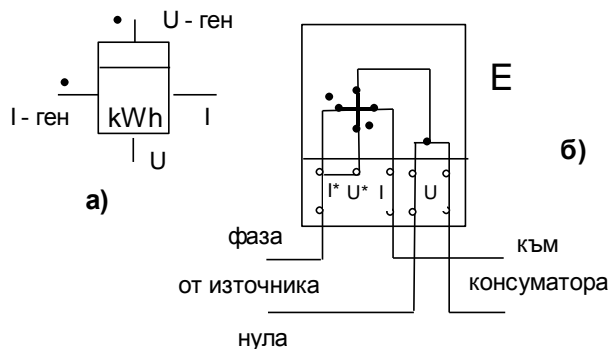
б) измерване на реактивна мощност на несиметричен трифазен консуматор

Ако системата линейни напрежения е симетрична, може да се използват три еднофазни ватметри за активна мощност или триелементен трифазен ватметър за активна мощност, свързани по схемата на фиг. 4.2.15. Реактивната мощност на несиметричния трифазен консуматор е:

$$Q_{TP} = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_{w1} + P_{w2} + P_{w3}) \quad (4.2.36)$$



Фиг. 4.2.16. Измерване на реактивна мощност на несиметричен трифазен консуматор при трипроводна верига



Фиг. 4.2.17. а) - Означение на еднофазен електромер и б) - разположение на изводите му върху клемното табло

Реактивната мощност на трифазния консуматор в този случай е:

$$Q_{TP} = \sqrt{3}(P_{W1} + P_{W2}) \quad (4.2.37)$$

4.2.5.5. Особенности при измерване на електрическа енергия

Измерването на различните видове електрически енергии има голямо значение, защото освен за *технически* цели, много често се извършва с *търговска* цел. Измерването им се извършва основно *пряко* със специализирани за целта уреди – *електромери*. При осъществяването на тези важни измервания трябва да се имат в предвид следните основни принципи:

- всяка от видовете електрически енергии се дефинира (виж формули (4.2.25) и (4.2.26)) като *интеграл по отношение на времето от съответната мощност!* От това следва важният *практически извод: методите, схемите и съображенията при измерване на електрическа енергия са същите както при електрическа мощност. Разбира се вместо ватметри се използват уредите за пряко измерване на електрическа енергия – електромери.*

- другото важно следствие от дефинициите е, че електромерите са *интегриращи* уреди. Това означава, че при тях показанията от измерванията се *натрупват и регистрират*. Затова електромеханичните електромери вместо скала и стрелка, имат *броителен механизъм*, а електронните (статичните) електромери имат или също *броителен механизъм* или *индикатор* и *памет* за съхранение на резултата за измерената енергия до момента.

4.2.5.6. Основни сведения за електромерите

I. Видове и характеристики

За електромерите са валидни всички класификации от точка 4.2.1.2. Най-основната от тях е според устройството им и тя ги разделя на *електромеханични* и *електронни* (статични). Всички те се подразделят на *постояннотокови*, които се използват рядко, и *променливотокови*, които са масовият тип електромери. Последните се подразделят на *еднофазни* и *трифазни*. Освен това биват за *активна* и *реактивна* енергия. Специфична за електромерите класификация, свързана с използването им за търговски цели, е на *еднотарифни* и на *многотарифни*. При многотарифните електрическата енергия се отчита *разделно*, най-често в зависимост от часовата зона, в която се консумира. Те имат отчиташо (регистриращо) устройство за всяка *тарифа*. При електромеханичните многотарифни електромери е необходим *тарифен часовник*, който превключва тарифите. Електронните електромери сами изпълняват тази функция. Постояннотоковите и еднофазните електромери имат два напрежителни и два токови извода (фиг. 4.2.19). По един от тях е генераторен. Те вътрешно са свързани по схема VA (по отношение на консуматора) (фиг. 4.2.19). Изискванията за съпротивленията между двата вида изводи и начина им на свързване са същите като при ватметрите (т. 4.2.5.3). Трифазните електромери може да се разглеждат също като обединени конструктивно в общ уред няколко еднофазни електромера (измервателни механизма - *елемента*). В зависимост от броя им биват *дву-* и *триелементни*. Следователно всеки елемент има по два напрежителни и два токови извода. Така триелементните електромери имат шест напрежителни извода (от които три генераторни) и шест токови извода (и също три генераторни).

Тъй като броячите са циклични, т.е. след запълването им се нулират, практически няма горна граница за измерваната енергия. Затова обхвата на електромерите се задава както и при ватметрите с *обхват по напрежение* U_n (номиналното напрежение на напрежителната верига) и *обхват по ток*. При електромерите обхватът по ток има две компоненти:

- *номинален (основен) ток* – I_b – стойността на тока, спрямо която са установени съответните работни характеристики на електромера;

- *максимален ток* – I_{max} – максималната стойността на тока, при която електромера все още отговаря на изискванията за точност.

Върху електромера тези токове се записват така $I_b - I_{max}$ или така $I_b (I_{max})$, например 10 - 40 А или 10(40) А. Често електромерът от примера се нарича четиристотин процентов, т.е. допускащ четирикратно претоварване. Важен параметър е и номиналната честота f_n .

Обхватът на електромерите се разширява основно с двата вида измервателни трансформатори. Спазва се общият принцип – първичната намотка на измервателния трансформатор се включва където би се включила съответната верига на електромера, ако обхвата му не се разширяваше, а самата верига се включва към изводите на вторичната намотка на трансформатора.

!!! Напрежителните намотки на електромерите са включени *винаги* към *номиналното напрежение*, докато токът през токовите намотки *се изменя от нула до максималния ток*, в зависимост от режима на работа на товара !!! Ако електромерът отчита при липса на товарен ток, значи има *самоход*, което е недопустимо.

II. Електромеханични електромери

Постояннотоковите електромеханични електромери са с *електродинамичен* (по рядко *магнетоелектрически*) измервателен механизъм. Променливотоковите електромеханични електромери, които са най-разпространени, са с *индукционен* измервателен механизъм. За него е характерно, че може да работи *само при променлив ток*. Електромеханичните електромери се характеризират с *преводно число* N , което показва колко оборота трябва да направи диска на електромера, за да се отчете единица електрическа енергия – при електромерите за активна енергия се дава в обороти / kWh, при електромерите за реактивна енергия – в обороти / kVAr.h. От преводното число се изчислява *номиналната константа* на електромера

$$k_H = \frac{1}{N} \left[\frac{\text{kW.h(kVAr.h)}}{\text{tr}} \right] = \frac{3600 \cdot 10^3}{N} \left[\frac{\text{W.s(kVAr.s)}}{\text{tr}} \right] . \quad (4.2.38)$$

Измервателните единици в малките скоби са за реактивна енергия. Ако за интервала, през който се отчита енергията, дискът на електромера направи n оборота, то измерената стойност, която ще бъде отчетена директно от брояча (индикатора) е:

$$W(W_p) = k_H n . \quad (4.2.39)$$

III. Електронни (статични) електромери

При тях измервателният механизъм е изграден с електронни елементи. В зависимост от това какъв е вида на обработваните сигнали, биват *аналогови* (например изградени с преобразуватели на Хол) и *цифрови*, при които входните напрежения и токове се преобразуват в дискретен вид с помощта на висококачествени аналогоцифрови преобразуватели (АЦП) и по-нататъшната обработка на сигналите става в цифров вид. Винаги накрая информацията за електрическата енергия се преобразува в брой импулси, поради което тяхната *константа* се дава в киловатчас (киловарчас) за импулс, но често се дава и реципрочната стойност – импулсите за киловатчас (киловарчас). При някои електронни електромери се използват механични (със зъбни колела) броятелни механизми също както и при електромеханичните електромери – в известен смисъл те са *хибридни*. Напълно електронните електромери имат *цифров индикатор* и *енергонезависима електронна памет*. Все по-разширяваща се тенденция е цифровите електронни електромери да могат да измерват още различните мощности (активна, реактивна и пълна), при това ако е трифазен да показва както съответната обща трифазна мощност, така и мощностите на отделните фази. Също така след превключване да показват ефективните стойности на напрежението и тока (при трифазни – линейните и фазните), на фактора на мощността и др. Увеличават се и електронните електромери, пригодени измервателната информация да се предава телеметрично.

Класът на точност на електронните електромери е по-висок от този на електромеханичните и обикновено измерват и други величини освен енергията, но са доста по-скъпи.

4.2.5.7. Измерване на електрическа енергия в еднофазни променливотокови вериги

!!! В еднофазни вериги електрическата енергия се измерва *пряко* с еднофазни електромери – електромеханични и електронни !!!

I. Измерване на активна енергия.

Използват се и двата вида електромери - електромеханични и електронни. По правило се свързват по схема VA (фиг. 4.2.10а). Електромерът се свързва *пряко*, както е свързан ватметърът на фиг. 4.2.10а, и чрез токов и напрежителен измервателен трансформатор, както е свързан ватметърът на фиг. 4.2.12 – и в двете схеми символът W се замества с kWh .

II. Измерване на реактивна енергия.

В еднофазни вериги реактивна енергия се измерва *рядко*. Поради това и електромеханични еднофазни електромери за реактивна енергия не са често използвани. Обаче много електронни електромери са комбинирани – измерват както активна, така и реактивна енергия.

4.2.5.8. Измерване на електрическа енергия в трифазни променливотокови вериги

I. Измерване на активна енергия

Както и при измерване на електрическа мощност, схемите за измерване се различават от една страна в зависимост от това симетричен или несиметричен е товара и от друга страна дали веригата е трипроводна или четирипроводна. Ватметрите от разгледаните схеми за измерване на електрическа мощност може да се заменят или с еднофазни електромери, или както по-често се прави, с *трифазни електромери с различен брой елементи*.

а) измерване на активна енергия на симетричен трифазен консуматор

Поради симетрията е достатъчен един еднофазен или едноелементен трифазен електромер, който се свързва по схемите от фиг. 4.2.11а,б, в зависимост от това четирипроводна ли е веригата и има ли достъп до звездния център при трипроводна верига.

б) измерване на активна енергия на несиметричен трифазен консуматор

В четирипроводна верига се използват *триелементни* електромери, свързани по схемата от фиг. 4.2.12, а при трипроводна верига – с *двуелементни* електромери, свързани по схемата от фиг. 4.2.13. И в двата случая *няма грешка от несиметрия* нито на напрежения, нито на токовете. Използват се както електромеханични, така и електронни електромери.

II. Измерване на реактивна енергия

а) измерване на реактивна енергия на симетричен трифазен консуматор

Както и при активна енергия е достатъчен или един еднофазен електромер за реактивна енергия, свързан както този за активна енергия (фиг. 4.2.13), или за активна енергия, но свързан по схемата от фиг. 4.2.16.

б) измерване на реактивна енергия на несиметричен трифазен консуматор

Използват се трифазни електромери (електромеханични и електронни), които се подразделят на:

Според конструктивното изпълнение има *три групи*:

Първа група - Обикновени електромери за активна енергия, приспособени да измерват реактивна енергия, чрез *по-различно включване на напрежителните им вериги*;

Втора група - Също обикновени електромери за активна енергия, но приспособяването им за измерване реактивна енергия става чрез *добавяне допълнителни елементи* – автотрансформатори, допълнителни резистори и т.н.

Трета група - Електромери, *специално изработени да измерват реактивна енергия*.

Според изискванията за симетрия във веригата биват *три категории*:

A. Електромери, измерващи точно при *всякаква несиметрия*;

B. Електромери, измерващи точно само при *проста несиметрия* – само на токовете или само на напреженията;

B. Електромери, измерващи точно само при *пълна симетрия* – и на токовете, и на напреженията.

Почти винаги системата линейни напрежения е симетрична или с незначителна несиметрия, така че практически е налице проста несиметрия.

При четирипроводна верига се използват *трифазни триелементни електромери*, чиито елементи са свързани по схемата от фиг. 4.2.15. Тези електромери са от *първа група* и от *втора категория*.

При трипроводна верига се използват *трифазни двуелементни електромери*, чиито елементи са свързани по схемата от фиг. 4.2.16. Тези електромери са от *втора група* и от *втора категория*.

!!! Почти всички електромери за реактивна енергия имат допълнителна грешка, когато напрежението и/или токът са несинусоидални **!!!**