

Трансформатори _

5.1. Общи сведения

Определение.

Трансформаторът е статично електромагнитно устройство, което служи за преобразуване на една (първична) променливотокова система в друга (вторична).

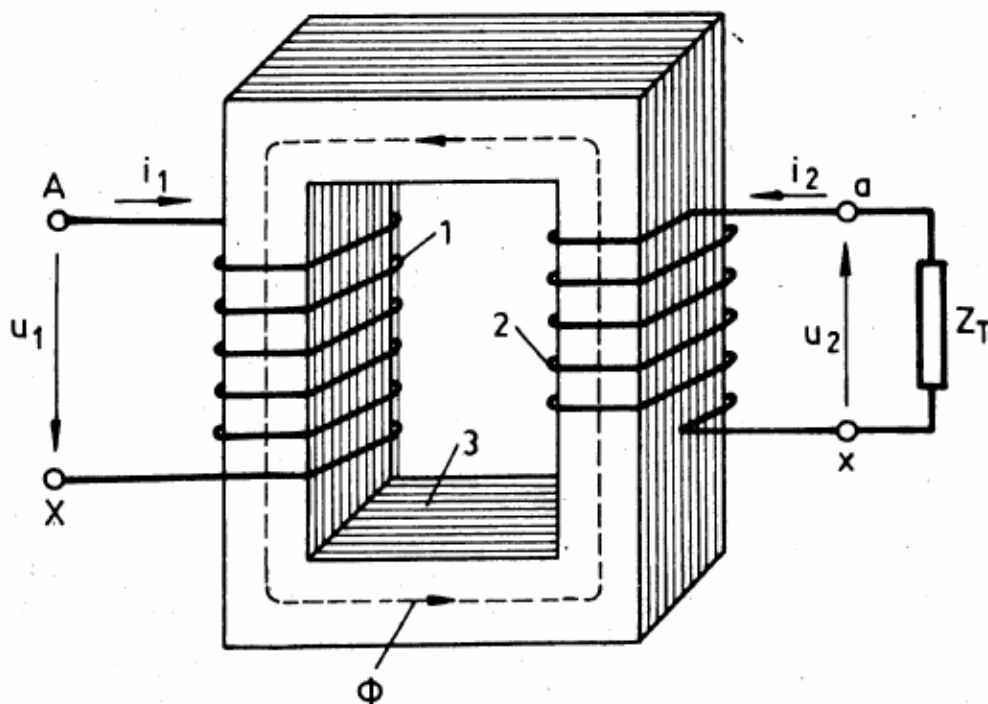
В общ случай вторичната променливотокова система може да се отличава от първичната по някои параметри:

- стойност на напрежението и тока,
- брой на фазите,
- честота,
- форма на кривата на напрежението (тока).

Най-често трансформаторът служи за преобразуване на променлив ток с едно напрежение в променлив ток с друго напрежение, като:

- броят на фазите,
- честотата
- формата на кривата на напрежението и тока остават непроменени.

Устройство



Фиг. 5.1. Принципно устройство на еднофазен дву-намотъчен трансформатор

Най-простият трансформатор (фиг. 5.1) се състои от **първична намотка 1**, към която се подава променливотокова енергия от захранващата мрежа, и **вторична намотка 2**, от която променливотоковата енергия се подава на товара с импеданс Z_T . За усилване на електромагнитната връзка между намотките обикновено те се разполагат на феромагнитен **магнитопровод 3**.

При честоти до **150 Hz** магнитопроводът се изработва от листовата електротехническа стомана с дебелина 0,35—0,50 mm. При по-високи честоти се използва по-тънка листовата стомана.

При честоти над 1 kHz се използват феритни магнитопроводи, които се изработват чрез пресоване. При честоти над 100 kHz се използват трансформатори без феромагнитен магнитопровод (въздушни трансформатори).

Величините, които се отнасят за първичната намотка, се означават с **индекс 1**, а величините, които се отнасят за вторичната намотка — с **индекс 2**.

Принцип на действие.

При включване на първичната намотка на трансформатора (фиг. 5.1) към мрежа със синусоидно напрежение u_1 през намотката преминава ток който възбужда магнитен поток Φ , затварящ се през магнитопровода (при пренебрегване на незначителните потоци на разсейване). Потокът се изменя синусоидно във времето и индуктира е. д. н. e_1 в първичната и е. д. н. e_2 във вторичната намотка. При включване на товар към вторичната намотка през нея ще преминава ток i_2 и на изводите ѝ ще се установи напрежение u_2 . Резултантният поток в магнитопровода вече се създава от токовете в двете намотки.

Нека w_1 и w_2 са броят на навивките на двете намотки, а E_1 и E_2 — индуктираните в тях е. д. н. Понеже двете намотки обхва- * щат един и същ магнитен поток, във всяка навивка на вторичната намотка ще се индуктира същото е. д. н., както и във всяка навивка на първичната. В такъв случай е. д. н. на двете намотки ще се отнасят едно спрямо друго както броят на навивките им, т. е.

$$(5.1) \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k$$

където k се нарича **ко е ф и ц и е н т н а т р а н с ф о р м а ц и я**.

Ако се пренебрегнат падовете на напрежение в намотките, които не превишават няколко процента от номиналните стойности на напреженията, то

$$(5.2) \quad E_1 \approx U_1, \quad E_2 \approx U_2 \text{ и}$$
$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2} = k.$$

Вижда се, че чрез подходящ **подбор на броя на навивките** на намотките може да се получи желаното съотношение на напреженията.

Ако се пренебрегнат загубите в намотките и магнитопровода на трансформатора и се приеме, че коефициентите на мощността \cos_1 и \cos_2 са равни, може да се запише

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2,$$

откъдето

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1}{k}$$

Следователно токовете се изменят **обратнопропорционално** на напреженията.

Видове трансформатори и области на приложение.

Класифиция на трансформаторите - по няколко признака:

- 1) според **броя на фазите** — еднофазни и многофазни (най- често трифазни);
- 2) според **броя на намотките** за фаза — двунамотъчни и многонамотъчни;
- 3) според **отношението на напреженията** — повишаващи и понижаващи;
- 4) според **вида на охлаждането** — с въздушно охлаждане (сухи трансформатори) и с маслено охлаждане (маслени трансформатори);
- 5) според **предназначението** — силови и специални.

С и л о в и трансформатори се използват за трансформиране на електрическа енергия в електрическите мрежи. Имат най- различни мощности и напрежения, като достигат мощност неколкокостотин хиляди kVA и напрежение до 500 kV.

Различни видове **специални** трансформатори се използват за токоизправители, за електрически пещи, за електрозаварка, за измерване на ток и напрежение и др.

Към специалните се отнасят и трансформаторите, които се използват в автоматични, електромеханични, изчислителни, радиотехнически, импулсни и други устройства. Обикновено това са **трансформатори с малка мощност (до 1000 VA)**.

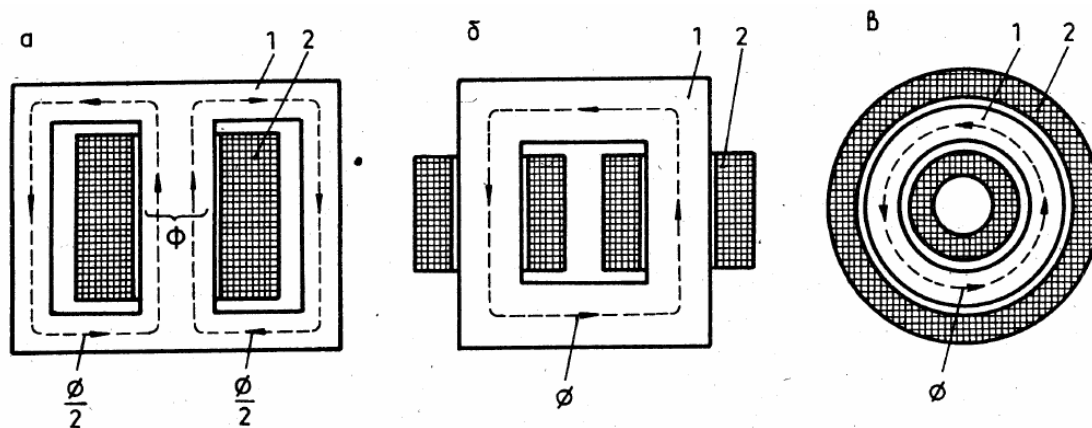
Устройство на трансформаторите.

Ще се разгледа устройството на **маломощните трансформатори**.

Основните части на трансформатора са **магнитопроводът** и **намотките**. Тези части на магнитопровода, около които се поставят намотките, се наричат **ядра**, а частите, които служат за затваряне на магнитната система, се наричат **яреми**.

В зависимост от конфигурацията на магнитната система еднофазните трансформатори се разделят на

- **мантийни (фиг. 5.2 а),**
- **ядрени (фиг. 5.2 б) и**
- **тороидни (фиг. 5.2 в).**

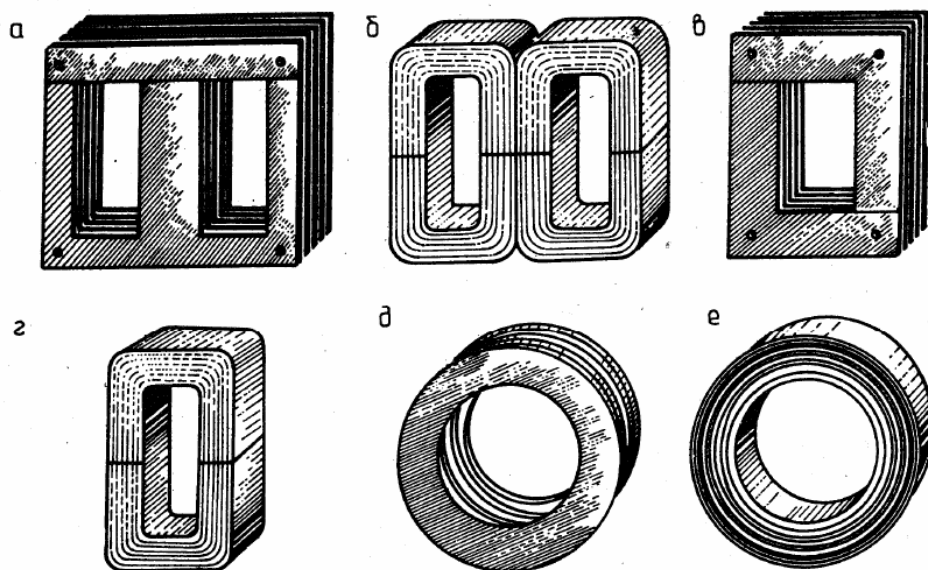


Фиг. 5.2. Типове еднофазни трансформатори

а — мантиен; *б* — ядрен; *в* — тороидален; *1* — магнитопровод; *2* — намотки

Магнитопроводите на всеки от посочените три вида трансформатори могат да бъдат **пластинчати** (фиг. 5.3 а, в, 5) или **лентови** (фиг. 5.2 б, г, е).

Пластинчатите магнитопроводи се набират от пластини, които са шанцовани от листовата електротехническа стомана с **дебелина 0,2—0,5 mm**.



Фиг. 5.3. Магнитопроводи на маломощни еднофазни трансформатори
а — мантиен пластинчат; **б** — мантиен лентов; **в** — ядрен пластинчат; **г** — ядрен лентов; **д** — тороидален пластинчат; **е** — тороидален лентов

Пластините могат да бъдат:

Ш-образни (фиг. 5.3 а), обикновено се набират чрез преплитане и се стягат с изолирани шпилки, които преминават през предвидените за целта отвори. Пластините са изолирани с окисен слой или лак.

Г-образни (фиг. 5.3 в),

О-образни (фиг. 5.3 д).

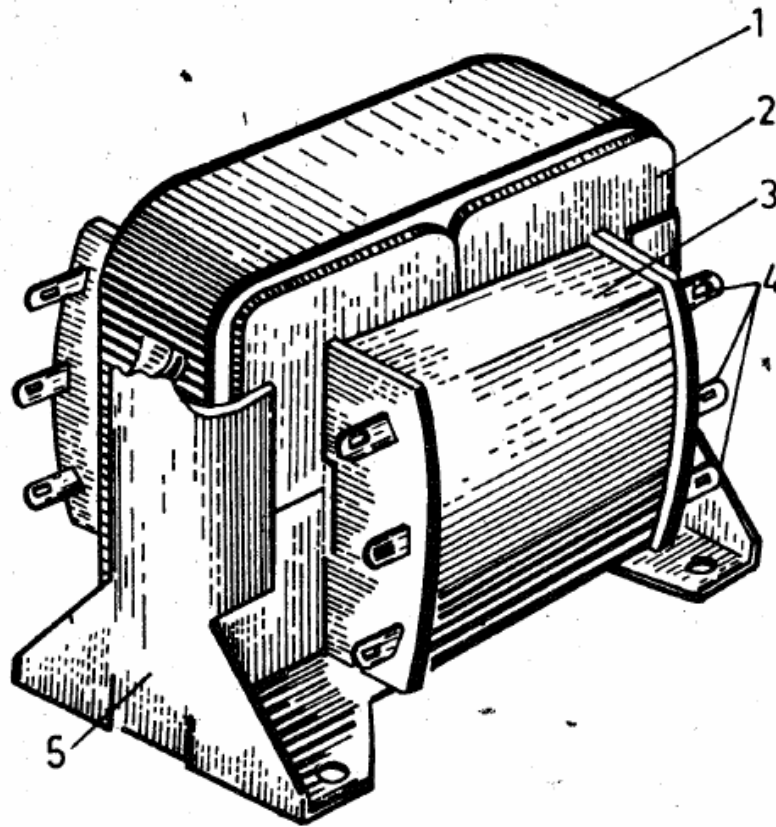
Лентовите магнитопроводи се изработват чрез навиване на тясна лента от студеновалцована електротехническа стомана или специални желязо-никелови сплави с **дебелина 0,08—0,35 mm**. Предварително лентата е покрита с изолиращ и слепващ слой.

Мантийните и ядрените магнитопроводи (фиг. 5.3 б, г) обикновено се разрязват на две половини, за да може да се поставят намотките. След това двете части се притягат с метални ленти.

Тороидните магнитопроводи се изпълняват неразглобяеми.

Намотките на маломощните трансформатори се изпълняват от **емайлиран меден проводник с кръгло сечение**. Най-често те са **многослойни**, като се навиват върху макара от електрокартон или текстолит. Напоследък се използват и монолитни пластмасови макари. Между **отделните слоеве** и отделните намотки се поставя **хартиена или друг вид изолация**.

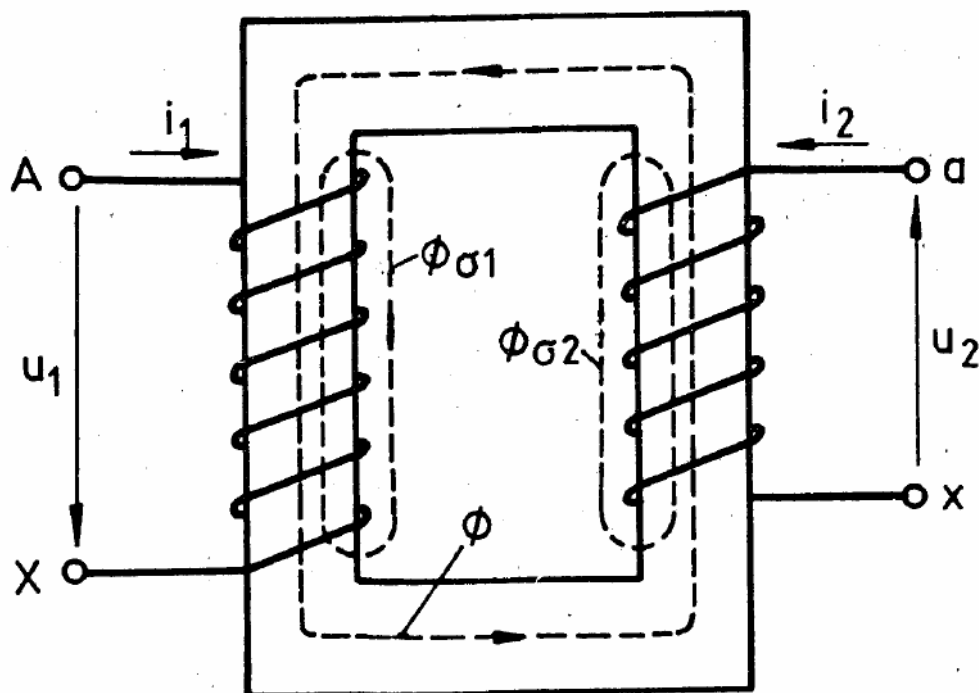
На **фиг. 5.4** е показан общ вид на **еднофазен трансформатор** с малка мощност.



Фиг. 5.4. Общ вид на еднофазен трансформатор с малка мощност
1 — притягаща лента; *2* — магнитен лентов магнитопровод; *3* — намотки; *4* — изводи; *5* — стойка

Основни уравнения на еднофазен трансформатор

Уравнения на трансформатора за моментните стойности



Фиг. 5.5. Принципна електромагнитна схема на еднофазен двунамотъчен трансформатор

Разглежда се принципната електромагнитна схема на трансформатора, показана на фиг. 5.5. На нея с u_1, u_2, i_1, i_2 са означени моментните стойности на първичните и вторичните напрежения и токове.

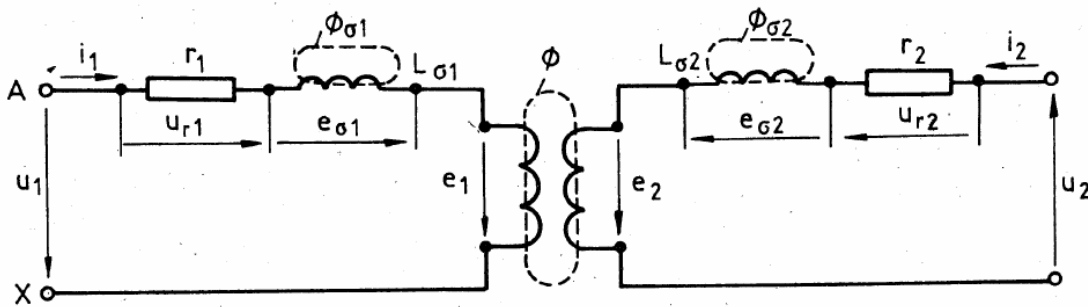
Токовете i_1 и i_2 , преминаващи през съответните намотки с брой на навивките w_1 и w_2 , създават първичното и вторичното м. д. н. $i_1 w_1$ и $i_2 w_2$. Тяхната сума дава резултатното м. д. н.

$$(5.4) \quad i_m w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2.$$

Токът i_m се нарича **намагнитващ ток**, който, ако преминава през първичната намотка би създавал м. д. н., равно на сумата от първичното и вторичното м. д. н. Намагнитващият ток добива реален смисъл при празен

ход (отворена вторична намотка). Тогава преминаващият през първичната намотка ток е равен на намагнитващия ($i_1 = i_m$).

Резултатното м.д.н. $i_m W_1$ възбужда **основни магнитен поток Φ** , който се затваря през стоманата на магнитопровода. Той се вплита с всички навивки на двете намотки, т. е. това е поток на взаимна индукция.



Фиг. 5.6. Схематично представяне на еднофазен двунамотъчен трансформатор

Моментната стойност на основния магнитен поток е

$$(5.5) \quad \Phi = \frac{i_m \omega_1}{R_M},$$

където R_M е магнитното съпротивление на магнитопровода.

Наред с основния магнитен поток в трансформатора винаги съществуват и потоци на разсейване $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, които частично се затварят през въздуха. Картината на тяхното разпределение е много сложна. Действителната картина заменяме с еквивалентна на нея опростена, както е показано на фиг. 5.5, където линиите на потока $\Phi_{\sigma 1}$ обхващат всички навивки само на първичната намотка, а линиите на потока $\Phi_{\sigma 2}$ - всички навивки само на вторичната намотка.

Потокът $\Phi_{\sigma 1}$ е пропорционален на i_1 , а $\Phi_{\sigma 2}$ - на i_2 .

Потоците на разсейване са много малки в сравнение с основния поток, тъй като магнитната проницаемост на стоманата е много по-голяма от магнитната проницаемост на въздуха.

Независимо от това потоците на разсейване оказват съществено влияние върху техническите показатели и характеристиките на трансформатора

Основният магнитен поток индуцира в двете намотки е. д. н. с моментни стойности

$$(5.6) \quad \begin{cases} e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt}; \\ e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt}. \end{cases}$$

Моментните стойности на е. д. н., индуцирани в двете намотки от потоците на разсейване, се определят от

$$(5.7) \quad \begin{cases} e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}; \\ e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}, \end{cases}$$

където $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ са индуктивностите на двете намотки, които съответствуват на потоците на разсейване $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$.

На фиг. 5.6, r_1 и r_2 са активните съпротивления на двете намотки, а $u_{r1} = i_1 \cdot r_1$ и $u_{r2} = i_2 \cdot r_2$ - съответните падове на напрежение. Със стрелки са показани условните положителни посоки на величините.

Като се приложи вторият закон на Кирхоф за контурите на първичната и вторичната намотка, се получава $\sum u = \sum e$

$$\begin{cases} u_1 - u_{r1} = -e_1 - e_{\sigma 1}; \\ u_2 + u_{r2} = e_2 + e_{\sigma 2}, \end{cases}$$

откъдето

$$\begin{cases} u_1 = -e_1 + u_{r1} - e_{\sigma 1} = -e_1 + i_1 r_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}; \\ e_2 = u_2 + u_{r2} - e_{\sigma 2} = u_2 + i_2 r_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}. \end{cases}$$

Комплексна форма на уравненията на трансформатора

Най-често напреженията и токовете в трансформатора са синусоидни функции на времето с кръгова честота $\omega = 2\pi f$, където f — честотата на захранващото напрежение. Единствено намагнитващия ток i_M не е синусоиден, което следва от (5.5). Поради това, че магнитното съпротивление R_M е нелинейно, при синусоиден магнитен поток Φ токът i_u няма да бъде синусоиден. Затова е необходимо не синусоидния ток да се замени с еквивалентна синусоида. Тогава основните уравнения на трансформатора (5.8) може да се запишат в комплексна форма

$$(5.9) \quad \begin{cases} U_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\omega L_{\sigma 1} \dot{I}_1; \\ \dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2 + j\omega L_{\sigma 2} \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 \omega_1 = \dot{I}_M \omega_1 + (-\dot{I}_2 \omega_2), \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1; \\ \dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2 + j\dot{I}_2 x_2; \\ \dot{I}_1 \omega_1 = \dot{I}_M \omega_1 + (-\dot{I}_2 \omega_2); \end{cases}$$

където

$$x_1 = \omega L_{\sigma 1} \text{ и } x_2 = \omega L_{\sigma 2}$$

са **индуктивните съпротивления на разсейване** на **първичната и вторичната намотка**, а Z_1 и Z_2 — съответните импеданси.

Комплексна форма на записване на (5.6) е:

$$(5.10) \quad \begin{cases} \dot{E}_1 = -j\omega \omega_1 \frac{\dot{\Phi}_m}{\sqrt{2}} = -j2\pi f \omega_1 \frac{\dot{\Phi}_m}{\sqrt{2}} = -j\sqrt{2} \pi f \omega_1 \dot{\Phi}_m; \\ \dot{E}_2 = -j\omega \omega_2 \frac{\dot{\Phi}_m}{\sqrt{2}} = -j2\pi f \omega_2 \frac{\dot{\Phi}_m}{\sqrt{2}} = -j\sqrt{2} \pi f \omega_2 \dot{\Phi}_m, \end{cases}$$

където Φ_m е максималната стойност на магнитния поток.

От (5.10) се вижда, че индуктираните **е. д. н.** в двете намотки имат ефективни стойности

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{2} \pi f \omega_1 \Phi_m = 4,44 f \omega_1 \Phi_m; \\ E_2 &= \sqrt{2} \pi f \omega_2 \Phi_m = 4,44 f \omega_2 \Phi_m \end{aligned}$$

и изостават по фаза от магнитния поток на 90° .

Комплексната форма уравнение (5.5) е

$$(5.12) \quad \dot{\Phi}_m = \frac{\sqrt{2} I_m \omega_1}{R_m},$$

$$(5.13) \quad \begin{cases} \dot{E}_1 = -j \frac{\omega \omega_1^2}{R_m} I_m = -j x_{r1} I_m; \\ \dot{E}_2 = -j \frac{\omega \omega_1 \omega_2}{R_m} I_m = -j x_{12} I_m. \end{cases}$$

$$x_{r1} = \frac{\omega \omega_1^2}{R_m}$$

е главното индуктивно съпротивление на пълвичната намотка:

$$x_{12} = \frac{\omega \omega_1 \omega_2}{R_m}$$

индуктивното съпротивление на взаимна индукция между двете намотки

Приведени величини в трансформатора

За облекчаване на анализа на процееите в трансформатора, нагледност при построяване на векторните диаграми и за представяне на трансформатора с еквивалентна заместваща схема всички негови намотки се *привеждат* към еднакъв брой навивки.

Обикновено вторичната намотка се привежда към броя на навивките на първичната намотка.

Да се приведе вторичната намотка към първичната означава действителната намотка с брой на навивките w_2 да се замени с фиктивна или приведена намотка с брой на навивките $w'_2 = w_1$. При това всички вторични величини се привеждат така, че енергийните съотношения да се запазят. Приведените величини ще означаваме с горен индекс прим ($'$).

Тогава

$$E'_2 = \sqrt{2} \pi f w'_2 \Phi_m = \sqrt{2} \pi f w_1 \Phi_m = E_1$$

следователно приведеното вторично е. д. н. е

$$(5.16) \quad E'_2 = E_2 \frac{w_1}{w_2} = E_2 k = E_1.$$

Аналогично приведеното вторично напрежение е

$$(5.17) \quad U'_2 = U_2 \frac{w_1}{w_2} = U_2 k.$$

М.д.н. на реалната и приведената намотка трябва да са равни:

$$I_2 w_2 = I'_2 w'_2 = I'_2 w_1,$$

откъдето приведеният вторичен ток

$$(5.18) \quad I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = I_2 \frac{1}{k}$$

Електрическите загуби в **реалната и приведената намотка** трябва да са равни:

$$I_2^2 r_2 = I_2'^2 r_2'$$

откъдето **приведеното активно съпротивление** на вторичната намотка е

$$(5.19) \quad r_2' = r_2 k^2.$$

Като се излезе от постоянството на отношенията

$$\frac{x_2'}{r_2'} = \frac{x_2}{r_2},$$

получава се **приведеното индуктивно съпротивление на разсейване** на вторичната намотка

$$(5.20) \quad x_2' = x_2 k^2.$$

приведеното пълно съпротивление на вторичната намотка е

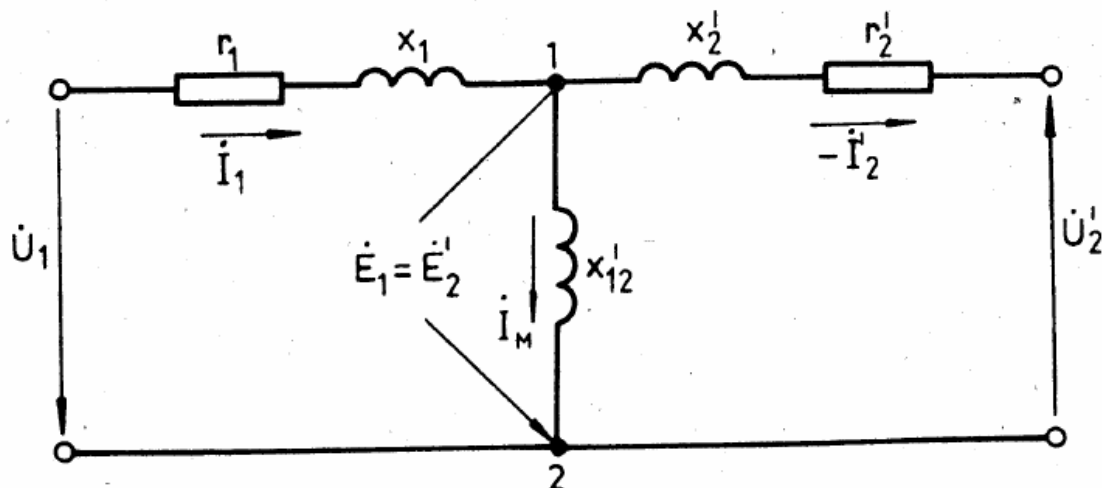
$$(5.21) \quad z_2' = z_2 k^2.$$

Системата уравнения (5.9) за приведения трансформатор добива вида

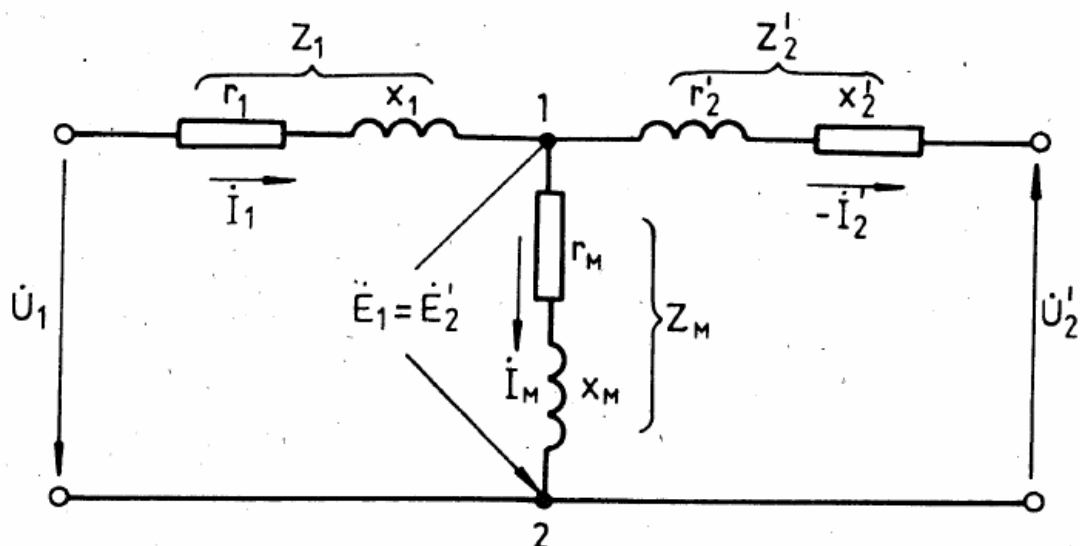
$$(5.22) \quad \begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1 & ; \\ \dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 x_2 & ; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2) & ; \end{cases} \quad \boxed{\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \\ \dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_2; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2). \end{cases}}$$

Заместващи схеми на трансформатора

Изследването на процесите в електромагнитно свързани вериги значително се облекчава и става по-нагледно, като се използват **заместващи схеми**, при които електромагнитните връзки между веригите се заменят с електрически. Заместващата схема на трансформатора се съставя въз основа на изведените уравнения за приведения трансформатор.



Фиг. 5.7. Заместваща схема на трансформатора без отчитане на загубите в стоманата



Фиг. 5.9. Заместваща схема на трансформатора с отчитане на загубите в стоманата

$$(5.25) \quad r_c = \frac{E_1^2}{P_c} \cdot$$