

Ministerul Educației al Republicii Moldova
Universitatea de Stat „Alec Russo”
Facultatea „Tehnică, Fizică, Matematică și Informatică”
Catedra „Fizică și metodică predării fizicii”

Valeriu ABRAMCIUC

ELECTROTEHNICĂ

Curs universitar

Pentru studenții specialității „Fizică și informatică”

BĂLȚI, 2010

INTRODUCERE

Aplicațiile tehnice ale fenomenelor electromagnetice au o importanță din ce în ce mai mare în toate sectoarele economiei naționale și au devenit o componentă firească și necesară în cele mai diferite domenii de activitate. Utilizarea largă a electricității, pătrunderea măsurărilor și acționărilor electrice în toate domeniile, marea importanță a automatizărilor și a tehnicilor de calcul electronic, impun ca fiecare profesor, independent de locul de activitate (liceu, colegiu, gimnaziu etc.) să cunoască temeinic principalele probleme teoretice din domeniul electromagnetismului și, în special, cele cu caracter aplicativ.

Cursul universitar “Electrotehnică” este destinat studenților facultăților fizico-tehnice ale instituțiilor superioare de învățământ, specialitatea "Fizică și informatică", însă poate fi util și pentru alte specialități înrudite. Programul de studiu prevede, pentru această disciplină, 30 ore prelegeri și 30 ore laborator, cursul promovându-se în semestrul cinci.

Obiectivul principal al cursului normativ universitar “Electrotehnică” este studiul fenomenelor electrice și magnetice din punct de vedere al aplicațiilor tehnice. Aceasta impune ca fiecare specialist să cunoască temeinic legile câmpului electromagnetic, metodele de calcul ale circuitelor electrice, folosirea acestora în diverse situații practice.

Pentru viitorul specialist o importanță deosebită o au lucrările de laborator, în cadrul cărora el trebuie să-și dezvolte deprinderi de cercetare a caracteristicilor instalațiilor electrotehnice și a fenomenelor electromagnetice, să posede deprinderi practice de montaj a circuitelor electrice, de efectuare a diferitelor măsurări, de prelucrare a datelor experimentale, de reprezentare grafică și interpretare a rezultatelor.

În cadrul cursului dat se folosesc cunoștințele obținute la disciplinele studiate la liceu și în semestrele precedente, îndeosebi “Fizica” (compartimentul “Electricitate și magnetism”) și “Matematica”.

Cursul prezent constituie opt capitole principale și reprezintă baza teoretică generală, care se concretizează separat în cadrul fiecărei lucrări de laborator.

BIBLIOGRAFIE

1. Ursea P.C., Rouădedeal F., Ursea B.P. Electrotehnica aplicată. Ghidul electrotehnicianului. - București, Editura Tehnică, 1995. – 333 p. [cota 621.3 U84]
2. Saimac A., Cruceru C. Electrotehnica. - București, 1981.
3. Șora C. Bazele electrotehnicii. - București, 1982.
4. Novac I., Micu E., Atanasiu Gh. ș. a. Mașini și acționări electrice. - București, 1982.
5. Tunsoiu Gh. Seracin E., Saal C. Acționări electrice. - București, 1982.
6. Isac E. Măsurări electrice și electronice. - București, 1986.
7. Electrotehnica generală. Sub redacția lui Blajchin A. T. - Chișinău, 1971.
8. Попов В. С., Николаев С. А. Electrotehnica. - Chișinău, 1970.
9. Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника. - Москва, 1983.
10. Электротехника: Общий курс. /Под ред. Пантюшина В. С. - Москва, 1959.
11. Прищеп Л. Г. Учебник сельского электрика. - Москва, 1982.
12. Чаткин М. Р., Бодин А. П. Электротехника и электрификация сельского хозяйства. - Москва, 1963.
13. Камнев В.Н. Чтение схем и чертежей электроустановок. Изд. 2-е, перераб. и доп.. М.: Высшая школа, 1990. – 144 с. [cota 607(075) K184]
14. Каминский Е.А. Практические приёмы чтения схем электроустановок. М., Энергоатомиздат, 1988. – 368 с. [cota 6П2.1 K182]
15. Евсюков А. А. Электротехника. - Минск, 1979.
16. Китунович Ф. Г. Электротехника. - Минск, 1982.
17. Иванов И. И., Равдоник В. С. Электротехника. - Москва, 1984.
18. Бараш Н. В., Бладько В. М. Общая электротехника. - Москва, 1968.
19. Арутюнов В.О. Электрические измерительные приборы и измерения. М. – Л., Государственное энергетическое издательство, 1958. – 631 с. [cota 6П2.108 A86]
20. Шульц Ю. Электроизмерительная техника. 1000 понятий для практиков: Справочник. - Москва, 1989.

21. Шпаннеберг Х. Электрические машины. 1000 понятий для практиков: Справочник. - Москва, 1988.
22. Вольдек А. И. Электрические машины. - Ленинград, 1974.
23. Preda M., Cristea P., Manea Fl. ș. a. Probleme de electrotehnică și mașini electrice. - București, 1982.
24. Cristea P. Aplicații și probleme de electrotehnică teoretică. - București, 1977.
25. Гайях Т., Мелузин Г., Бернат И. Простейшие электротехнические расчеты. - Москва, 1968.
26. Поляков В. А. Практикум по электротехнике. - Москва, 1964.
27. Лабораторные работы по электротехнике. /Под ред. Пантюшина В. С. - Москва, 1977.
28. Рекус Г. Г., Чесноков В. Н. Лабораторные работы по электротехнике и основам электротехнике. - Москва, 1989.
29. Усик В. П., Вахольский Б. М. Лабораторные работы по общей электротехнике. - Москва, 1972.
30. Атабеков В. Б., Живов М. С. Монтаж осветительных электроустановок. - Москва, 1979.
31. Лепаев Д. А., Штехман Н. Я. Бытовые электроприборы. - Москва, 1973.

Электротехника – это наука, изучающая электрические и магнитные явления и применение их на практике

ГЛАВА I. ОДНОФАЗНЫЙ СИНУСОИДАЛЬНЫЙ ТОК

1.1. Основные понятия

Назовём *переменным током* - ток, изменяющийся со временем.

Можно выделить три вида переменного тока:

а) ток остаётся постоянным по величине, но изменяется по направлению (**рис.1.1**);

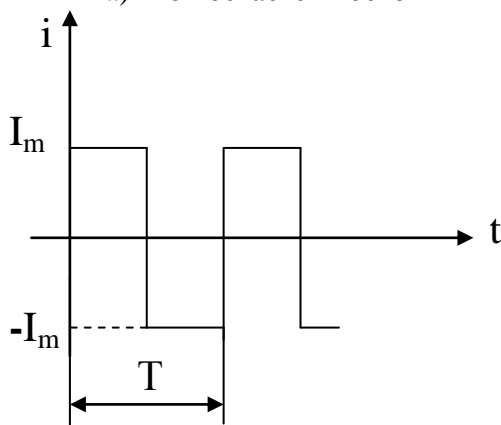


Рис. 1.1

б) ток остаётся постоянным по направлению, но изменяется по величине. На **рис. 1.2** представлен такой переменный ток, при котором значение тока в любой момент времени сила тока является положительной или равной нулю;

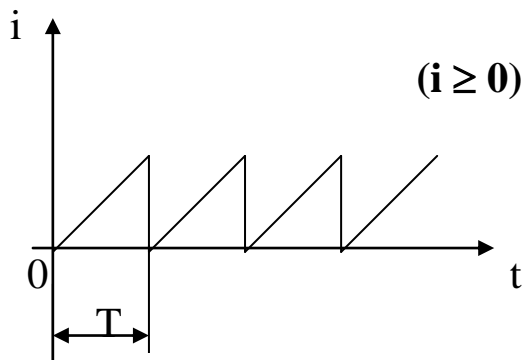


Рис. 1.2

с) ток изменяется и по величине, и по направлению. Такой переменный ток представлен на **рис. 1.3**;

Далее будем изучать не все переменные токи, а только синусоидальные (косинусоидальные) токи - гармонические токи.

Преимущества синусоидальных токов по сравнению с остальными переменными токами:

1. Математический расчет цепей и изложение синусоидальных токов проще.
2. Если ЭДС или напряжение синусоидально, то и токи являются синусоидальными.
3. Если ЭДС не синусоидально, то в

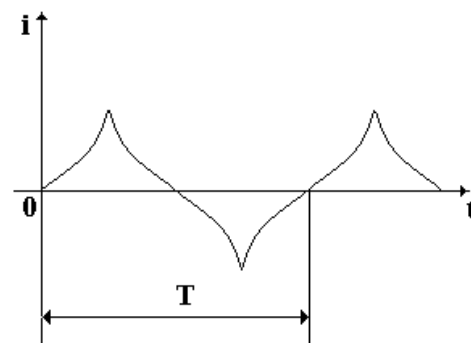


Рис. 1.3

1.2. Способы представления синусоидальных величин

I. Аналитическое представление (с помощью математического выражения)

Пусть дано аналитическое представление (с помощью математического выражения). ток

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i), [A],$$

где: I - мгновенное значение тока;

I_m - амплитуда силы тока (максимальное положительное его значение);

$(\omega t + \varphi_i)$ - фаза или аргумент функции, единицы измерения [grad] или [rad];

ω - циклическая частота;

φ_i - начальная фаза тока, которая равна значению силы тока в момент времени $t = 0$;

t - время.

Любая несинусоидальная но периодическая функция может быть разложена на алгебраическую сумму синусоидальных функций различной частоты (теорема Фурье), в общем виде:

$$A = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + A_k \sin(k\omega t + \varphi_k);$$

где: A_0 - постоянная;

A_1, A_2, \dots, A_k - амплитуды соответствующих гармоник;

$\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k$ - начальные фазы соответствующих гармоник.

II. Графическое представление.

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i), A$$

Например:

$$i = 2 \sin(314t + \pi/2) A$$

где $I_m = 2A$;

$$\omega = 314 \frac{\text{rad}}{\text{s}};$$

$$\varphi_i = \frac{\pi}{3} \text{ rad} = 60^\circ;$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 50 \text{ Hz};$$

$$T = \frac{1}{f} = 0,02 \frac{1}{\text{s}}.$$

График данной величины представлен на **рис. 1.4**.

Если начальная фаза положительна, то график сдвинут влево относительно оси ординат на соответствующий угол. Если начальная фаза отрицательна, то график сдвинут вправо. Если на одном и том же графике представлен и ток и напряжение, то называют разностью фаз между током и напряжением величину:

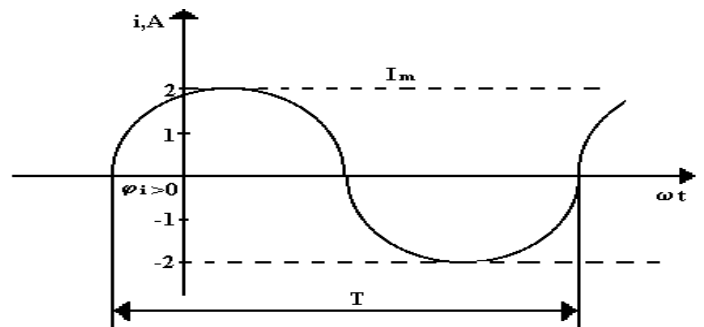


рис. 1.4

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i$$

1.3 Получение синусоидальных токов

Синусоидальные токи получают с помощью синусоидального генератора.

Простейший генератор состоит из рамки, изготовленной из проводника, которая имеет w витков и помещена между полюсами магнитного поля, которое создаётся постоянным магнитом или электромагнитом **рис. 1.8**.

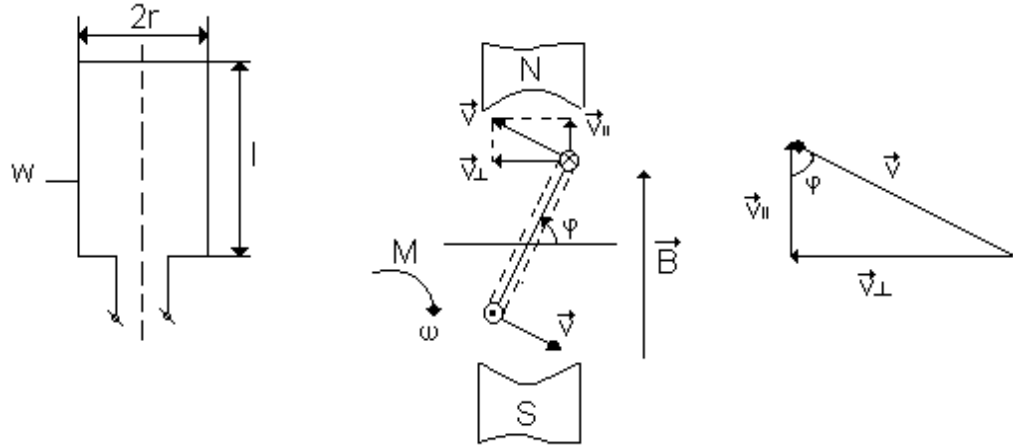


Рис. 1.8

Рамка вращается с постоянной угловой скоростью $\omega = \text{const}$. Постоянное магнитное поле имеет магнитную индукцию, постоянную во времени $B = \text{const}$. В начальном положении, когда $t=0$, рамка составляет с горизонтальной осью угол φ . Согласно закону электромагнитной индукции, в одной активной части контура при вращении индуцируется ЭДС:

$$e' = IBv_{\perp} = IBv \sin \varphi,$$

а в одном витке

$$e_0 = 2IBv \sin \varphi = 2e',$$

так как рамка содержит w витков, то общая ЭДС будет:

$$e = we_0$$

известно, что угловая скорость:

$$\omega = \frac{\varphi}{t};$$

$$\varphi = \omega t;$$

$$V = \omega r,$$

поэтому

$$e = 2\ell \omega r B w \sin \omega t,$$

учитывая, что площадь рамки $S=2lr$, получим $e=BS\omega\sin\omega t$.

Обозначим через $E_m=BS\omega$ – амплитудное значение ЭДС, подставим это в формулу:

$$e = E_m \sin \omega t ,$$

направление её определяем по правилу правой руки.

При вращении рамки ток в рамке меняет направление на противоположное и мы получаем переменный синусоидальный ток.

Увеличение индукции магнитного поля осуществляется применением в качестве сердечников электромагнитов специальных магнитных материалов – ферромагнетиков, для которых $\mu \gg 1$.

1.4. Средние и действующие значения переменных токов

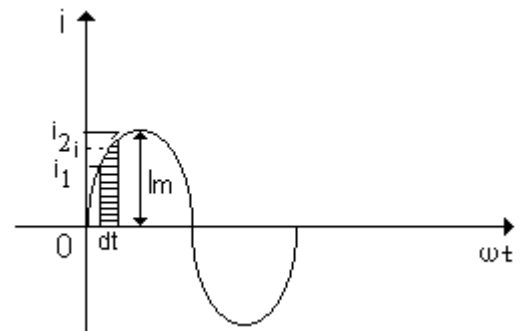
I. *Среднее значение переменного тока* – это такой постоянный ток, который за определённое время переносит через поперечное сечение проводника такое же количество электричества, как и переменный ток (I_{cp} ; U_{cp} ; E_{cp}).

$$i = \frac{dq}{dt};$$

Пусть задан ток: $dt \rightarrow 0; i_1; i_2 \rightarrow i;$

$$i dt = dq;$$

$$dS = dq.$$



Площадь, ограниченная графиком (рис. 1.9) зависимости

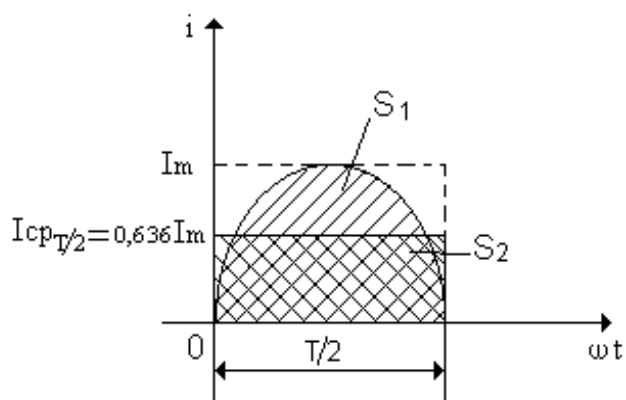
Рис. 1.9

тока от времени и осью абсцисс численно равна количеству электрического заряда, перенесённого через проводник за данный интервал времени:

$$I_{cp} = \int_0^T \frac{i}{T} dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_m \sin \omega t dt = I_m T \int_0^T \sin \omega t dt = 0.$$

Вывод: Среднее значение тока ($U_{cp}, E_{cp}, \Phi_{cp},$) за целый период или количество периодов равно

нулю, если они изменяются по синусоидальному или косинусоидальному закону. Поэтому для синусоидальных величин среднее значение рассчитывается за пол-периода (рис. 1.10).



$$S_1 = S_2;$$

S_1 - площадь переменного тока

S_2 - площадь постоянного тока

Рис. 1.10

$$\begin{aligned} I_{\text{med}_{\frac{T}{2}}} &= \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{idt}{T/2} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} idt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_m \sin \omega t dt = \frac{2I_m}{T\omega} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega t d(\omega t) = \\ &= \frac{2I_m}{T\omega} (-\cos \omega t) \Big|_0^{T/2} = 0,636 I_m ; \\ U_{\text{med}_{\frac{T}{2}}} &= 0,636 U_m ; \end{aligned}$$

Для любых синусоидальных величин:

$$\begin{aligned} I_{cp_{\frac{T}{2}}} &= \frac{2I_m}{\pi} \approx 0,636 I_m , \\ U_{cp_{\frac{T}{2}}} &= \frac{2U_m}{\pi} \approx 0,636 U_m , \\ \mathcal{E}_{cp_{\frac{T}{2}}} &= \frac{2\mathcal{E}_m}{\pi} \approx 0,636 \mathcal{E}_m . \end{aligned}$$

Физический смысл: $\int idt = 0$:

За первый полупериод по проводнику ток проходит в одном направлении, за другой полупериод – в обратном направлении, и в среднем за период среднее значение тока равно нулю.

$$i = I_m \sin \omega t$$

Среднее значение токов измеряется школьным гальванометром.

II. *Действующее значение переменного тока* – это такое значение постоянного тока, которое при прохождении через проводник с сопротивлением R в течении определённого времени выделяет такое – же количество тепла, что и переменный ток.

Имеем проводник с сопротивлением R для постоянного и переменного токов.
При протекании постоянного тока с силой I в течении времени t выделится количество теплоты:

$$Q = I^2 R t .$$

Если по проводнику с сопротивлением R протекает ток $i = I_m \sin \omega t$ за время dt , то:

$$i = I_m \sin \omega t; dQ = i^2 R dt; Q = \int_0^T i^2 R dt;$$

$$Q = Q \Rightarrow I^2 R t = \int_0^T i^2 R dt;$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt};$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

- общая формула для действующего значения тока любой синусоидальной величины.

Расчитываем действующее значение тока за период, в случае, когда ток синусоиден.

$$\begin{aligned} I^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt = \frac{I_m^2}{T} \int_0^T \frac{(1 - \cos 2\omega t)}{2} dt = \frac{I_m^2}{T} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt = \frac{I_m^2}{T} \left[\int_0^T dt - \int_0^T (\cos 2\omega t) dt \right] = \\ &= \frac{I_m^2}{2T} \left[T - \frac{1}{2} \omega \int_0^T (\cos 2\omega t) d(2\omega t) \right] = \frac{I_m^2}{2} - \frac{I_m^2}{2T} (\sin 2\omega t) \Big|_0^T = \frac{I_m^2}{2}; \end{aligned}$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}};$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.71 U_m;$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.71 E_m .$$

I, U, E - действующие значения.

Отношение амплитудного значения к действующему называется *коэффициентом амплитуды* переменной величины.

Для синусоидальных величин коэффициент амплитуды обозначается:

$$k_A = \frac{I_m}{I} = \frac{I_m}{\frac{I_m}{\sqrt{2}}} = \sqrt{2} \approx 1,41.$$

Отношение действующего значения к среднему значению называется *коэффициентом формы* кривой.

$$k = \frac{I}{I_{cp}} = \frac{\frac{I_m}{\sqrt{2}}}{\frac{I_m}{\pi/2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{2 I_m} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = \frac{3,14}{2,82} \approx 1,11.$$

Действующее и среднее значение переменного тока показаны на рис. 1.11.

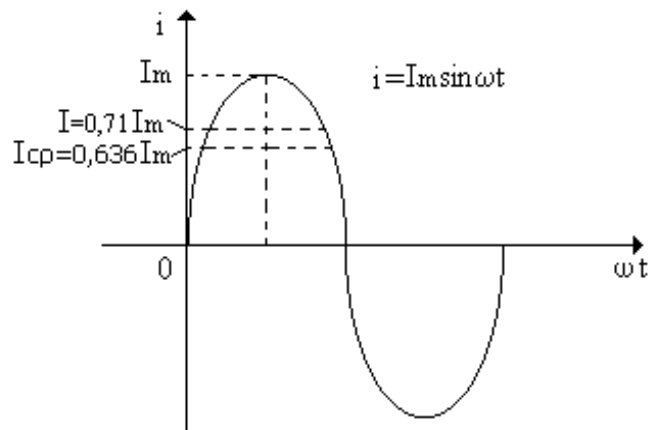


Рис. 1.11

1.5 Цепь с идеальным активным сопротивлением

Омическое сопротивление-это сопротивление проводника, когда по нему протекает постоянный ток.

$$r = \rho \frac{l}{S},$$

где: ρ - удельное сопротивление;
 l, S - геометрические параметры проводника.

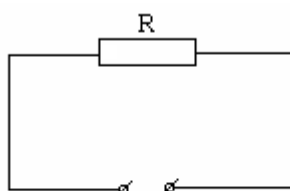
Если по проводнику протекает переменный ток, то он обладает активным сопротивлением.

$$R = \frac{P}{I^2},$$

где: P – активная мощность;
 I – действующее значение.

R [Ом], но $R \geq r$ -благодаря поверхностному эффекту.

Назовём *активным идеальным сопротивлением*, то сопротивление, которое не обладает индуктивностью и ёмкостью. ($L=0, C=0$) (**рис.1.12**).



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

Рис. 1.12

Векторная диаграмма и график величин изображены на **рис. 1.13**.

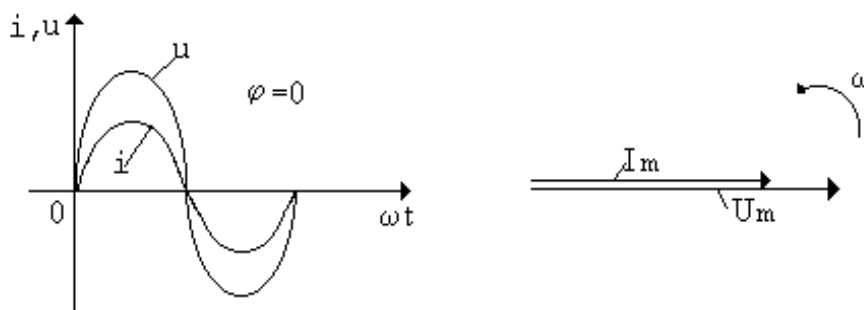


Рис. 1.13

Закон Ома для мгновенных значений:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t;$$

1.6 Цепь синусоидального тока с идеальной индуктивностью

Любой проводник, по которому протекает ток, обладает индуктивностью L [Гн].

В идеальном случае: $R=0$, $C=0$ (рис. 1.14).

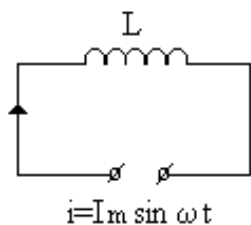


Рис. 1.14

Переменный ток, протекая через идеальную индуктивность, создаёт переменное магнитное поле, и согласно закону самоиндукции в самой индуктивности самоиндуцируется ЭДС:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = -LI_m \omega \cos \omega t = -E_m \cos \omega t,$$

знак „-“ определяется по правилу Ленца.

Согласно II закону Киргофа для данной цепи имеем:

$$\begin{aligned} u = -e_L &= I_m \omega L \cos \omega t = I_m \omega L \sin(\omega t + 90^\circ) = \\ &= U_m \sin(\omega t + 90^\circ); \\ U_m &= I_m \omega L = I_m X_L; \\ X_L &= \omega L = 2\pi fL, \end{aligned}$$

где X_L – индуктивное сопротивление [Ом].

Для цепи с идеальной индуктивностью напряжение опережает ток на 90° и сдвиг фаз

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_I = 90^\circ.$$

График и векторная диаграмма представлены на рис. 1.15.

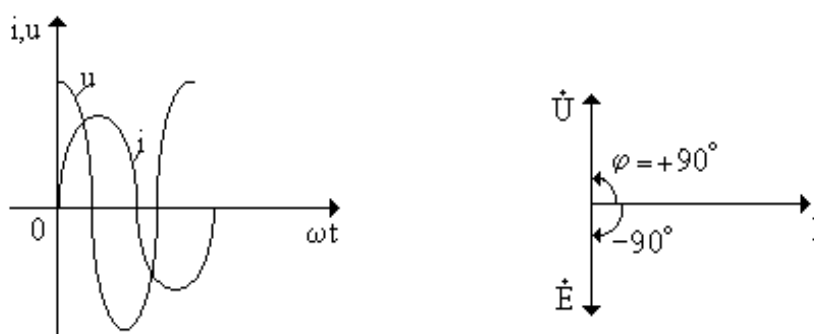


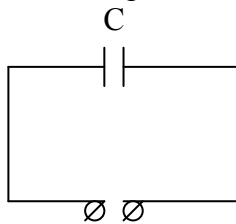
Рис. 1.15

$U_m = X_L I_m$ – закон Ома для цепи с идеальной индуктивностью, выраженный через амплитудное значение.

$U = I X_L$ – закон Ома, выраженный через действующие значения.

1.7. Цепь с идеальной ёмкостью

Под идеальной ёмкостью подразумевают конденсатор с идеальным диэлектриком. Конденсатор в схеме обозначают так как показано на **рис. 1.16**.



Обозначения:

Ф-фарад
 мФ – миллифарад
 μФ – микрофарад
 пФ – пикофарад
 нФ - нанофарад

Рис. 1.16

Требуется определить, какова зависимость силы тока от времени:

$$i = \frac{dq}{dt};$$

$$C = \frac{q}{U};$$

$$C = \frac{dq}{du} \Rightarrow dq = Cdu;$$

$$i = \frac{Cdu}{dt} = CU_m \frac{d(\sin \omega t)}{dt} = U_m \omega C \cos \omega t;$$

$$i = I_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Обозначим: X_c ёмкостное сопротивление

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f} [\Omega].$$

$I_{jm} = \frac{U_m}{X_c}$ – закон Ома для данной цепи, выраженный через амплитудные значения.

$I = \frac{U}{X_c}$ – закон Ома для действующих значений

В данном случае, когда имеем дело с идеальной ёмкостью, то ток опережает напряжение на 90° (**рис.1.17**):

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i = -90^\circ.$$

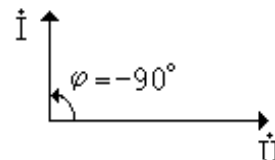
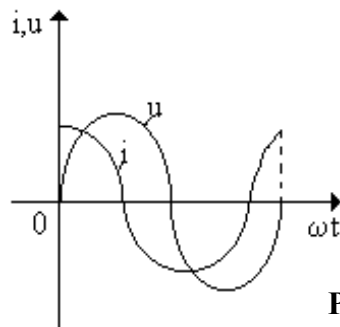


Рис. 1.17

1.8. Энергетические процессы в цепях синусоидального тока

1. Цепь с идеальным активным сопротивлением

Пусть дано:

$$\begin{aligned} U &= U_m \sin \omega t; \\ i &= I_m \sin \omega t; \\ \varphi &= 0. \end{aligned}$$

Мгновенное значение мощности (p) – это энергия, выделяемая в данный момент времени в данной цепи:

$$p = ui.$$

Следовательно:

$$p = I_m U_m \sin^2 \omega t \frac{2}{\sqrt{2}\sqrt{2}} = 2IU \sin^2 \omega t = IU(1 - \cos 2\omega t).$$

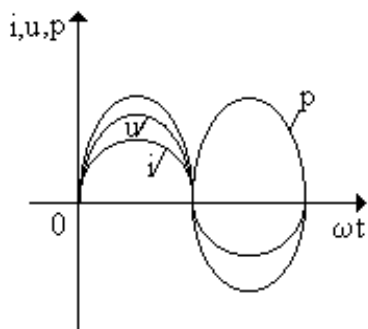


Рис. 1.18

Так как $p = I_m U_m \sin^2 \omega t$, мгновенное значение мощности является постоянно положительной величиной (**рис. 1.18**) обозначим P – энергию выделенную за единицу времени

P – активная мощность

P [W]

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} IU \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt = \frac{IU}{T} \left[\int_0^T dt - \int_0^T \cos 2\omega t dt \right] =$$

$$= IU - 0 = IU;$$

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} [\text{W}];$$

$$I = \frac{U}{R}.$$

Физический смысл активной мощности – количество теплоты, выделяемое в данном резисторе за единицу времени. (имеют смысл потери: превращение электрической энергии в тепловую, падение КПД).

2. Цепь с идеальной индуктивностью.

Пусть дано:

$$\begin{aligned} i &= I_m \cos \omega t; \\ u &= U_m \sin \omega t; \\ \varphi &= -90^\circ \end{aligned}$$

$$p = I_m U_m \sin \omega t \cos \omega t \frac{2}{\sqrt{2}\sqrt{2}} = IU \sin 2\omega t$$

Следовательно мгновенная мощность изменяется с удвоенной частотой: за один период колебания тока или напряжения мгновенная мощность совершает два колебания **рис. 1.19**.

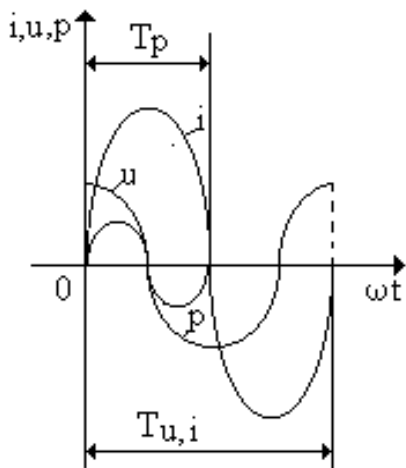


Рис. 1.19

1.9. Последовательное соединение R, L, C – элементов

Дана цепь (рис. 1.20):

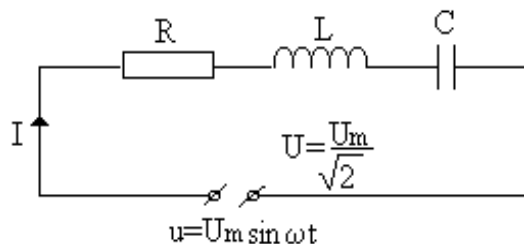


Рис. 1.20

Согласно закону Ома для каждого элемента имеем:

$$U_R = IR;$$

$$U_L = IX_L;$$

$$U_C = IX_C,$$

где:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL;$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}.$$

Для переменного тока, согласно II закону Кирхгофа для всей данной цепи: векторная сумма падений напряжений на всех элементах цепи равна векторной сумме напряжений и ЭДС:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

Векторная диаграмма для данного случая представлена на рис. 1.21.

В данном случае векторную диаграмму начинают строить с общего для всех элементов параметра – с силы тока I .

φ - сдвиг фаз между током и общим напряжением. Фактически φ может быть больше, меньше, равен нулю:

Если $U_L = U_C$, то $\varphi = 0$.

Если $U_L > U_C$, то $\varphi > 0$.

Если $U_L < U_C$, то $\varphi < 0$.

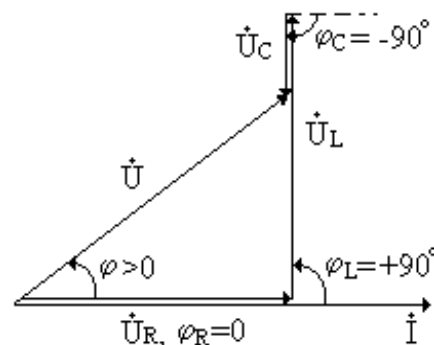


Рис. 1.21

1.10. Резонанс напряжений

Назовём *резонансом напряжений* явление, происходящее в цепи переменного тока с последовательным соединением R, L, C – элементов, когда сдвиг фаз между током и напряжением, приложенным к цепи, равен нулю:

$$\varphi=0.$$

Следствия резонанса напряжений:

- 1) $\varphi=0$,
- 2) $U_L=U_C$.

Векторная диаграмма для случая резонанса напряжений представлена на **рис. 1.22**

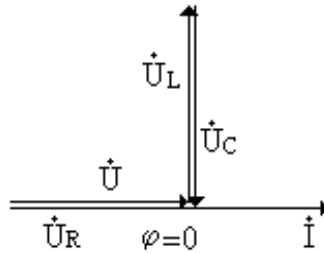


Рис. 1.22

- 3) $U_p=U_L-U_C=0$

где U_p – падение напряжения на реактивных элементах или реактивное напряжение.

- 4) $U=U_R=U_a$

Так как U_R - падение напряжения на активном элементе, то не будем обозначать U_R , а обозначим U_a – активное напряжение.

При резонансе напряжений падение напряжения на активном сопротивлении равно приложенному к цепи напряжению, то есть вся цепь ведёт себя как активное сопротивление (как будто в цепи нет элементов L и C).

- 5) $IX_L = IX_C$

$X_L = X_C \rightarrow$ *математическое условие резонанса напряжений.*

Так как $X_L = X_C$ имеем $\omega L = \frac{1}{\omega C}$.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0;$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0;$$

ω_0 – резонансная частота.

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC};$$

$T = 2\pi\sqrt{LC}$ – формула Томпсона.

Резонанс напряжений может быть получен *тремя способами:*

- 1) изменением L, при $\omega, C=\text{const}$.

Введением или выведением сердечника из катушки изменяем её индуктивность.

Обозначение катушки с сердечником.



- 2) Изменением ёмкостей при $\omega, L=\text{const}$.

1.11. Треугольник напряжений. Треугольник сопротивлений. Треугольник мощностей

Треугольник напряжений

Из векторной диаграммы последовательного соединения **рис. 1.21**, R, L, C – элементов выделяем треугольник, стороны которого представляют напряжения. Треугольник называют треугольником напряжений при последовательном соединении R, L, C – элементов **рис. 1.25**.

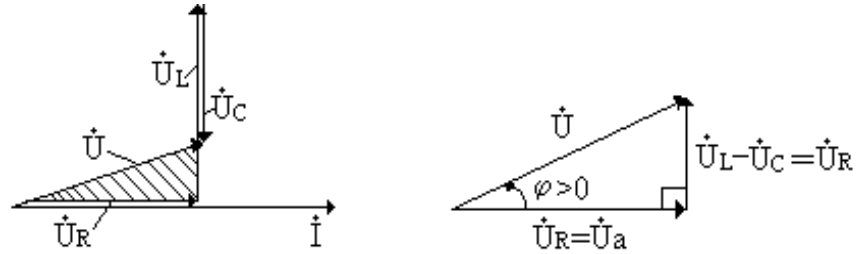


Рис. 1.25

Из треугольника следует:

$$U_a = U \cos \varphi;$$

$$U_r = U \sin \varphi;$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_r^2} = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_r}{U_a};$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{U_r}{U_a}.$$

Треугольник сопротивлений

Так как:

$$\dot{U}_a = iR;$$

$$\dot{U}_r = iX_L - iX_C = i(X_L - X_C).$$

По теореме Пифагора:

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_a^2 + U_r^2} = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 (X_L - X_C)^2} = \\ &= I \sqrt{R^2 + \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}\right)^2} = I \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \\ &= I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = IZ; \end{aligned}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} - \text{полное сопротивление.}$$

$$U = IZ.$$

Если каждую из сторон треугольника напряжений поделить на силу тока, то получим подобный треугольник, который называют *треугольником сопротивлений* **рис. 1.26**.

ГЛАВА II. РАЗВЕТВЛЁННЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

2.1. Графо-аналитический метод решения задач

Узел – это точка электрической цепи, в которой сходятся минимум три провода.

Ветвь – это цепочка, соединяющая собой два узла.

Пусть дана цепь (рис. 2.1).

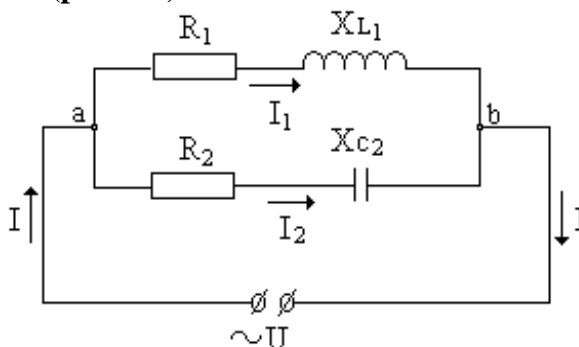


Рис. 2.1

Пусть даны значения элементов: $R_1, X_{L1}, R_2, X_{C2}, U$

Определить: I_1, I_2, I

I – неразветвлённый, общий ток.

Построить векторную диаграмму.

Параметры, необходимые для вычисления, могут быть рассчитаны графически (из векторной диаграммы) или аналитически.

Расчитываем общее сопротивление ветвей:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2};$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{C2}^2}.$$

Так как ветви 1 и 2 соединены параллельно, то к ним приложено одно и то же напряжение: $U=U_1=U_2$.

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}}.$$

Направление тока I_1 определяем из треугольника сопротивлений первой ветви.

$$\varphi_1 = \arctg \frac{X_{L1}}{R_1} > 0 \text{ – ток } I_1 \text{ отстаёт от напряжения на угол } \varphi_1;$$

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_2} = \frac{U_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{C2}^2}}.$$

Направление тока I_2 определяем из треугольника сопротивлений второй ветви:

2.2. Резонанс токов

Назовём *резонансом токов* явление, происходящее в разветвлённых цепях переменного тока, в которых одни ветви содержат индуктивности, а другие – ёмкости и сдвиг фаз между неразветвлённым током и общим напряжением равен нулю.

$$\varphi=0$$

Простейшая цепь, в которой можно получить резонанс токов представлена на **рис. 2.3**.

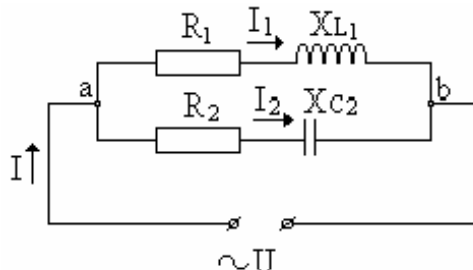


Рис. 2.3

Треугольник проводимостей для таких цепей представлен на **рис. 2.4**.

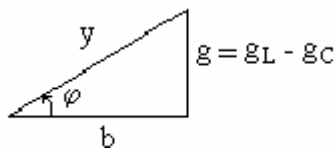


Рис. 2.4

Следствия резонанса токов:

1. $b = 0$;
2. $b_L = b_C$ - математическое условие резонанса тока.
 $b_L = b_{L1}$
 $b_C = b_{C2} \Rightarrow b_{L1} = b_{C2}$
 $y = g$
3. $I = I_{1a} + I_{2a}$
4. $I_{1r} = I_{2r}$
5. $\dot{I}_{1r} = -\dot{I}_{2r}$
6. $I = I_a$; $I_r = 0$ (цепь ведёт себя как будто в ней отсутствуют элементы L и C)
7. $\cos \varphi = 1$ (коэффициент мощности максимален).
8. $I_{rez} = I_{min}$

Векторную диаграмму строим качественно (**рис. 2.5**).

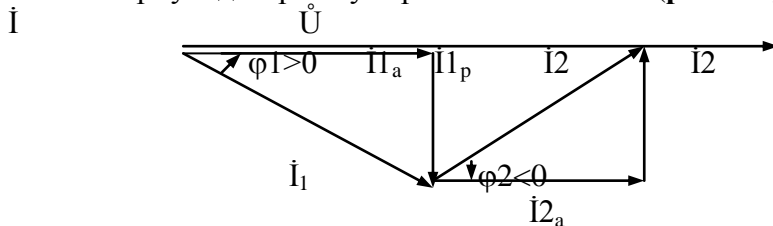


Рис. 2.5

2.3. Коэффициент мощности. Его технико – экономическое значение и способы его повышения

$$\cos \varphi = \frac{P}{IU} = \frac{P}{S}$$

$\frac{P}{S}$ – коэффициент мощности, который показывает, какую долю полной мощности представляет активная мощность.

I	II
$U_1=220 \text{ В}$	$U_2=220 \text{ В}$
$P_1=660 \text{ Вт}$	$P_2=660 \text{ Вт}$
$\cos \varphi_1=1$	$\cos \varphi_2=0,5$
$I_1=3 \text{ А}$	$I_2=6 \text{ А}$

Коэффициент мощности указывают в паспорте приборов.

Ток потребителя определяют по формуле:

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}$$

Если у потребителя низкий коэффициент мощности, то потребитель потребляет большой ток по сравнению с потребителем с большим коэффициентом мощности при одинаковой мощности.

Потребители, у которых $\cos \varphi=1$, называют *активными* (лампы накаливания, различные нагреватели и так далее).

Самыми распространёнными потребителями электрической энергии являются электродвигатели переменного тока и различные трансформаторы, которые имеют $\cos \varphi < 1$, и представляют собой активно – индуктивную нагрузку.

Потребители с низким $\cos \varphi$ имеют большой ток, для них нужен провод большего диаметра. Это приводит к перерасходу меди, что является невыгодным.

Если $\cos \varphi < 1$, то мощность генераторов не используется полностью. Существует несколько методов повышения коэффициента мощности.

1) Естественный метод

Для двигателей зависимость $\cos \varphi (P)$ на валу двигателя имеет вид показанный на **рис.2.8**.

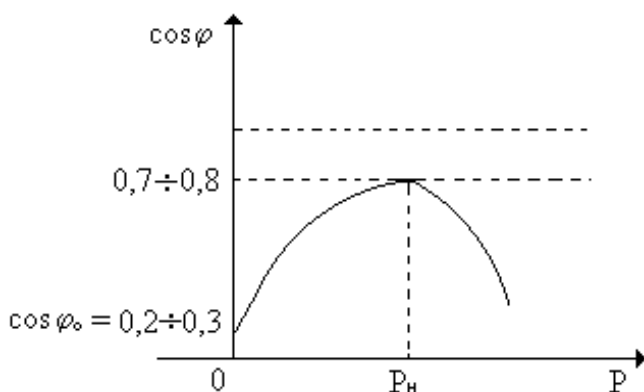


Рис. 2.8

$P=0$ – режим холостого хода;
 P_n – номинальная (паспортная) мощность двигателя;
 $\cos \varphi$ при P_n – максимально возможный.
 Если $P < P_n$ – режим недогрузки;
 $P > P_n$ – режим перегрузки.

Естественный метод состоит в том, что подбирается мощность двигателя исходя из требуемой мощности для данного механизма.

2) Искусственный метод

Суть метода состоит в том, что подключаются:

- последовательно с нагрузкой конденсатор определённой ёмкости, чтобы получить резонанс напряжений. Этот способ применяют в радио;

подключают параллельно потребителю конденсатор такой ёмкости, чтобы получить резонанс токов. рис. 2.9.

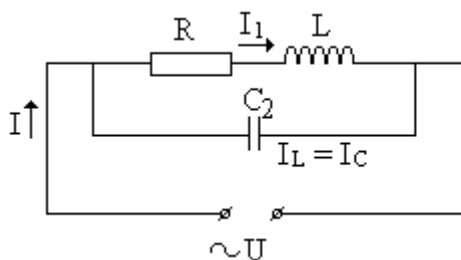


Рис. 2.9

Двигатель или трансформатор имеют активно – индуктивный характер.

Мощность конденсатора рассчитывают:
Согласно первому закону Киргоффа:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_a + \dot{I}_r = \dot{I}_a + \dot{I}_L + \dot{I}_C = \dot{I}_a$$

Так как $I_C = I_L$, и $I_C = \frac{U}{Z^2} = \frac{U}{X_C} = U\omega C = 2\pi fUC$.

Из треугольника токов для первой ветви:

$$\begin{aligned} I_L &= I_1 \sin \varphi_1 ; \\ I_1 \sin \varphi_1 &= U\omega C ; \\ C &= \frac{I_1 \sin \varphi_1}{U\omega} ; \\ C &= \frac{I_1 \sin \varphi_1}{U\omega} \cdot \frac{U \cos \varphi_1}{U \cos \varphi_1} = \frac{P_1 \sin \varphi_1}{\omega U^2 \cos \varphi_1} = \frac{P_1}{\omega U^2} \operatorname{tg} \varphi_1 . \end{aligned}$$

3)Метод синхронных компенсаторов

Синхронная машина в режиме компенсатора подаёт ёмкостной ток в сеть, то есть компенсирует индуктивный ток сети, что приводит к уменьшению реактивного тока. Угол φ увеличивается, а $\cos \varphi$ - уменьшается, и наоборот, уменьшение угла φ ведёт к увеличению $\cos \varphi$.

2.4. Представление чисел в комплексной форме

Комплексные числа представляют в виде:

$$a+iv$$

где: a – вещественная часть;

iv – мнимая часть;

a, v – любые числа;

i – мнимая единица.

Вместо i в электротехнике применяют j .

$$a+jv$$

$$j = \sqrt{-1}$$

Комплексное число в комплексной плоскости представляется одной точкой (рис. 2.10).

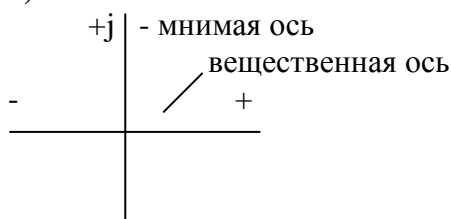


Рис. 2.10

Например рис. 2.11

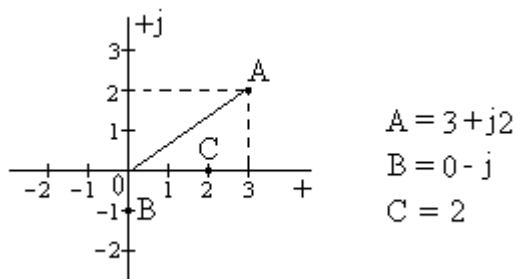


Рис. 2.11

$a+jv$ – алгебраическая форма.

Любое комплексное число может быть представлено в комплексной плоскости только одним вектором.

В комплексной плоскости углы начинают отсчитывать от положительной вещественной полуоси и считаются положительными против часовой стрелки и отрицательными – по часовой стрелке.

$a+jv=|OA|(\cos\varphi+j\sin\varphi)$ – геометрическая форма представления комплексных чисел.

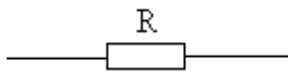
$|OA| e^{j\varphi}$ – экспоненциальная форма представления комплексных чисел.

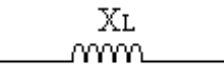
Операции над комплексными числами:

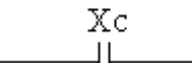
1. сложение комплексных чисел:


$$(a+jv) + (c+jd) = (a+c) + j(v+d);$$

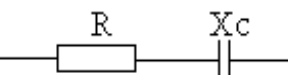
2.5. Представление параметров схемы в комплексной форме.

1)  $\underline{Z} = R + j0 = R$

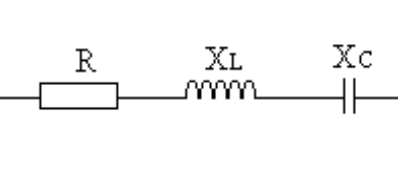
2)  $X_L > 0 \quad \underline{Z} = 0 + jX_L$

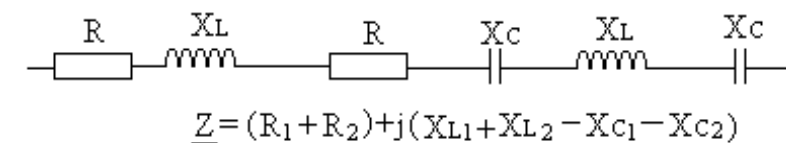
3)  $X_C < 0 \quad \underline{Z} = 0 + j(-X_C) = -jX_C$

4)  $\underline{Z} = R + jX_L$

5)  $\underline{Z} = R - jX_C$

Закон Ома и законы Кирхгофа в комплексной форме.

6)  $\underline{Z} = R + jX = \begin{cases} R + j(X_L - X_C); X_L > X_C \\ R - j(X_L - X_C); X_L < X_C \\ R + j0; X_L = X_C \end{cases}$

7)  $\underline{Z} = (R_1 + R_2) + j(X_{L1} + X_{L2} - X_{C1} - X_{C2})$

Закон Ома:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}};$$

Законы Кирхгофа:

1) $\sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^m I_i \quad \sum_{i=1}^n I_i = 0;$ n – количество токов, направленных к узлу.
 m – количество токов, направленных от узла.

2) $\sum_{i=1}^n U_{X_i} = \sum_{i=1}^m U_{L_i} + \sum_{i=1}^l E_i;$ n – количество активных и ёмкостных элементов.
 m – количество индуктивных элементов.
 l – количество источников ЭДС.

2.6. Символический метод решения задач

Пусть дана цепь с параметрами -рис. 2.13.

Дано:

$$R_1, R_2, X_{L1}, X_{C2}, U$$

Найти:

$$I_1, I_2, I$$

$$P_1, Q_1, S_1, P_2, Q_2, S_2, P, Q, S$$

$$\cos\varphi_1, \cos\varphi_2, \cos\varphi$$

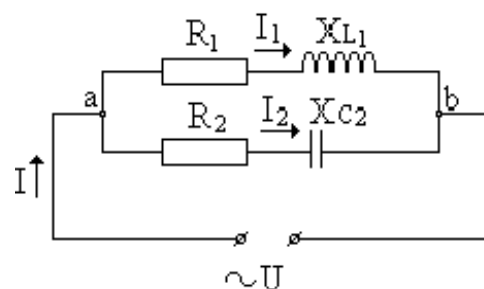


Рис. 2.13

Решить задачу символическим методом и построить векторную диаграмму в комплексной плоскости.

1. Записываем сопротивления ветвей в комплексной форме:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{L1};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - jX_{C2}.$$

2. Расчитываем токи I_1, I_2 по закону Ома:

$$\underline{U} = U + j0;$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_1};$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{R_1 + jX_{L1}} \cdot \frac{R_1 - jX_{L1}}{R_1 - jX_{L1}} = \frac{UR_1}{R_1^2 + X_{L1}^2} - j \frac{UX_{L1}}{R_1^2 + X_{L1}^2} = I_{1a} - jI_{1L};$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}}{R_2 - jX_{C2}} \cdot \frac{R_2 + jX_{C2}}{R_2 + jX_{C2}} = \frac{UR_2}{R_2^2 + X_{C2}^2} + j \frac{UX_{C2}}{R_2^2 + X_{C2}^2} = I_{2a} + jI_{2C};$$

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1L}^2};$$

$$I_2 = \sqrt{I_{2a}^2 + I_{2C}^2};$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}.$$

3. Расчитываем φ_1, φ_2

$$\varphi_1 = \arctg \frac{X_{L1}}{R_1} = \arctg \frac{I_{1L}}{I_{1a}} > 0;$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_{C2}}{R_2} = \arctg \frac{I_{2C}}{I_{2a}} < 0;$$

4. Определяем ток в неразветвлённой части:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = I_{1a} - jI_{1L} + I_{2a} + jI_{2C} =$$

$$= I_{1a} + I_{2a} - j(I_{1L} - I_{2C}) = I_a - jI_r;$$

$$\varphi = \arctg \frac{I_r}{I_a}.$$

2.7. Метод проводимостей

Пусть дана цепь содержащая n ветвей **рис.2.14**.

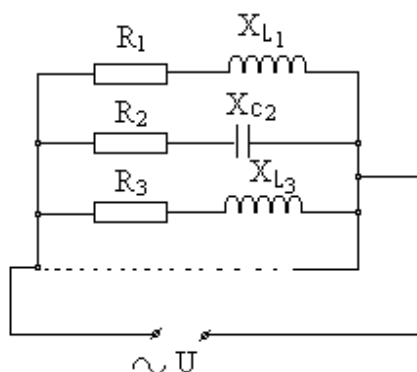


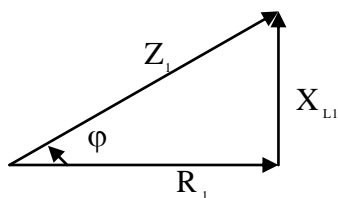
Рис. 2.14

Дано: $R_1, R_2, R_3, \dots R_n$;
 $X_{L1}, X_{C2}, X_{L3}, \dots X_{kn}$
 U

Найти: $I_1, I_2, I_3, \dots I_n - ?$
 $I - ?$

Построить векторную диаграмму.
 Из треугольника сопротивлений:

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1}$$



$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 = \frac{UR_1}{Z_1^2} = Ug_1;$$

$$g_1 = \frac{R_1}{Z_1^2} > 0;$$

где g_1 - активная проводимости первой ветви.
 Её считают положительной.

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = \frac{UR_2}{Z_2^2} = Ug_2;$$

$$g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} > 0;$$

где g_2 - активная проводимости второй ветви.

$$I_{3a} = Ug_3;$$

2.8. Решение сложных схем

(элементы соединены последовательно и параллельно между собой)

Сложные схемы решают несколькими методами:

- 1) метод проводимостей (в обычной форме);
- 2) метод комплексных проводимостей;
- 3) символический (комплексный) метод.

Пусть дана схема (рис. 2.19):

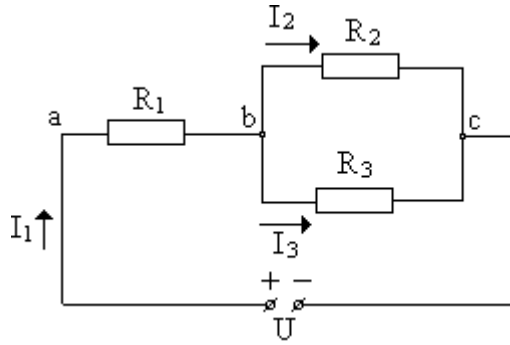


Рис. 2.19

Дано: R_1, R_2, R_3, U

Найти: $I_1, I_2, I_3 - ?$

$U_{ab} - ?$

$U_{bc} - ?$

1. Определяем: $R_{bc} = R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$

Аналогичная схема представлена на рис. 2.20.

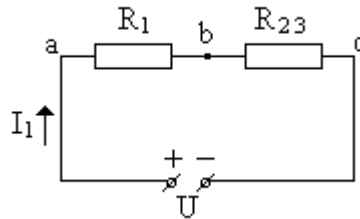


Рис. 2.20

2. $R = R_{ac} = R_{ab} + R_{bc} = R_1 + R_{23} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$

3. $I = \frac{U}{R_{ac}};$

4. $U_{ab} = IR_1;$

ГЛАВА III. ТРЁХФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

Трёхфазной системой называется та система, в которой действуют три одинаковые по амплитуде и частоте ЭДС, которые сдвинуты друг относительно друга.

Если сдвиги фаз между ЭДС равны между собой по 120° , то это симметричная трёхфазная система.

3.1. Трёхфазный генератор

Трёхфазный генератор состоит из двух основных частей (рис. 3.1):

- 1) неподвижная часть – *статор*, на нём расположены обычно три идентичные обмотки, сдвинуты по кругу относительно друг друга на 120° .
- 2) вращающаяся часть – *ротор*, представляет собой постоянный магнит (для генераторов малой мощности) или электромагнит, который запитывается постоянным напряжением.

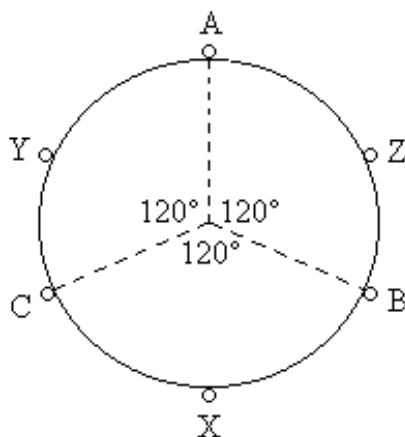


Рис. 3.1

A, B, C – начала обмоток.

X, Y, Z – концы обмоток.

ЭДС генератора имеют следующие выражения:

$$\begin{aligned}e_A &= E_m \sin \omega t ; \\e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) ; \\e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ).\end{aligned}$$

Обмотки обозначаются A, B, C, поэтому говорят, что генератор имеет три фазы: фаза A, фаза B, фаза C.

$$E_A = E_B = E_C = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Векторная сумма ЭДС генератора показана на рис. 3.2.

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$$

Выражение ЭДС генератора в комплексной форме.

$$1) \quad E_A = \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j0} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} (\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) = \frac{E_m}{\sqrt{2}};$$

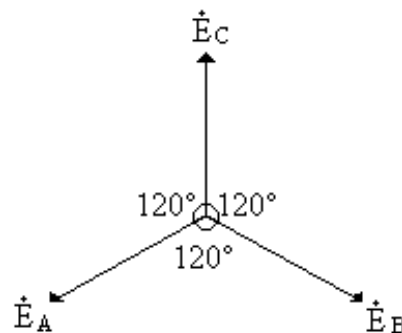



Рис. 3.2

3.2. Соединение фаз генератора звездой

Соединение звездой означает такое соединение, когда все концы фаз соединены вместе, а от начала фаз идут провода к потребителю (рис. 3.3).

Символически обозначают 

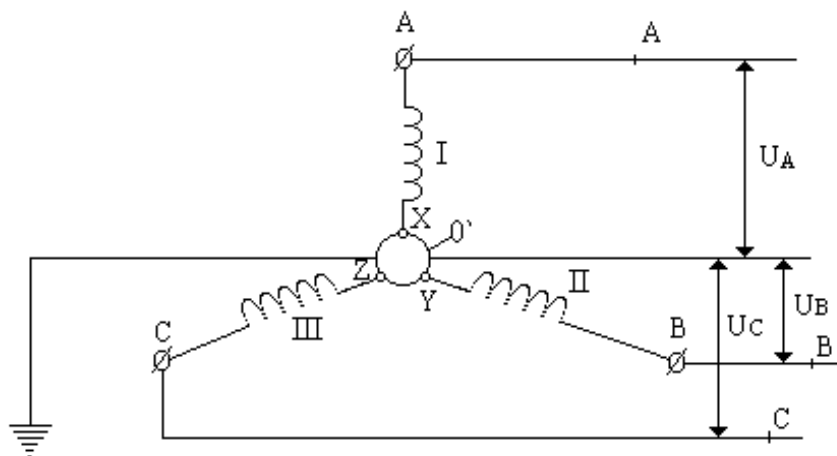


Рис. 3.3

O' - нулевая точка генератора.

Принято считать, что электрический потенциал нулевой точки генератора равен нулю (точка заземлена).

$$\varphi_{O'} = 0.$$

Считается, что нет падения напряжения на сопротивления обмоток (фаз) генератора, то есть по модулю ЭДС одной фазы генератора равна напряжению этой фазы.

По модулю:

$$E_A = U_A ;$$

$$E_B = U_B ;$$

$$E_C = U_C ;$$

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0 ;$$

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0;$$

$$E_A = E_B = E_C = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Провода, соединяющие начала фаз генератора с потребителями, называют линейными проводами (линиями).

Напряжение между любой линией и нулевой точкой (узлом) генератора называют фазным напряжением.

Обозначают соответственно: U_A, U_B, U_C

Общий случай: U_ϕ

$$U_A = U_B = U_C = U_\phi.$$

Напряжение между любыми двумя линиями называют линейным напряжением.

Обозначают в строгой последовательности: U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} .

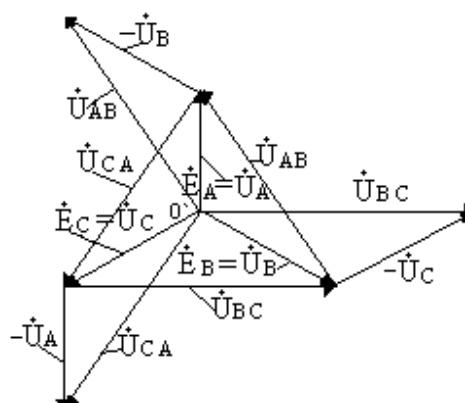
Общий случай: U_L .

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B;$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C;$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Векторная диаграмма напряжения для генератора, соединённого звездой, имеет следующий



вид (рис. 3.4).

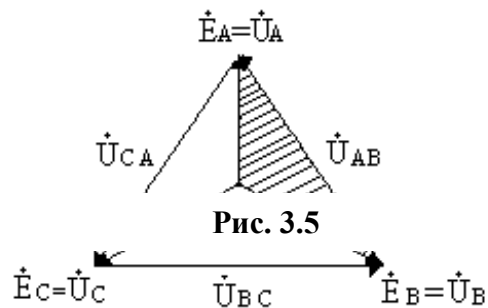
Изобразим на векторной диаграмме следующие векторы:

Рис. 3.4

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A + (-\dot{U}_B);$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B + (-\dot{U}_C);$$

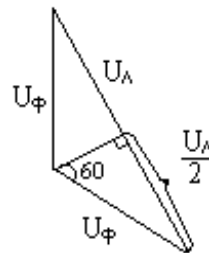
$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C + (-\dot{U}_A) \text{ (рис. 3.5).}$$



Получили три равных равнобедренных треугольника.

Выделим заштрихованный треугольник (рис. 3.6).

У генератора фазное напряжение меньше линейного в $\sqrt{3}$ раз. Исходя из этого, все напряжения трёхфазных цепей стандартизованы:



$$\frac{U_L}{2} = \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\frac{U_L}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_\Phi$$

$$U_L = \sqrt{3} U_\Phi ; \Rightarrow U_\Phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

660/380

380/220

220/127

Рис. 3.6

Трёхфазные сети \cong обозначают символом:

Чаще всего фазы генератора соединяют звездой именно потому, что получают два различных напряжения.

3.3. Соединение фаз генератора треугольником

Соединить фазы генератора треугольником означает:

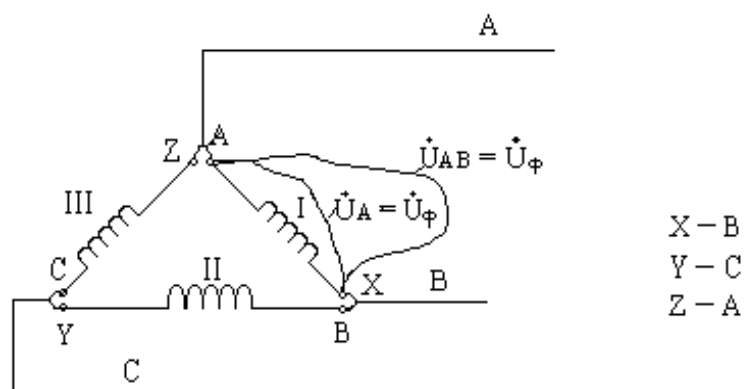


Рис. 3.7

соединить конец первой фазы с началом второй, конец второй с началом третьей, конец третьей с началом первой фазы (рис. 3.7).

Символически соединение фаз треугольником обозначат: Δ .

Из вершин треугольника идут провода к потребителю.

Для соединения фаз треугольником:

$$U_{л} = U_{\phi}.$$

Векторная диаграмма для этого случая показана на рис. 3.8.

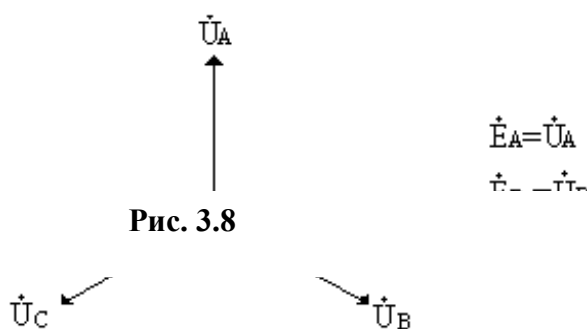


Рис. 3.8

3.4. Соединение нагрузки звездой

Пусть фазы генератора соединены звездой и фазы потребителя также соединены звездой (рис. 3.9). Если потребитель является трёхфазным двигателем, то необходимо экспериментально, отдельно определить начала и концы фаз.

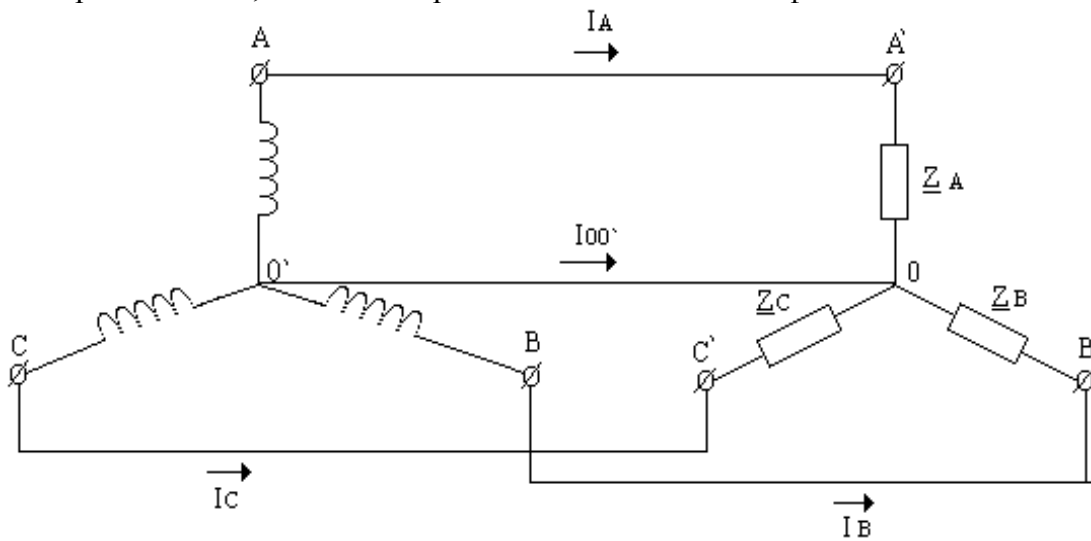


Рис. 3.9

Точка, в которой соединяются концы фаз потребителя, называется нулевой точкой, или узлом потребителя (0).

Токи имеют направление от генератора к потребителю I_A, I_B, I_C - *линейные токи* – I_L . Токи, текущие по фазам потребителя, называют *фазными токами*, в общем случае I_ϕ . При соединении звездой:

$$I_L = I_\phi.$$

Провод, соединяющий узлы генератора и потребителя, называют *нулевым проводом*, а его ток, если он есть, называют *нулевым током* или током нулевого провода и направлен от узла потребителя к узлу генератора.

Согласно I закону Кирхгофа для узла 0 имеем:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_{00'}.$$

Нагрузка называется симметричной, если выполняется условие:

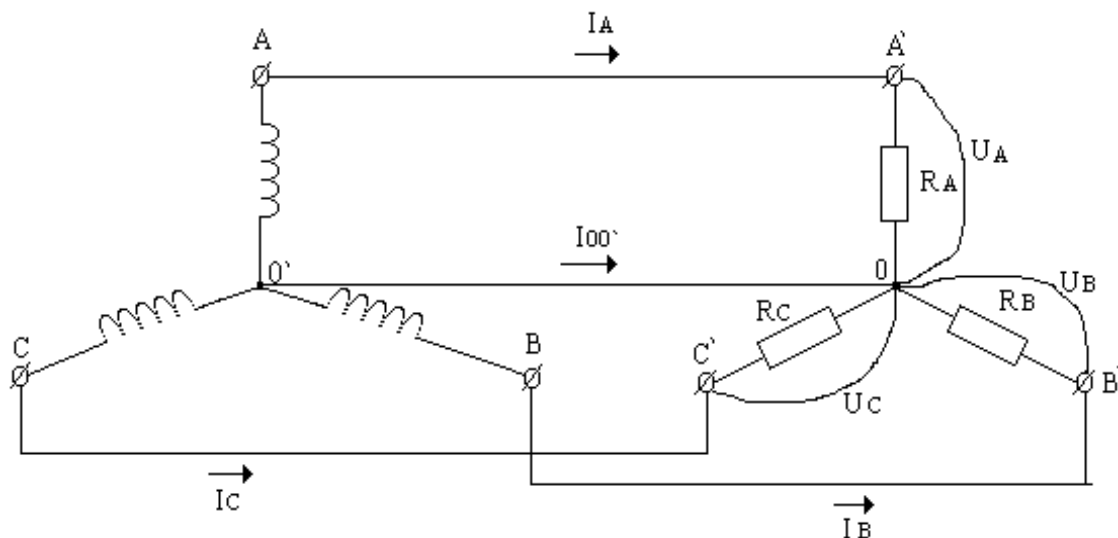
$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C.$$

Нагрузка называется симметричной, если в каждой из фаз потребителя имеем одинаковые сопротивления одинакового характера.

Если $\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$ – то нагрузка несимметрична.

3.5. Симметричная нагрузка

Пусть в каждой из фаз потребителя имеем по активной нагрузке и они равны между собой **рис. 3.10**.



$$\begin{aligned}\varphi_A(I_A, U_A) &= 0 \\ \varphi_B(I_B, U_B) &= 0 \\ \varphi_C(I_C, U_C) &= 0\end{aligned}$$

Рис. 3.10

$$R_A = R_B = R_C = R.$$

Принято считать при решении задач, если нет соответствующих указаний в условиях, что падения напряжений в линиях пренебрежительно малы.

Расчёт цепи при симметричной нагрузке производится следующим образом: обычно задаётся линейное или фазное напряжение сети (генератора) и значения сопротивлений нагрузки. Требуется определить токи и построить векторную диаграмму.

Дано:	Найти:
$R_A = R_B = R_C = R$	$I_A, I_B, I_C, I_{00'} - ?$
U_L	$U_A, U_B, U_C - ?$
	$\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C - ?$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = 0;$$

$$I_A = \frac{U_\phi}{R_s} = \frac{U_A}{R};$$

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}};$$

$$I_B = \frac{U_\phi}{R_B} = \frac{U_B}{R};$$

$$I_C = \frac{U_\phi}{R_C} = \frac{U_C}{R}.$$

По модулю: $I_A = I_B = I_C;$

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_{00'} = 0;$$

$$I_{00'} = 0.$$

3.6. Соединение нагрузки звездой без нулевого провода при изменении нагрузки в одной фазе

Пусть: $R_A=R_B=R$;

$0 \leq R_C \leq \infty$.

$R_C=0$ – короткое замыкание (рис. 3.12).

$R_C=\infty$ - обрыв провода.

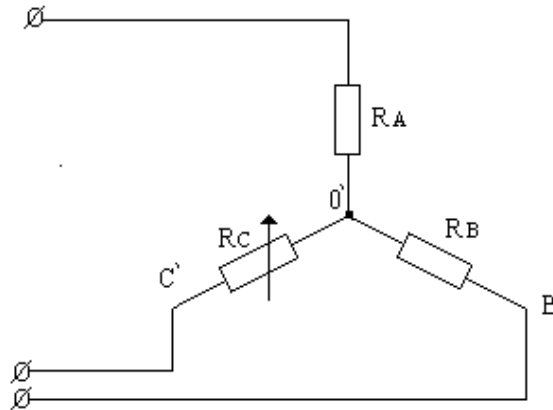


Рис. 3.12

1) Пусть $R_C=0$:

$$Z_{00'} = \infty;$$

$$E_A = E_B = E_C = U_A = U_B = U_C;$$

$$Y_{00'} = \frac{1}{Z_{00'}} = 0;$$

$$Y_C = \frac{1}{Z_C} = \infty;$$

$$\dot{U}_{00'} = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_{00'}};$$

$$Y_A = Y_B = \frac{1}{R};$$

$$\dot{U}_{00'} = \frac{\frac{1}{R}(\dot{E}_A + \dot{E}_B)}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_{00'}} + \frac{\dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_{00'}} = \frac{\frac{1}{R}(\dot{E}_A + \dot{E}_B)}{\frac{2}{R} + Y_C} + \frac{\frac{\dot{E}_C Y_C}{Y_C}}{\frac{2}{R} + \frac{Y_C}{Y_C}} = 0 + \frac{\dot{E}_C}{0+1} = \dot{E}_C.$$

Если будет короткое замыкание в фазе C, то межзловое напряжение:

$$\dot{U}_{00'} = \dot{E}_C = \dot{U}_\Phi.$$

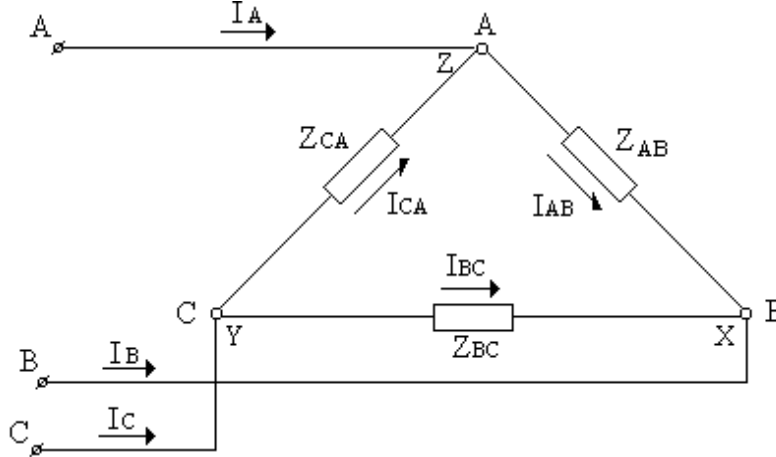
Векторная диаграмма для этого случая показана на рис. 3.13, где нулевая точка генератора и потребителя не совпадают:

- 1) строят ЭДС генератора;
- 2) строят линейные напряжения.

3.7. Соединение нагрузки треугольником

1) Нагрузка симметрична:

Пусть: $Z_{AB}=R_{AB}$,
 $Z_{BC}=R_{BC}$ (рис. 3.14)



$Z_{CA}=R_{CA}$;
 $R_{AB}=R_{CA}=R_{BC}=R..$
 При соединении треугольником: $U_{Л}=U_{\Phi}$.

Найти токи:
 фазные: I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} -?
 линейные: I_A, I_B, I_C -?

Рис. 3.14

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{U_{\Phi}}{R};$$

$$I_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{U_{\Phi}}{R};$$

$$I_{CA} = \frac{U_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{U_{\Phi}}{R};$$

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_{\Phi};$$

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = 0.$$

Для расчёта линейных токов можно воспользоваться векторной диаграммой или рассчитать фазные токи в комплексной форме и применить I закон Кирхгофа для узлов нагрузки.

$$\begin{aligned} ZA: \dot{I}_A + \dot{I}_{CA} &= \dot{I}_{AB} & \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \\ XB: \dot{I}_B + \dot{I}_{AB} &= \dot{I}_{BC} & \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \\ YC: \dot{I}_C + \dot{I}_{BC} &= \dot{I}_{CA} & \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \end{aligned}$$

Векторная диаграмма представлена на рис. 3.15.

3.8. Мощности в трёхфазных цепях

1. Соединение нагрузки звездой:

а) нагрузка симметрична.

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C;$$

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi};$$

$$I_{\text{л}} = I_{\phi};$$

$$I_A = I_B = I_C = I_{\phi};$$

$$U_A = U_B = U_C = U_{\phi};$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi;$$

$$P_A = I_A U_A \cos \varphi = I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\text{л}} U_{\text{л}} \cos \varphi;$$

$$P_B = I_B U_B \cos \varphi = I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\text{л}} U_{\text{л}} \cos \varphi;$$

$$P_C = I_C U_C \cos \varphi = I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\text{л}} U_{\text{л}} \cos \varphi;$$

$$P = 3P_A = 3I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} I_{\text{л}} U_{\text{л}} \cos \varphi.$$

Таким же образом рассчитывают и реактивные мощности:

$$Q_A = I_A U_A \sin \varphi_A;$$

$$Q_B = I_B U_B \sin \varphi_B;$$

$$Q_C = I_C U_C \sin \varphi_C;$$

$$Q_A = Q_B = Q_C = I_{\phi} U_{\phi} \sin \varphi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\text{л}} U_{\text{л}} \sin \varphi;$$

$$S_A = I_A U_A;$$

$$S_A = I_A U_A;$$

$$S_C = I_C U_C;$$

$$S_A = S_B = S_C = I_{\phi} U_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\text{л}} U_{\text{л}};$$

$$S = 3S_A = 3I_{\phi} U_{\phi} = \sqrt{3} I_{\text{л}} U_{\text{л}}.$$

б) нагрузка не симметрична

$$Z_A \neq Z_B \neq Z_C.$$

Если имеется хороший нулевой провод, то имеет место равенство: $U_{\text{л}} = U_{\phi}$, но $I_{\text{л}} = I_{\phi}$ – всегда при соединении звездой нагрузки.

Но $I_A \neq I_B \neq I_C$,

$$U_A = U_B = U_C = U_{\phi}, \text{ когда } U_{00} = 0$$

В этом случае мощности рассчитывают отдельно для каждой из фаз.






ГЛАВА IV. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

4.1. Классификация электроизмерительных приборов

Измерить какой-то параметр означает сравнить его с условным эталоном, принятым за единицу измерения.


Измерительные приборы классифицируются по нескольким признакам:

По роду тока:

-  цепи постоянного тока;
-  переменный однофазный ток;
-  переменный и постоянный ток;
-  трёхфазная симметричная система;
-  трёхфазная несимметричная система;


По характеру измеряемой величины:

$I[A], kA, mA, \mu A.$

 – амперметр;

 – гальванометр;

$U[V], kV, mV, \mu V.$

 – вольтметр;

$E [B]$ – на холостом ходу;

$R[\Omega], \text{Ом}$

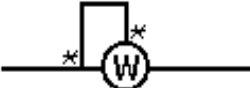
 – омметр;

Включают в цепь в зависимости от конструкции прибора.

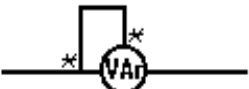
Активное сопротивление не измеряют прямо, а рассчитывают при переменном токе по формуле.

$$R = \frac{P}{I^2},$$

где $P[Bт]$ – активная мощность.

 – ваттметр;

$Q[Вар]$ – реактивная мощность;

 – варметр;

4.2. Магнитоэлектрическая система

Принцип действия основан на взаимодействии рамки с током и постоянного магнита.

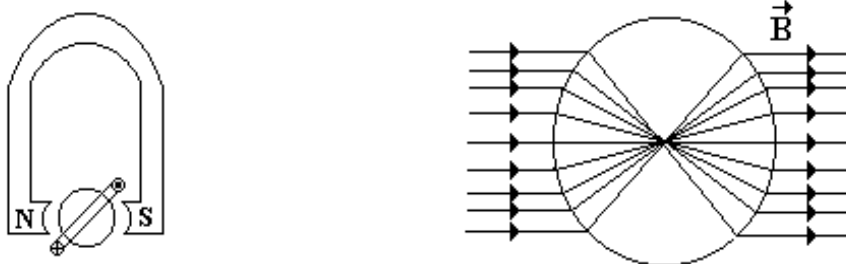


Рис. 4.1

Устройство показано на рис. 4.1.

Имеется подковообразный магнит, имеющий полюсные наконечники. Между полюсами наконечников устанавливают неподвижно стальной цилиндр, который служит для придания силовым линиям магнитного поля радиального характера.

Рамка, изготовленная из меди, намотана на алюминиевом корпусе, имеет W витков, активную длину l и ширину $2r$ и расположена на оси вращения в воздушном зазоре образованном магнитными полюсами и цилиндром (рис 4.2).

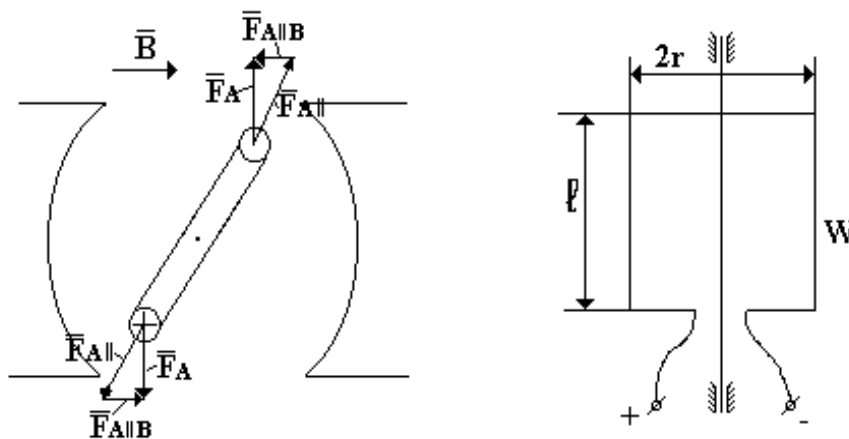


Рис. 4.2

Выводы рамки через спиральные пружины подключены к клеммам прибора. На оси также прикреплена указательная стрелка с противовесами.

Пусть к выводам рамки подаётся постоянное напряжение, тогда по рамке потечёт ток I , а значит:

$$F_A = IB \sin \alpha .$$

Эта сила действует на каждую из сторон рамки и её направление определяется по правилу правой руки.

$$\begin{aligned} \vec{F}_a &= \vec{F}_{A||} + \vec{F}_{A||B} ; \\ \mu_{\text{вп}} &= kF_A = kIBl, \end{aligned}$$

где k – коэффициент пропорциональности, в который входит и плечо.

При вращении рамки создаётся противодействующий момент спиральными пружинами:

4.3. Электромагнитная система

Принцип действия основан на притяжении внутрь катушки ферромагнитного сердечника.

Состоит из катушки, перед которой на оси находится сердечник из ферромагнетика.

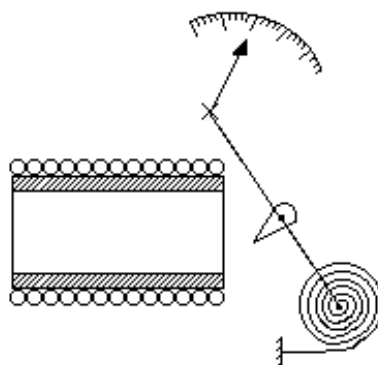


Рис. 4.3

Устройство показано на **рис.4.3**. Если катушка запитывается постоянным или переменным током, создаётся магнитное поле (постоянное или переменное), которое намагничивает сердечник и притягивает его внутрь катушки - стрелка отклоняется.

Сила притяжения сердечника внутрь катушки прямо пропорциональна квадрату тока катушки. Значит и вращающий момент равен:

$$\mu_{\text{вп}} = k_1 I^2,$$

где k_1 – постоянная данного прибора.

Спиральные пружины создают противодействующий момент:

$$\mu_{\text{пр}} = k\alpha,$$

где: k – жёсткость пружины;

α - угол отклонения стрелки;

$$\alpha = k_2 I^2.$$

Прибор может быть использован в качестве амперметра с квадратичной шкалой. Прибор используют для измерения очень больших токов в цепях постоянного и переменного тока (в цепях переменного тока прибор показывает действующее значение тока). Класс точности – порядка 1,5.

Высокая перегрузочная способность.

Большая собственная потребляемая мощность:

$$P = I^2 R.$$

Прибор чувствителен к внешним магнитным полям, поэтому измерительный механизм экранируют. Чувствительность прибора более низкая, чем у магнито-электрических систем.

На циферблате обычно указывают частоту тока цепи: 45-55 - 200 Hz.

45-55 – основная, рабочая частота, при которой прибор наиболее точен в измерениях.

4.4. Электродинамическая система

Принцип действия основан на взаимодействии магнитных полей двух катушек с током.

Устройство показано на **рис. 4.4**. Имеется одна неподвижная катушка, состоящая из двух идентичных половинок. Эта катушка изготовлена из провода большого сечения и содержит малое количество витков.

Между половинками неподвижной катушки на оси располагается небольшая подвижная катушка, содержащая большое количество витков из провода маленького сечения.

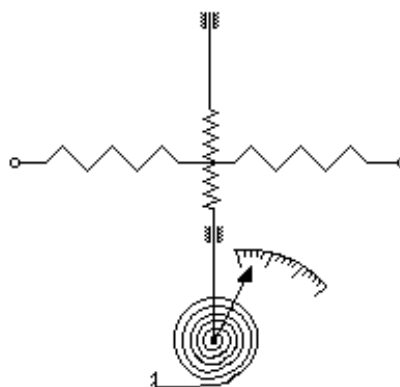


Рис. 4.4

Принцип действия:

- 1) Если катушки соединяют параллельно относительно друг друга, а в цепи последовательно с нагрузкой, то получают *амперметр*.
- 2) Если катушки соединены между собой последовательно, а в цепи параллельно нагрузке, то получают *вольтметр*.
- 3) Если катушки подключают раздельно в цепь: неподвижная катушка последовательно с нагрузкой (значит по ней протекает такой же ток, что и по нагрузке), она называется токовой катушкой, а подвижную катушку параллельно нагрузке, (напряжение на ней равно напряжению на нагрузке, она называется катушкой напряжения), тогда получают или *ваттметр*, или *варметр*, или *фазометр*, или *счётчик электрической энергии*.

В случае раздельного соединения катушек в цепь, через неподвижную катушку протекает ток I_1 , через подвижную катушку - ток I_2 , и в общем случае они могут иметь сдвиг фаз φ .

$$\mu_{\text{вп}} = k_1 I_1 I_2 \cos \varphi - \text{общий случай};$$

$$\mu_{\text{вп}} = k\alpha;$$

- 1) В случае амперметра (**рис. 4.5**) $\mu_{\text{вп}} = U \mu_{\text{вт}} = k_2 I^2$;

$$\alpha = \frac{k_2}{k} I^2 = k_3 I^2;$$

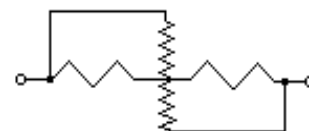


Рис. 4.5

Получают амперметр с квадратичной шкалой, работающий как на переменном, так и на постоянном токе.

Класс точности порядка 1, прибор экранируют, так как он чувствителен к внешним магнитным полям. Сравнительно большая собственная потребляемая мощность, небольшая перегрузочная способность.

4.5. Индуктивная система

Принцип действия основан на взаимодействии двух токов, индуцированных в алюминиевом диске, в результате чего образуется вращающий момент (рис. 4.8)

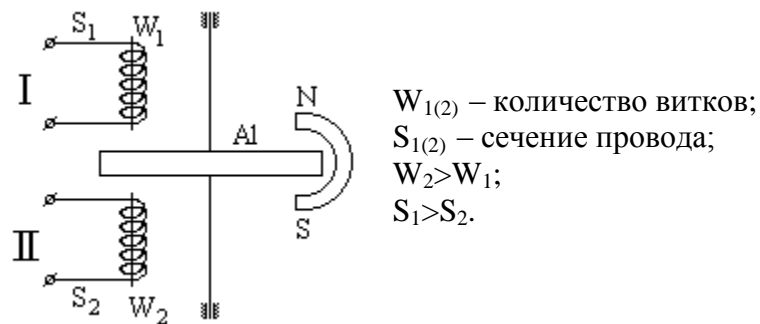


Рис. 4.8

Оси электромагнитов сдвинуты в пространстве друг относительно друга.

Если по катушкам электромагнитов протекают переменные токи с соответствующими силами токов I_1 и I_2 и сдвинуты друг относительно друга на какой-то угол φ , то диск будет вращаться.

Переменные магнитные потоки индуцируют в алюминиевом диске ЭДС и токи, которые порождают вихревые токи (токи Фуко) в диске:

$$\begin{aligned} I_1 &\Rightarrow \Phi_1 \Rightarrow E_{i_1} \Rightarrow I_{i_1}; \\ I_2 &\Rightarrow \Phi_2 \Rightarrow E_{i_2} \Rightarrow I_{i_2}; \end{aligned}$$

Взаимодействие токов I_{i_1} с Φ_2 порождает F_1 :

$$\begin{aligned} I_{i_2} &\rightarrow \Phi_1 \rightarrow F_2; \\ F &= F_1 - F_2 \neq 0; \\ \vec{F}d &= \mu_{\text{вр}}. \end{aligned}$$

Можно показать, что

$$\mu_{\text{вр}} = k_1 I_1 I_2 \cos \varphi,$$

где: k_1 – коэффициент пропорциональности;
 I_1, I_2 – токи;
 φ - сдвиг между токами.

Под воздействием вращающего момента диск начнёт ускоряться. Если диск постоянно не ускорялся, то на краю диска ставят постоянный магнит, который тормозит диск.

$$\mu_{\text{вр}} = k_2 \frac{d\alpha}{dt},$$

где α - угол поворота диска.

Когда $\mu_{\text{вр}} = \mu_{\text{тр}}$ диск будет вращаться равномерно.

4.6. Электростатическая система

Принцип действия основан на электростатическом взаимодействии электрически заряженных пластин (рис.4.10).

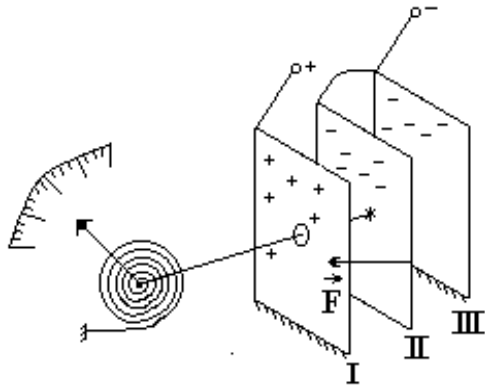


Рис. 4.10

I, III – неподвижны
II – подвижна

Через отверстие в первой пластине проходит тяга, которая закреплена жёстко с пластиной II. Через систему рычагов тяга соединена со шкалой. Пластины II и III соединены электрически и выведены на клемму прибора, как и пластины I.

Если на I – „+”, а на II, III – „-”, то получим конденсатор, и в результате электрического взаимодействия возникает сила \vec{F} .

$$F = k_1 U^2;$$

$$\mu_{пр} = k\alpha;$$

$$\mu_{вр} = k_2 U^2;$$

$\alpha = k_3 U^2$ – угол отклонения стрелки пропорционален напряжению U. Получаем вольтметр.

Прибор имеет почти нулевую потребляемую мощность, может работать в цепях постоянного и переменного тока, класс точности порядка 1.

Применяется для измерения очень больших напряжений напрямую (без трансформаторов). Экранируется от внешних электрических полей.

4.7. Тепловая система

Принцип действия основан на тепловом эффекте электрического тока. Устройство показано на рис. 4.11. Имеется специальный проводник, через который пропускают электрический ток, он нагревается и удлиняется, через систему тяг воздействует на стрелку прибора.

Данная система может иметь биметаллическую пластину или нагревательный элемент с коственным или непосредственным нагревом.



- обозначение прибора с биметаллической пластиной.

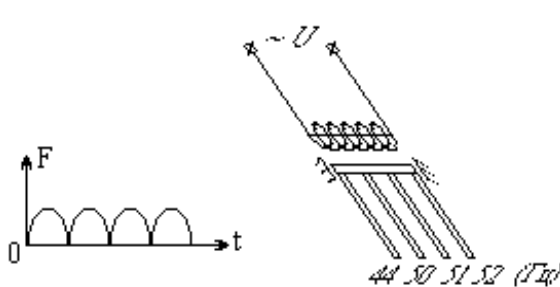


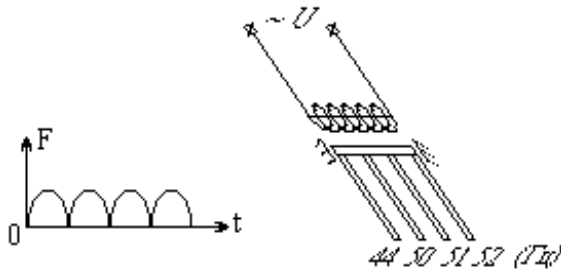
Рис. 4.11

$\Delta l = l_0(1 + \alpha \Delta t)$ – удлинение за счёт теплового расширения.

Эта система используется в качестве комбинации с магнитоэлектрической системой, а чаще всего используют в качестве амперметра, класс точности порядка 1, внешние поля не воздействуют на показания, преимущественно применяют в цепях большой частоты.

4.8. Вибрационная система

Принцип действия основан на явлении механического резонанса. Устройство показано на рис. 4.12. Имеется ряд жёстко соединённых пластин на одном конце. Пластины имеют различные частоты собственных механических колебаний. Над пластинами устанавливают электромагнит, запитываемый переменным напряжением U . Когда по электромагниту протекает переменный ток I , он создаёт переменное магнитное поле, которое заставляет пластину колебаться. Если частота переменного напряжения f , то сила, действующая на пластины, изменится с частотой $2f$.



Та пластина, которая имеет собственную частоту колебания, близкую к частоте вынуждающей силы, войдёт в механический резонанс, то есть амплитуда её колебаний увеличится. Этот прибор называется герцметром (частотометром).

Подключают в цепь, как вольтметр. Класс точности порядка $2 \div 2,5$. Сравнительно низкая собственная потребляемая мощность. Чувствителен к внешним колебаниям.

Рис. 4.12

ГЛАВА V. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

5.1. Устройство машины постоянного тока

Принцип обратимости машин постоянного тока состоит в следующем: одна и та же машина может работать или в режиме генератора или в режиме двигателя и устройство их одно и то же.

Устройство: Машина состоит из статора (неподвижная часть) и ротора (подвижная часть). Статор представляет собой цилиндрическую полость, изготовленную из пластин электротехнической стали, и на внутренней поверхности прикрепляется:

1) симметрично относительно друг друга главные магнитные полюса с полюсными наконечниками их может быть 2, 4 (самые распространенные). Когда их два, говорят, что машина обладает одной парой магнитных полюсов $P = 1$;

2) между ними также симметрично располагаются компенсационные полюса с компенсационной обмоткой и их столько же, сколько пар магнитных полюсов. Компенсационная обмотка состоит из двух полуобмоток. В некоторых машинах на статоре могут быть дополнительные магнитные полюса для улучшения коммутации. Главные магнитные полюса создают основное магнитное поле.

Ротор состоит из вала, на котором в пазах устанавливают секции обмоток ротора. Условно можно представить себе одну секцию обмотки ротора как один виток, концы которого прикреплены к пластинам, которые создают коллекторное устройство.

Коллектор – это совокупность изолированных между собой и изолированных от оси пластин, которые соприкасаются со щётками. Щётки изготавливаются из различных сортов графита, которые имеют выводы к клеммам машины.

Машины постоянного тока в режиме генератора имеют следующий принцип работы:

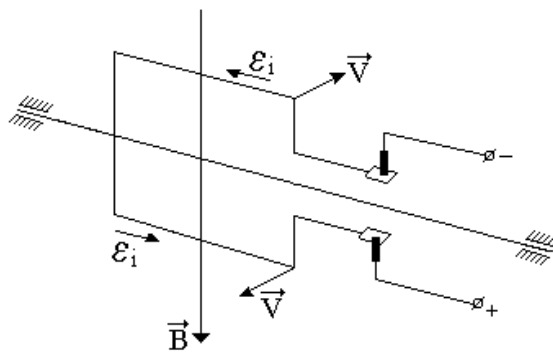


Рис. 5.1

первичная машина раскручивает ротор со скоростью n (об/мин). Главные магнитные полюса образуют основное магнитное поле машины, которое характеризуется индукцией B или магнитным потоком Φ . У некоторых генераторов применяют в качестве основных магнитных полюсов постоянные магниты. В этом случае B – постоянная величина. У генераторов большой мощности главные магнитные полюса

представляют собой электромагнит постоянного тока, обмотки этих электромагнитов называют *обмотками возбуждения*, а ток, текущий по ним,

называют *током возбуждения* I_B .

В независимости от способа получения основного магнитного поля при вращении ротора, секции обмотки ротора пересекают силовые линии основного магнитного поля, и согласно закону электромагнитной индукции, в них индуцируется переменное ЭДС (рис. 5.1):

$$\mathcal{E}_i = -W \frac{d\Phi}{dt},$$

где W – количество витков данной секции.

Во всех секциях ротора индуцируется переменное ЭДС, но с некоторыми пластинами коллектора находятся в соприкосновении щётки, которые снимают эту разность потенциалов и подают её на выводы ротора.

5.2. Генератор с независимым возбуждением и его характеристики

В данном случае обмотка возбуждения электрически не связана с якорем и запитывается от постороннего источника постоянного тока (рис. 5.3).

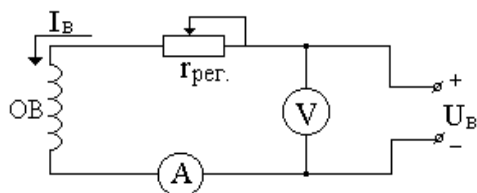


Рис. 5.3

Если к обмотке якоря не подключена нагрузка, имеем режим холостого хода $I_{\text{я}} = I_{\text{н}} = 0$, $R_{\text{н}} = \infty$. Это значит, что первичный двигатель вращает ротор с номинальной и постоянной скоростью, но нагрузка не подключена.

Назовём *характеристикой холостого хода* генератора (любого типа) зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения при номинальной и постоянной частоте вращения ротора и бесконечном сопротивлении нагрузки (рис. 5.4):

$$\mathcal{E} = f(I_{\text{в}}), \text{ при } n=n_{\text{н}}=\text{const}, R_{\text{н}}=\infty.$$

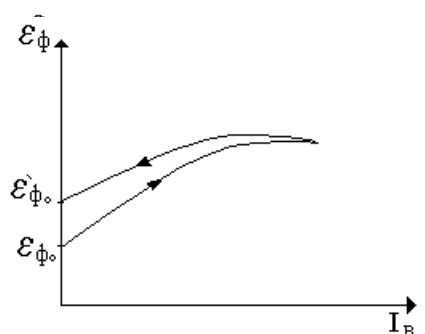


Рис. 5.4

Экспериментально получают следующим образом:

- 1) Отключается источник возбуждения $I_{\text{в}} = 0$.
- 2) Запускают первичный двигатель и устанавливают $n=n_{\text{н}}=\text{const}$ номинальную частоту и поддерживают постоянной. $n_{\text{н}}$ — указывается на двигателе.
- 3) Подключают вольтметр к якорной обмотке, которая на холостом ходу измерит ЭДС генератора, и снимем показания. В данном

случае $\mathcal{E}_0 \approx 5 \div 15 \text{ В}$.

ЭДС \mathcal{E}_0 определяется остаточной намагниченностью сердечников обмотки возбуждения. Выводы обмотки возбуждения должны быть подключены таким образом, чтобы магнитное поле, которое создаётся током возбуждения, усиливало магнитное поле остаточной намагниченности.

Если включив источник возбуждения и увеличивая ток возбуждения регулировочным реостатом и машина не возбуждается (ЭДС очень мало), значит необходимо поменять местами концы обмотки возбуждения.

4) Постепенно увеличивая ток возбуждения до номинальных значений, указанных в паспорте машины, снимаем значения ЭДС. В начале получим почти прямолинейный участок зависимости ЭДС от $I_{\text{в}}$, затем график имеет более пологий вид и дальнейшее увеличение $I_{\text{в}}$ не выгодно с энергетической точки зрения, так как ЭДС уже остаётся почти постоянной, а потери на нагрев увеличатся.

Почти горизонтальный участок определён явлением магнитного насыщения сердечника обмотки возбуждения.

Если уменьшать $I_{\text{в}}$, то кривая пойдёт выше, и при $I_{\text{в}} = 0$ получим \mathcal{E}'_0 и всегда $\mathcal{E}'_0 > \mathcal{E}_0$ за счёт намагничивания сердечника обмотки возбуждения.

Реакция якоря

Реакция якоря представляет собой явление, приводящее к изменению величины и направления результирующего магнитного поля машины при нагрузке.

5.3. Генератор параллельного возбуждения

1) На холостом ходу $R_n = \infty$, $I_n = 0$, это генератор с самовозбуждением, это значит, что ток возбуждения генерируется самим генератором (**рис. 5.11**).

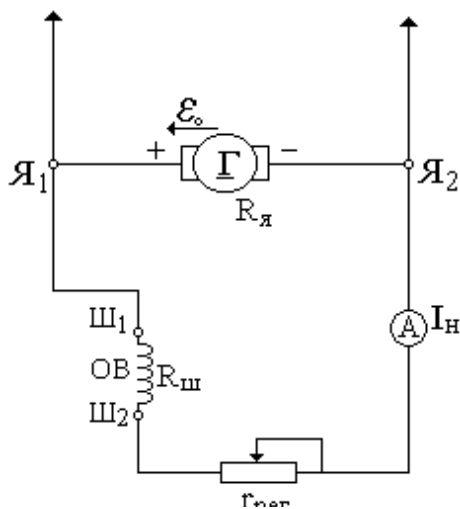


Рис. 5.11

Условия для самовозбуждения:

- 1) согласное включение обмотки возбуждения. При перемене мест клем Ш₁ и Ш₂ изменяется направление основного магнитного потока. Чтобы машина самовозбуждалась, необходимо, чтобы магнитный поток обмотки имел такое же направление, что и магнитный поток остаточной намагниченности сердечника обмотки возбуждения;
- 2) сопротивление в цепи обмотки возбуждения должно быть меньше какого-то критического значения;
- 3) машина должна обладать остаточной намагниченностью.

Последовательность получения характеристики холостого хода (**рис. 5.12**): включают первичный двигатель и устанавливают $n = n_n = const.$, $r_{рез.} = r_{рез. min}$, благодаря остаточной намагниченности сердечника обмотки возбуждения в генераторе возбуждается ЭДС \mathcal{E}_0 .

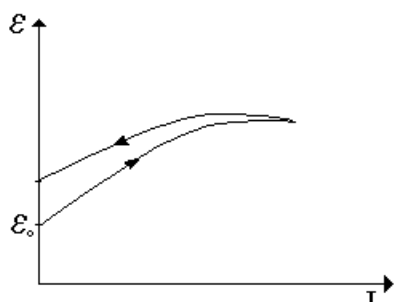


Рис. 5.12

Под воздействием этого ЭДС в цепи возбуждения

$$\text{появляется ток } I_B = \frac{\mathcal{E}_0}{R_я + R_{ш} + r_{рез.}}$$

Если обмотка возбуждения включена согласно, то ток возбуждения создаст небольшое магнитное поле \vec{B} .

$$B > B_0 \Rightarrow \mathcal{E} > \mathcal{E}_0,$$

$$B + B_0 = B_{рез.} \uparrow \Rightarrow \mathcal{E} \uparrow \Rightarrow I_B \uparrow \Rightarrow B_{рез.} \uparrow \Rightarrow \mathcal{E} \uparrow \Rightarrow \dots$$

Это объясняет самовозбуждение машины. Машина входит на номинальный режим.

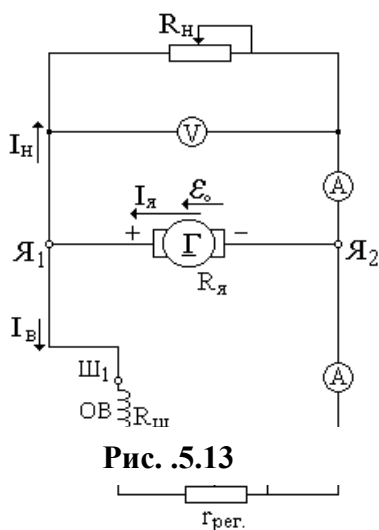


Рис. 5.13

2) Работа под нагрузкой (**рис. 5.13**) и внешняя характеристика $R_n \neq \infty$, $I_n \neq 0$.

Характеристику получают следующим образом:

1) На холостом ходу $R_n \neq \infty$ включают первичный двигатель и устанавливают:

$$n = n_n = const;$$

$$I_B = I_{Bн} = const;$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_n.$$

2) Подключаем максимальное сопротивление $R_n = R_{nmax}$ и постепенно его уменьшая, снимаем показания амперметра и вольтметра цепи нагрузки.

$$I_я = I_n + I_B - \text{согласно I-му закону Кирхгофа.}$$

Согласно II-му закону Кирхгофа для цепи нагрузки:

5.4. Генератор последовательного возбуждения и его характеристики

Этот генератор ещё называют серийным (последовательный), поэтому выводы обмотки возбуждения обозначим через C_1 и C_2 (рис. 5.15). Через обмотку возбуждения в случае наличия нагрузки будет протекать весь ток нагрузки.

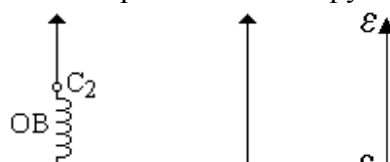
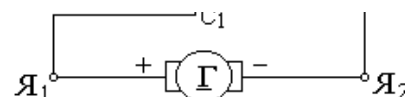
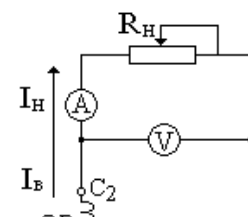
1) Характеристика холостого хода $R_n = \infty, I_n = 0$.

Так как обмотка возбуждения соединена последовательно с нагрузкой, то $I_B = 0$, вся характеристика преобразуется в одну точку и благодаря остаточной намагниченности генератора имеем некоторое \mathcal{E}_0 (рис. 5.16).

2) Внешняя характеристика.

1) Включают первичный двигатель и устанавливают $n = n_n = \text{const}$ при $R_n = \infty$.

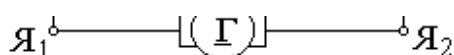
2) Подключают на выходе генератора вольтметр, который будет определять напряжение на нагрузке. Через амперметр включаем максимальное сопротивление нагрузки.



$$I_B = I_n,$$

$$R_n = R_{nmax}.$$

Снимаем показания вольтметра и амперметра.



3) Постепенно увеличиваем нагрузку и доводим ток нагрузки до значений, которые превышают $I_{ном}$ на 10 – 20 % (рис. 5.17).

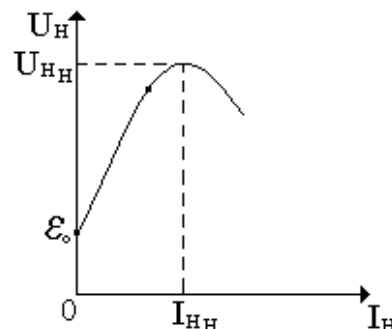
При включении первичного двигателя на холостом ходу генератор вырабатывает небольшое ЭДС \mathcal{E}_0 . При увеличении нагрузки $R_n \uparrow$, а это приводит к тому, что

$$I_n = I_B = \frac{\mathcal{E}}{R_n + R_B + R_n} \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow \Rightarrow \mathcal{E} \uparrow,$$

$$\underbrace{I_n R_n}_{U_n} + \underbrace{I_n R_B + I_n R_\gamma}_{\Delta U} = \mathcal{E},$$

$$U_n = \mathcal{E} - \Delta U.$$

Рис. 5.17



При небольших токах нагрузки машина не насыщена и ЭДС увеличивается быстрее, чем падение напряжения ΔU , и фактически на начальном участке это линейная зависимость. При больших нагрузках машина насыщается, ЭДС уже не так быстро возрастает и график уже отклоняется от прямолинейной зависимости. При номинальных токах нагрузки и чуть больших этого тока машина насыщена, ЭДС почти не изменяется, но ΔU продолжает увеличиваться ($\Delta U = I_n (R_n + R_B)$).

Значения I_n и U_n выбираются близко к вершине. Видно, что напряжение на нагрузке очень сильно зависит от величины нагрузки. Поэтому данный генератор используют, когда нагрузка постоянна.

5.4. Генератор последовательного возбуждения и его характеристики

Этот генератор ещё называют серийным (последовательный), поэтому выводы обмотки возбуждения обозначим через C_1 и C_2 (рис. 5.15). Через обмотку возбуждения в случае наличия нагрузки будет протекать весь ток нагрузки.

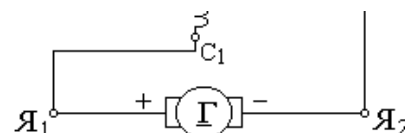
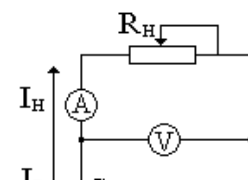
3) Характеристика холостого хода $R_n = \infty, I_n = 0$.

Так как обмотка возбуждения соединена последовательно с нагрузкой, то $I_B = 0$, вся характеристика преобразуется в одну точку и благодаря остаточной намагниченности генератора имеем некоторое \mathcal{E}_0 (рис. 5.16).

4) Внешняя характеристика.

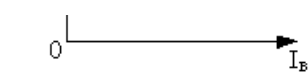
4) Включают первичный двигатель и устанавливают $n = n_n = \text{const}$ при $R_n = \infty$.

5) Подключают на выходе генератора вольтметр, который будет определять напряжение на нагрузке. Через амперметр включаем максимальное сопротивление нагрузки.



$I_B = I_n,$
 $R_n = R_{nmax}.$

Снимаем показания
вольтметра и амперметра.



6) Постепенно увеличиваем нагрузку и доводим ток нагрузки до значений, которые превышают $I_{ном}$ на 10 – 20 % (рис. 5.17).

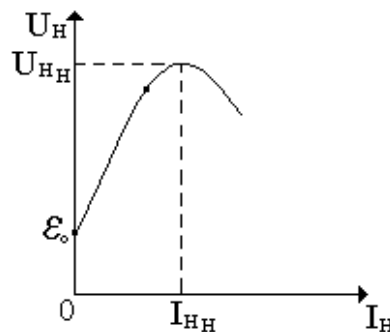
При включении первичного двигателя на холостом ходу генератор вырабатывает небольшое ЭДС \mathcal{E}_0 . При увеличении нагрузки $R_n \uparrow$, а это приводит к тому, что

$$I_n = I_B = \frac{\mathcal{E}}{R_n + R_B + R_n} \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow \Rightarrow \mathcal{E} \uparrow,$$

$$\underbrace{I_n R_n}_{U_n} + \underbrace{I_n R_B + I_n R_\gamma}_{\Delta U} = \mathcal{E},$$

$$U_n = \mathcal{E} - \Delta U.$$

Рис. 5.17



При небольших токах нагрузки машина не насыщена и ЭДС увеличивается быстрее, чем падение напряжения ΔU , и фактически на начальном участке это линейная зависимость. При больших нагрузках машина насыщается, ЭДС уже не так быстро возрастает и график уже отклоняется от прямолинейной зависимости. При номинальных токах нагрузки и чуть больших этого тока машина насыщена, ЭДС почти не изменяется, но ΔU продолжает увеличиваться ($\Delta U = I_n (R_\gamma + R_B)$).

Значения I_n и U_n выбираются близко к вершине. Видно, что напряжение на нагрузке очень сильно зависит от величины нагрузки. Поэтому данный генератор используют, когда нагрузка постоянна.

5.5. Генератор смешанного возбуждения и его характеристики

Это генератор имеет две обмотки возбуждения: одну – соединённую параллельно якорю (шунтовая), вторую – последовательно с якорем (серийная) (рис. 5.18). Это

соединение шунтового и серийного генераторов. Шунтовую обмотку возбуждения изготавливают из обмотки, содержащей большое количество витков небольшого сечения, а серийная – имеет небольшое количество витков большого сечения, так как по ней протекает весь ток нагрузки.

Характеристику холостого хода данного генератора получают таким же образом. Как и характеристику холостого хода генератора параллельного возбуждения, и она является подобной той характеристике. Это генератор называют ещё компаунд – генератор (смешанный).

Внешнюю характеристику получают в зависимости от способов соединения обмоток возбуждения между собой.

Согласное включение обмоток возбуждения, то есть когда магнитные потоки шунтовой и серийной обмоток возбуждения имеют одинаковые направления.

Последовательное получение внешней характеристики (рис. 5.19):

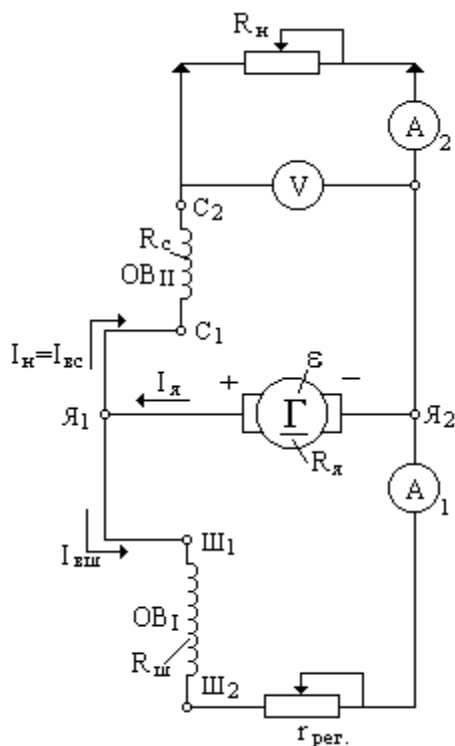
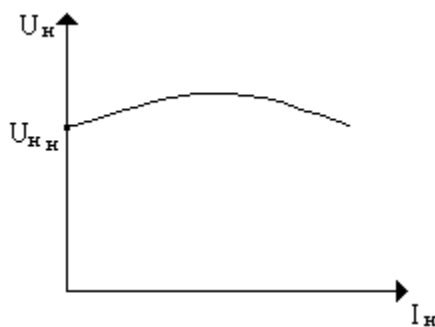


Рис. 5.18

- 1) На холостом ходу генератора $R_n = \infty$. Включаем первичный двигатель при $r_{рег.} = r_{рег. min}$ и устанавливаем $n = n_n = const$.



- 2) Устанавливают реостатом $r_{рег.}$ такой ток возбуждения через шунтовую обмотку, чтобы вольтметр показывал номинальное напряжение генератора.

- 3) Не изменяя положение скользящего контакта $r_{рег.}$, подключаем

нагрузку на максимальное сопротивление $R_n = R_{n max}$ и снимаем показания вольтметра.

- 4) Постепенно увеличивая нагрузку ($R_n \uparrow$), снимаем показания U нагрузки и I нагрузки.

Согласно I-му закону Кирхгофа:

$$I_{я} = I_{вш} + I_{вс},$$

$$I_{вс} = I_n.$$

Согласно II-му закону Кирхгофа для нижней обмотки:

$$\mathcal{E} = I_{BIII} \cdot R_{III} + I_{BIII} \cdot r_{рег.} + I_{я} R_{я} = I_{BIII} (R_{III} + r_{рег.}) + I_{я} R_{я},$$

$$I_{BIII} = \frac{\mathcal{E} - I_{я} R_{я}}{R_{III} + r_{рег.}}$$

Согласно II –му закону Кирхгофа для верхнего контура:

$$\mathcal{E} = I_{н} \cdot R_c + \underbrace{I_{н} \cdot R_{н}}_{U_{н}} + I_{я} R_{я},$$

$$U_{н} = \mathcal{E} - I_{н} R_c - I_{я} R_{я},$$

так как I_{BIII} при номинальном режиме генератора $\ll I_{нн}$, поэтому $I_{я} \approx I_{н}$. R_c очень мало, и поэтому падением напряжения $I_{н} R_c$ можно пренебречь $I_{н} R_c \approx 0$.

$U_{н} = \mathcal{E} - I_{н} R_{я}$ - приближённое уравнение для данного генератора.

1) В данном случае, когда обмотки возбуждения включены согласно, при небольших токах нагрузки машина намагничивается благодаря серийной обмотке возбуждения и напряжение на нагрузке увеличивается:

$$\Phi_c \uparrow \uparrow \Phi_{ш}, \Phi \uparrow \Rightarrow \mathcal{E} \uparrow$$

Увеличивается быстрее, чем $I_{н} R_{я} \Rightarrow U_{н} \uparrow$.

При увеличении нагрузки сказывается падение напряжения на якоре и насыщение сердечника серийной обмотки возбуждения. Выбирается номинальный режим генератора в зависимости от требуемого напряжения на нагрузке.

2) Встречное включение обмоток возбуждения, то есть магнитные потоки противоположны.

При увеличении нагрузки ток нагрузки, протекая через серийную обмотку возбуждения, размагничивает

машину (уменьшается ЭДС) и в результате $U_{н}$ резко уменьшается:

$$\Phi_{ш} \uparrow \downarrow \Phi_c,$$

$$\Phi \downarrow \Rightarrow \mathcal{E} \downarrow,$$

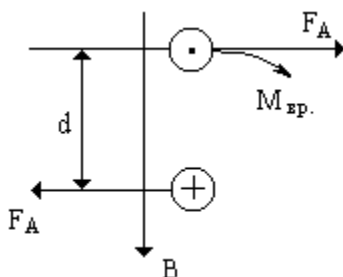
$$U_{н} = I_{н} R_{я} = 0.$$

Этот генератор используется в качестве сварочного генератора постоянного тока. При сварке сопротивление между электродом и деталью очень мало и фактически генератор работает в режиме короткого замыкания (рис. 5.20).

5.6. Двигатели постоянного тока

1. Устройство двигателей не отличается от устройства генератора постоянного тока.
2. Способы возбуждения двигателей такие же, как и у генераторов постоянного тока.

Принцип действия двигателя постоянного тока основан на взаимодействии проводника с током, помещённого в магнитное поле.



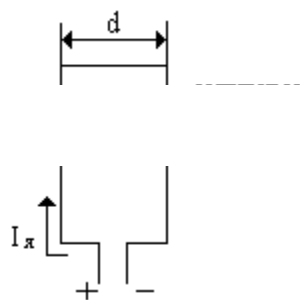
Подключая двигатель к сети постоянного тока, через обмотку возбуждения протекает ток, который создаёт основное магнитное поле машины.

Одновременно и через якорь машины протекает ток, то есть секции обмотки якоря находятся в магнитном поле обмотки возбуждения.

По закону Ампера на каждую из активных сторон секции обмотки якоря действуют силы Ампера (рис. 5.21):

$$F_A = I_{\text{я}} Bl \sin \alpha .$$

Одна секция обмотки якоря:



$$M_{\text{эп}} = F_A \cdot d ;$$

$$\alpha = 90^0 ;$$

$$F_A = I_{\text{я}} Bl ,$$

где d – диаметр якоря.

Способы реверсирования двигателей постоянного тока:

- 1) Изменяем направление тока в якоря, поддерживая то же направление тока в обмотке возбуждения.
- 2) Изменяем направление тока возбуждения, сохраняя прежнее направление тока якоря.

Переполюсовка двигателя к сети постоянного тока не приводит к реверсированию двигателя, так как мы меняем и ток возбуждения и ток якоря.

5.7. Вращающий момент двигателя постоянного тока. Пуск двигателя постоянного тока

Вращающий момент двигателя постоянного тока:

$$M_{\text{эп}} = F_A \cdot d = I_{\text{я}} Bld$$

$M_{\text{эп}} = k_M I_{\text{я}} \Phi$ - вращающий момент двигателя постоянного тока независимо от способа возбуждения.

k_M - обусловлен спецификой конструкции якоря.

Пуск двигателя постоянного тока:

При подключении двигателя к сети постоянного тока напряжением U его ротор в начальный момент времени неподвижен $n = 0$. Согласно закону Ома ток якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}}} ;$$

$$I_{\text{я}} \approx (10 \div 30) I_{\text{ян}}$$

этот ток может привести к искрению на коллекторе и даже выходу из строя щёток и пластин коллектора. Импульс пускового тока отрицательно сказывается на остальных потребителях, подключённых к данной сети.

Для уменьшения пускового тока двигателей применяют пусковые реостаты, включаемые последовательно с якорем. Сопротивление пускового реостата выбирается таким, чтобы при пуске ($n = 0$):

$$I_{я} = \frac{U}{R_{я} + R_n} \approx (2 \div 3) I_{я_n}.$$

Когда ротор набирает обороты, в нём самоиндуцируется противо ЭДС \mathcal{E} и тогда ток якоря $I_{я}$ станет равным:

$$I_{я} = \frac{U - \mathcal{E}}{R_{я} + R_n},$$

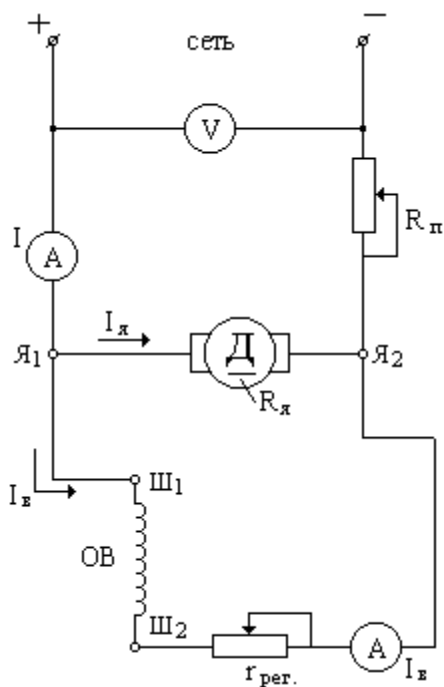
поэтому R_n выводится ($R_n = 0$).

Противо ЭДС вычисляется по той же формуле, что и для генераторов:

$$\mathcal{E} = k_{\varepsilon} \Phi n.$$

При пуске, когда $n = 0 \Rightarrow \mathcal{E} = 0$.

5.8. Двигатель с параллельным возбуждением и его механическая характеристика



Электрическая схема двигателя с параллельным возбуждением показана на рис. 5.22.

$$n = 0;$$

$$\mathcal{E} = 0;$$

$$R_n = R_{n_{\max}}.$$

$r_{рег.} = r_{рег.\min}$ для того, чтобы увеличить ток возбуждения.

$$I_B = I_{B_{\max}} \Rightarrow \Phi = \Phi_{\max} \Rightarrow M_{ер} = k_M I_{я} \Phi.$$

После того, как двигатель увеличит частоту вращения, увеличивается ЭДС, которое равно $\mathcal{E} = k_{\varepsilon} \Phi n$ и ток якоря становится:

$$I_{я} = \frac{U - \mathcal{E}}{R_{я}},$$

если R_n вывести, то изменение сопротивления $r_{рег.}$ приводит к изменению I_B , а это приводит к изменению Φ и к изменению $M_{ер}$, что приводит к изменению n . То есть $r_{рег.}$ служит для регулирования частоты вращения ротора двигателя.

Рис. 5.22

Назовём механической характеристикой двигателя постоянного тока зависимость частоты вращения ротора от момента сопротивления на валу двигателя при номинальном и постоянном напряжении сети и в некоторых случаях, при неизменном токе возбуждения (рис.5.23):

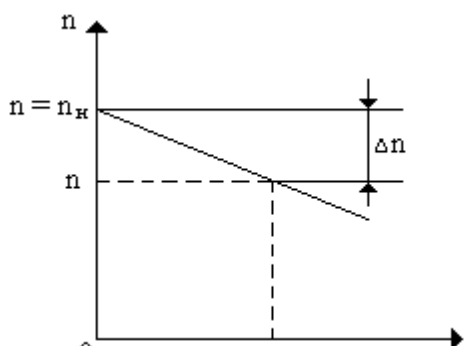


Рис. 5.23

$$n = f(M_c),$$

$$U = U_n = const.$$

Способ получения характеристики:

1) До включения двигателя в сеть производим все соединения и устанавливаем $R_n = R_{n_{max}}$, $r_{рег.} = r_{рег. min}$ и включаем двигатель на номинальное и постоянное напряжение сети $U = U_n = const.$

2) Подключаем двигатель к сети и с набором частоты вращения постепенно выводим пусковой реостат, и тогда к двигателю будет подано всё напряжение сети. С помощью $r_{рег.}$ на холостом ходу двигателя ($M_c = 0$). Устанавливаем номинальную частоту вращения (по паспорту).

3) Постепенно нагружаем двигатель, снимая показания тока, потребляемого из сети и тока возбуждения I_B .

$$\text{Согласно I – му закону Кирхгофа: } I = I_a + I_B.$$

В данном случае $r_{рег.}$ не регулируют больше ток возбуждения $I_B = const.$, и при увеличении момента сопротивления M_c на валу двигателя ток, потребляемый из сети, увеличится. Нагружают двигатель до тех пор, пока I_a не станет $\approx 1,2 I_{a_n}$. В данном случае скорость вращения ротора уменьшится линейно относительно M_c . Эта характеристика является сравнительно жёсткой, то есть, уменьшение частоты вращения ротора при увеличении M_c от нуля до номинального значения незначительно ($\Delta n \approx$ несколько десятков $\frac{об}{мин}$). Для уменьшения падения частоты вращения с увеличением нагрузки, увеличивают ток возбуждения:

$$I_B \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow \Rightarrow M_{вр} \uparrow \Rightarrow n \uparrow.$$

Скорость вращения станет неизменной, когда:

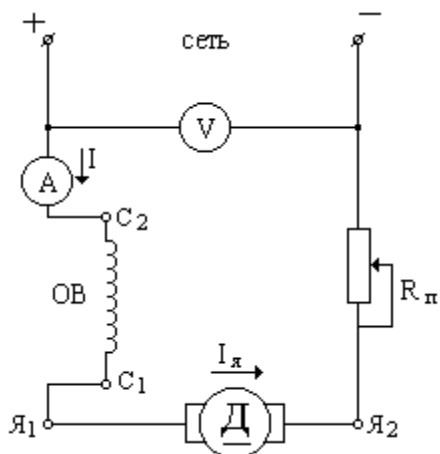
$$\boxed{M_{вр} = M_c} \text{ - или вращается с постоянной скоростью или не вращается вообще.}$$

$$n = const.$$

5.9. Двигатель последовательного возбуждения

Электрическая схема двигателя с параллельным возбуждением показана на рис. 5.23.

$$I_B = I_a = I_{сети}.$$



Механическую характеристику получают при $I_B = \text{var}$.

Последовательность:

- 1) Производят все соединения схемы и устанавливают: $R_n = R_{n_{\max}}$, $U = U_n = \text{const}$ и подключают двигатель в сеть.

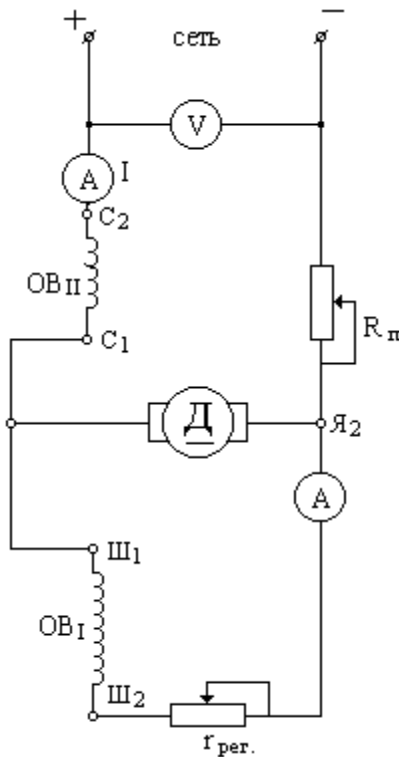
Рис. 5.23

2) Так как этот двигатель не имеет постоянной частоты вращения на холостом ходу, необходимо быстро начинать загрузку двигателя, иначе на холостом ходу n увеличивается очень быстро и двигатель входит в резонанс.

Допускается работа двигателя с нагрузкой минимум 25% от его номинальной нагрузки.

5.10. Двигатель смешанного возбуждения и его механическая характеристика

Схема двигателя показана на рис. 5.24 (она же применяется и для снятия характеристики).



$$I = I_{B_n}$$

Последовательность получения механической характеристики (рис. 5.25):

- 1) Производим все соединения схемы.
- 2) Устанавливаем $R_n = R_{n_{\max}}$, $r_{рег.} = r_{рег.-\min}$.
- 3) Включаем двигатель в сеть и с набором частоты вращения выводим R_n полностью $R_n = 0$, $U_c = U_{cn} = \text{const}$. Устанавливаем $r_{рег.}$ в таком положении, чтобы на холостом ходу ($M_c = 0$) частота вращения: $n = n_n$.

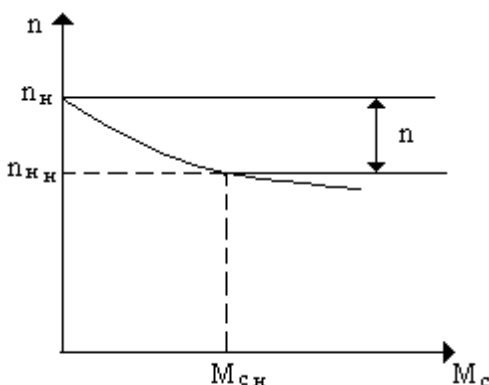
4) Постепенно увеличиваем M_c и каждый раз снимаем показания: $M_c, I, I_{B_i} = \text{const}$. $r_{рег.}$ больше не трогаем, снимаем показания n .

Так как данный двигатель представляет собой комбинацию из двигателя параллельного возбуждения и двигателя последовательного возбуждения, то и его механическая характеристика представляет собой комбинацию механических характеристик двух

двигателей.

Двигатель с параллельным возбуждением на холостом ходу имеет $n = \text{const}$,

двигатель последовательного возбуждения не может работать на холостом ходу. С увеличением нагрузки частота вращения двигателя параллельного возбуждения уменьшается линейно, а у двигателя последовательного возбуждения уменьшается гиперболически. Поэтому механическая характеристика двигателя смешанного возбуждения имеет вид показанный на рис. 5.25.



Механическая характеристика является более жёсткой по сравнению с характеристикой двигателя последовательного и параллельного возбуждения. При увеличении M_c :

$$M_c \uparrow \Rightarrow M_c > M_{вр} \Rightarrow n \downarrow \Rightarrow \mathcal{E} = k_\varepsilon \Phi_n \downarrow \Rightarrow I = \frac{U - \mathcal{E}}{R_\varepsilon + R_{BII}} \uparrow \Rightarrow I = I_{BII} \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow \Rightarrow \mathcal{E} \uparrow \Rightarrow I \rightarrow const.$$

Обмотка возбуждения серийная в случае двигателей всегда включается согласно с шунтовой обмоткой возбуждения.

Это принцип выхода двигателя на устойчивый режим работы. Он действует, когда M_c содержится в пределах: $0 < M_c < (1,5 \div 2,5)M_{сн}$, то есть коэффициент показывает перегрузочную способность двигателя. При очень большом M_c n резко упадёт, ротор остановится, значит:

$$n \downarrow \Rightarrow \mathcal{E} = 0 \Rightarrow I = \frac{U - \mathcal{E}}{R_\varepsilon + R_{BII}} \uparrow \uparrow \Rightarrow \text{начинаются искрения на коллекторе, выходят из строя}$$

щётки, коллектор, перегревается серийная обмотка возбуждения и якорь, может сгореть серийная обмотка и секции обмотки якоря или будет короткое замыкание между витками обмоток.

В последнее время в связи с созданием ферромагнитных материалов с очень большой магнитной проницаемостью (μ) и очень небольшой площадью петли гистерезиса, созданы двигатели с постоянными магнитами. В данном случае регулировка частоты вращения и вращающего момента в определённых пределах производят изменением напряжения питания. Более сложные двигатели большой мощности применяют со смешанной системой возбуждения, тогда применяют и постоянные магниты, и обмотки возбуждения. Регулирование тока через обмотки возбуждения может привести к увеличению или к уменьшению общего магнитного потока. Соответственно меняется $M_{вр}$ и n .

ГЛАВА VI. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Статическая машина, предназначенная для преобразования электрической энергии одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения без изменения частоты, называется *трансформатором*.

Трансформатор работает только на переменном токе.

6.1. Классификация трансформаторов

1. По форме сердечника:

П – образный сердечник



Ш – образный сердечник



Тороидальный



2. По количеству фаз:

- ◆ однофазные;
- ◆ трёхфазные;
- ◆ многофазные.

3. По назначению:

- ◆ силовые;
- ◆ повышающие;
- ◆ понижающие;
- ◆ согласующие;
- ◆ измерительные (напряжения и тока);
- ◆ сварочные и другие.

Рассмотрим самый простой двухобмоточный однофазный трансформатор с П – образным сердечником.

Устройство (рис. 6.1) : Имеется сердечник из пластин электротехнической стали и две обмотки: W_1 и W_2 . Пусть $W_1 > W_2$, тогда выводы первой обмотки обозначим через А и Х и обмотку назовём *обмоткой высокого напряжения*, а вторую – *обмоткой низкого напряжения*. Обмотка, подключённая к сети, называется *первичной*, а обмотка, которая подключается к потребителю, называется *вторичной*.

Каждая из обмоток трансформатора рассчитана на свой номинальный ток и напряжение, а эти параметры задаются в паспорте трансформатора.

Трансформатор может быть подключён к сети любой обмоткой, лишь бы напряжение данной обмотки было равно напряжению сети.

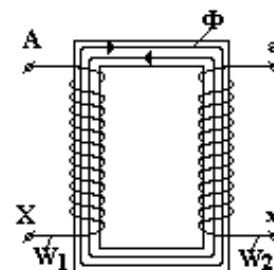


Рис. 6.1

Трансформатор имеет следующие режимы работы:

1) режим холостого хода (когда нагрузка не подключена):

$$Z_H = \infty \text{ и } I_2 = 0;$$

2) режим нагрузки (нагрузка подключена);

3) режим короткого замыкания (режим для исследования трансформатора, когда $Z_H \rightarrow 0$).

6.2. Режим холостого хода

Все параметры, относящиеся к первичной катушке, обозначим индексом 1, а ко второй – индексом 2.

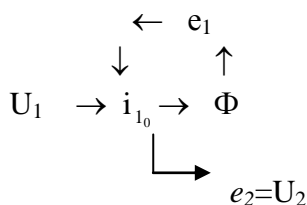
Принцип действия следующий : к первичной обмотке подаётся переменное напряжение U_1 . Под действием U_1 появляется переменный ток i_{1_0} - холостого хода, который создаёт магнитный поток, силовые линии которого замыкаются в основном через ферромагнитный сердечник:

$$U_1 \rightarrow i_{1_0} \rightarrow \Phi,$$

где Φ – называют основным магнитным потоком трансформатора.

Магнитный поток пересекает и первичную и вторичную катушки. Так как поток является переменным, то по закону электромагнитной индукции и в первичной и во вторичной катушке индуцируется ЭДС индукции.

Логическая схема работы трансформатора на холостом ходу:



Для первичной катушки второй закон Кирхгофа записывается для действующих значений:

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{I}_{1_0} r_1,$$

где r_1 – активное сопротивление первичной обмотки.

$$\dot{I}_{1_0} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{E}_1}{r_1} \text{ - ток холостого хода трансформатора.}$$

Ток холостого хода определяется как \dot{U}_1 , так и \dot{E}_1 , поэтому e_1 воздействует на i_{1_0} .

Синусоидальное напряжение порождает синусоидальный ток и синусоидальный магнитный поток:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t.$$

Тогда:

$$e_1 = -W_1 \frac{d\phi}{dt} = -W_1 \phi_m \omega \cos \omega t = W_1 \Phi_m \omega \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{m_1} \sin(\omega t - 90^\circ).$$

Сравнивая законы ЭДС и магнитного потока, делаем вывод, что e_1 отстаёт от Φ на 90° , так же как и e_2 . Действующее значение ЭДС индукции определяется по формулам:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m;$$

6.3. Потери в меди и стали трансформатора

Потери в меди трансформатора

Обмотки трансформатора обычно делают из меди (иногда из алюминия). При прохождении через обмотки трансформатора тока, в них выделяется джоулево тепло и затрачиваемая мощность называется *потерей в меди* (P_{cu}):

$$P_{cu_1} = I_1^2 r_1 \text{ и } P_{cu_2} = I_2^2 r_2 .$$

Потери в стали трансформатора

Сердечники изготавливают из электротехнической стали (Э59, Э63).

Назначение сердечника:

- 1) является проводником для магнитного потока (Φ) (сердечники называют магнитопроводом, так как магнитная проницаемость ферромагнетика очень большая по сравнению с воздухом $\mu \gg 1$);
- 2) за счёт большого значения μ , магнитный поток в сердечнике усиливается;
- 3) увеличивается индуктивное сопротивление X_L обмоток за счёт увеличения индуктивности L .

В процессе работы сердечник нагревается, то есть имеют место потери мощности, которые обозначают через P_{Fe} и называют *потерями в стали*.

Эти потери имеют две составляющие:

- 1) за счёт токов индукции (токи Фуко);
- 2) потери на магнитном гистерезисе.

Переменный магнитный поток замыкается по сердечнику, индуцирует в самом сердечнике ЭДС индукции, которая в свою очередь порождает замкнутые (кольцевые, вихревые, индукционные) токи (токи Фуко) (**рис. 6.2**).

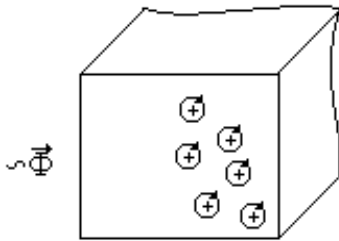


Рис. 6.2

Величина токов индукции зависит от скорости изменения магнитного потока во времени, который определяет величину ЭДС индукции:

$$\frac{d\Phi}{dt} = -E_i ,$$

и от электрического сопротивления материала сердечника:

$$I_i = \frac{E_i}{r} ,$$

где r – сопротивление, характеризующее сам сердечник.

Эти токи, согласно закону Джоуля – Ленца, выделяют большое количество теплоты, то есть электрическая энергия безвозвратно преобразуется в тепловую, следовательно имеют место потери мощности, которые называют *потерями за счёт вихревых токов* (P_V). Для уменьшения этих потерь сердечники делают не цельными, а из пластин толщиной $0,3 \div 0,5$ мм. Пластины изолируют между собой лаком или бумагой, тем самым уменьшая объёмы, в которых могут замыкаться индукционные токи, то есть увеличивают сопротивление:

6.4. Катушка без сердечника

Катушка без сердечника имеет следующую эквивалентную схему показану на **рис. 6.4**; она обладает каким-то активным сопротивлением r , и идеальной индуктивностью L .

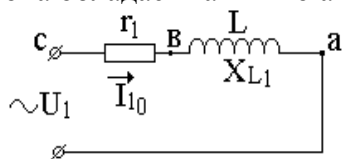
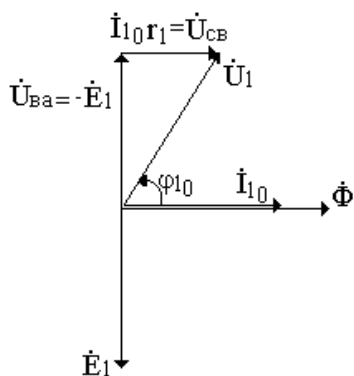


Рис. 6.4

Так как эта катушка представляет собой первичную катушку трансформатора, то поставим индексы 1, и так как нет вторичной катушки, то трансформатор работает на холостом ходу, поэтому будет ток холостого хода I_{1_0} . Ток I_{1_0} , протекая через идеальную индуктивность L , создаёт переменное магнитное поле, которое самоиндуцирует в катушке ЭДС E_1 , и согласно II закону Кирхгофа для данной цепи имеем:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{1_0} r_1.$$

Векторная диаграмма имеет вид показанный на **рис. 6.5**:



φ_{1_0} - имеет большое значение, потому что на холостом ходу $I_{1_0} r$ имеет небольшое значение, значит нагрузка имеет преобладающий индуктивный характер.

Рис. 6.5

Катушка с сердечником

Если катушка имеет сердечник, то в нём возникают потери в стали, а это значит, что эквивалентная схема (**рис. 6.6**) содержит активное сопротивление, на котором выделяется мощность – *потери в стали*.

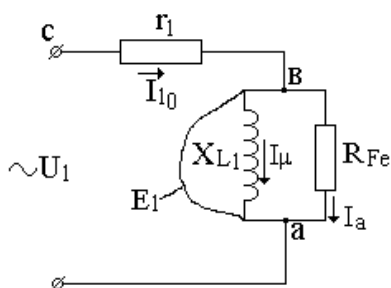


Рис. 6.6

$$P_{Fe} = U_1^2 R_{Fe}$$

R_{Fe} – это активное сопротивление, которое находится под напряжением:

$$U_{ва} = -E_1.$$

На сопротивлении выделяется активная мощность, равная потерям в стали.

I_a – активный ток;

I_μ - ток намагничивания, который создаёт магнитный поток.

Согласно первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_{1_0} = \dot{I}_\mu + \dot{I}_a \quad (1)$$

В этом случае второй закон Кирхгофа:

6.5. Нагруженный трансформатор

Подключена нагрузка:

$$Z_{н} \neq \infty;$$

$$I_2 \neq 0.$$

Логическая схема трансформатора на холостом ходу продолжается и получаем логическую схему трансформатора нагруженного (рис.6.10).

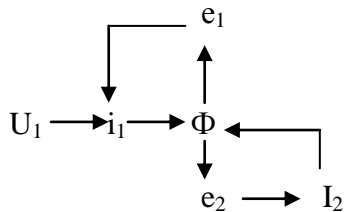


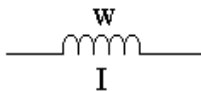
Рис. 6.10

Φ – основной магнитный поток;
 Φ_1 – поток, созданный током i_1 ;
 Φ_2 – поток, созданный током i_2 ;
 Φ_2 противоположен Φ_1 по правилу Ленца.

$$\text{Тогда } \dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2.$$

Закон постоянства магнитного потока трансформатора

Называется намагничивающей силой катушки, содержащей W витков, по которой протекает ток I , произведение:



$$\dot{I} W = \dot{F}; \quad [w\text{-виток}].$$

F имеет то же направление, что и I .

На холостом ходу первичная катушка трансформатора создаёт намагничивающую силу:

$$\dot{F}_{10} = \dot{I}_{10} w_1.$$

Эта сила прямо пропорциональна магнитному потоку Φ :

$$\dot{\Phi} = k \dot{F}_{10},$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Когда трансформатор работает под нагрузкой, первичная катушка имеет намагничивающую силу:

$$\dot{F}_1 = \dot{I}_1 w_1,$$

а вторичная катушка:

$$\dot{F}_2 = \dot{I}_2 w_2.$$

Эти намагничивающие силы создают соответствующие магнитные потоки:

$$\dot{\Phi}_1 = k \dot{F}_1;$$

$$\dot{\Phi}_2 = k \dot{F}_2.$$

6.6 Векторная диаграмма нагруженного трансформатора

Предположим, что

$$k_{12} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx 1,$$

отсюда следует, что

$$E_1 \approx E_2.$$

Пусть нагрузка является *активно-индуктивной*, в таком случае строят векторную диаграмму согласно уравнениям (1), (2), (3).

Порядок построения векторной диаграммы (рис. 6.12):

- 1) намагничивающий ток \dot{I}_μ создаёт магнитный поток $\dot{\Phi}$;
- 2) магнитный поток $\dot{\Phi}$ индуцирует в первичной и вторичной обмотке ЭДС, которые отстают от Φ на 90° ;
- 3) ток во вторичной обмотке I_2 будет отставать от ЭДС E_2 на угол ψ_2 , который определяют из треугольника сопротивлений вторичной обмотки:

$$\psi_2 = \arctg \frac{X_{L_H} + X_{S_2}}{R_H + r_2} > 0;$$

- 4) пишем уравнение (3) в следующей форме:

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 X_{S_2} + \dot{U}_2 \quad (3)$$

строим вектор $\dot{I}_2 r_2$: он направлен туда же, куда и \dot{I}_2 , строим $j \dot{I}_2 X_{S_2} \perp \dot{I}_2 r_2$;

- 5) $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 R_H + j \dot{I}_2 X_{L_H} = \dot{I}_2 Z_H$,

на основе \dot{U}_2 строим прямоугольный треугольник: $\dot{I}_2 R_H \parallel \dot{I}_2$; $j \dot{I}_2 X_{L_H} \perp \dot{I}_2$;

- 6) согласно уравнению (1) строим вектор $-\dot{E}_1$;
- 7) из опыта холостого хода следует, что

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_\mu + \dot{I}_a, \quad \alpha - \text{угол потерь в стали};$$

- 8) согласно уравнению (2) строим: -

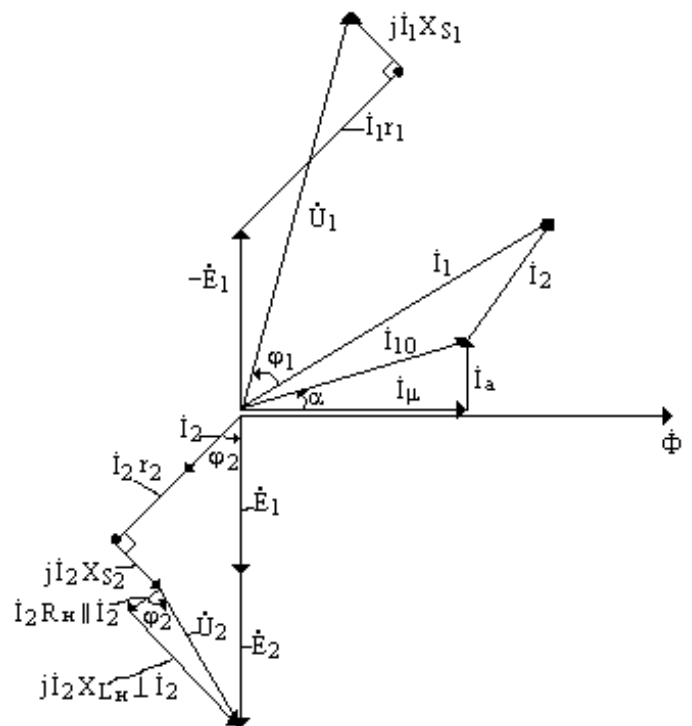


Рис. 6.12

6.7. Опыт холостого хода трансформатора

Цели опыта:

- 1) экспериментальное определение потерь в меди первичной обмотки;
- 2) экспериментальное определение потерь в стали трансформатора;
- 3) определение параметров схемы замещения трансформатора.

Опыт холостого хода проводят по схеме показанной на **рис. 6.13**:

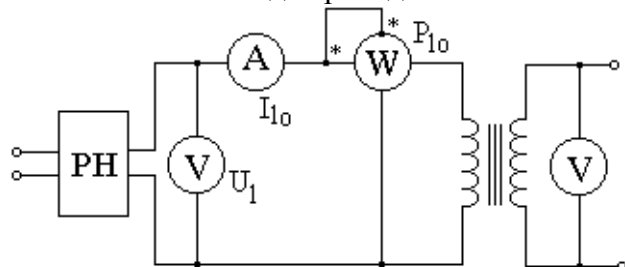


Рис. 6.13

$$Z_H = \infty;$$

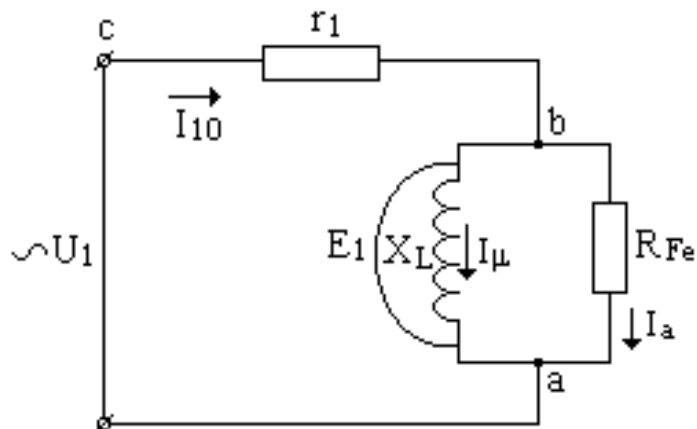
$$I_2 = 0;$$

РН – регулятор напряжения.

С помощью РН устанавливают в первичной обмотке номинальное напряжение U_H (по паспорту), амперметр покажет I_{10} – ток холостого хода.

Ваттметр покажет потребляемую мощность из сети на холостом ходу.

Схема замещения трансформатора на холостом ходу имеет вид показанный на **рис. 6.14**:



Параметры схемы замещения:

$$I_1, X_L, R_{Fe}.$$

Для низких частот омическое сопротивление первичной обмотки приближённо равно активному.

Рис. 6.14

- 1) омметром измеряют величину r_1 , чем меньшую мощность имеет трансформатор, тем больше r_1 ;
- 2) определяют потери в меди первичной обмотки:

$$P_{Cu_1} = I_{10}^2 r_1,$$

$$P_{Cu_2} = 0.$$

6.8. Приведённый трансформатор

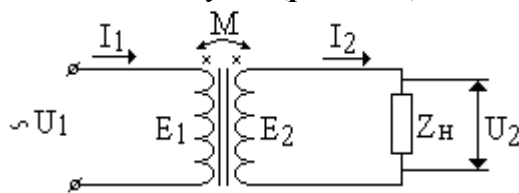
Приведённый трансформатор – это воображаемый трансформатор, в котором ЭДС первичной обмотки, все мощности вторичной обмотки равны соответствующим мощностям вторичной обмотки реального трансформатора, значит, и все сдвиги фаз сохраняются.

Говорят, что параметры вторичной обмотки приведены (перерасчитаны) к параметрам первичной обмотки.

Имеем трансформатор:

$$\frac{W_1}{W_2} = k_{12} = \frac{E_1}{E_2}.$$

В реальном трансформаторе первичная и вторичная обмотки соединены между собой только магнитным путём (рис. 6.15).



Магнитная связь трудно поддаётся расчёту.

Рис. 6.15

Параметры приведённого трансформатора обозначаются со штрихом. Согласно определению: $E_2' = E_1$ (рис. 6.16).

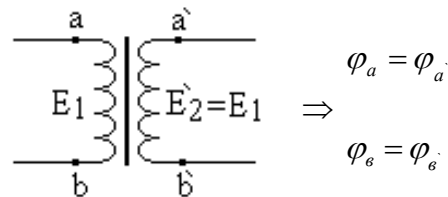


Рис. 6.16

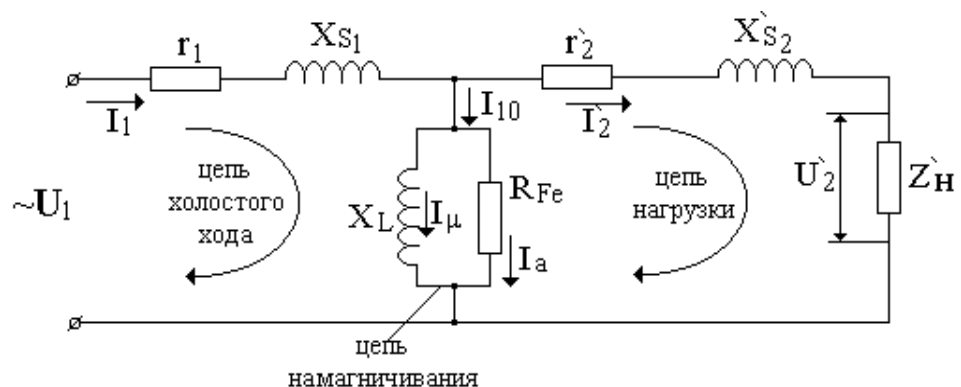


Рис. 6.17

Из условия равенства активных, реактивных и полных мощностей и из схемы замещения (рис. 6.17) получаем:

$$I_{10} = I_1 - I_2 \Rightarrow I_2' = \frac{I_2}{k_{12}};$$

ГЛАВА VII. АСИНХРОННАЯ МАШИНА

7.1. Устройство асинхронной машины

Асинхронная машина - это такая машина, в которой ротор вращается с частотой, отличной от частоты вращения магнитного поля статора.

Асинхронная машина может работать в нескольких режимах:

- 1) генератор;
- 2) двигатель;
- 3) тормоз.

Устройство. Статор представляет собой цилиндрическую полость, изготовленную, из пластин электротехнической стали (назначение пластин то же, что и у трансформаторов). В этой полости располагаются симметрично относительно друг друга идентичные обмотки статора. Для трёхфазных двигателей их может быть: 3, 6, 9, 12... Обмотки статора подключаются звездой или треугольником в трёхфазную сеть. Можно показать, что три обмотки статора создают в полости статора вращающееся магнитное поле, которое вращается со скоростью:

$$n_1 = \frac{f_1}{P} [\text{об}/\text{с}] = \frac{60 f_1}{P} [\text{об}/\text{мин}],$$

где: f - частота сети;

P – количество пар магнитных полюсов;

n_1 - синхронная скорость.

Если на статоре имеется три обмотки, то они создают одну пару магнитных полюсов, поэтому $P=1$.

Если $f=50$ Гц, то $n [\text{об}/\text{мин}] = 3000$.

Величины, относящиеся к статору, будем писать с индексом 1, а величины, относящиеся к ротору, с индексом 2.

Обмотки	P	f , Гц	n [$\text{об}/\text{мин}$]
---------	-----	----------	--------------------------------

7.2. Принцип действия асинхронного двигателя

Статор создаёт вращающееся магнитное поле, направление вращения которого может быть изменено путём перемены мест любых двух фаз двигателя **рис. 7.1**.

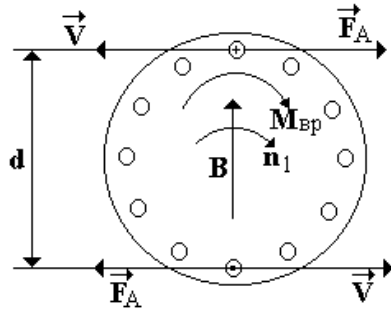


Рис. 7.1

$$n_1 = \frac{60 f_1}{P} \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right] = \text{const}, \text{ для данного двигателя}$$

n_2 - частота вращения ротора в момент пуска двигателя равна нулю.

$$n_2 = 0.$$

Согласно закону электромагнитной индукции в фазах ротора индуцируется ЭДС:

$$E = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Направление ЭДС индукции определяем по правилу правой руки. Если цепь замкнута, то туда же направлен и ток индукции:

$$F_A = I l \sin \alpha,$$

где: I – ток индукции;
 B – индукция магнитного поля статора;
 l – активная длина ротора;
 α – угол между I и B (для нашего случая $\alpha=90^\circ$);
 d – плечо силы ампера, которое равно диаметру „беличьего колеса”.

Направление силы Ампера определяем по правилу левой руки.

Создаётся вращающий момент:

$$M_{вр} = F_A d = I l d,$$

где I – ток, который индуцируется в роторе.

После возникновения $M_{вр}$ ротор начнёт вращаться ($n_2 \neq 0$).

Назовём *скольжением* S отношение:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} (\%).$$

Скольжение показывает в процентах отставание ротора от магнитного поля статора. В паспорте двигателя указывается: или S_n

или n_{2n} ,

что означает, что этот параметр снят при номинальной нагрузке.

$$n_2 = n_1 (1 - S).$$

Обычно $S_n = 3 \div 5(\%)$ и зависит от нагрузки двигателя.

7.3. Уравнение ЭДС статорной обмотки. Схема замещения асинхронного двигателя

Как и в случае трансформатора в асинхронном двигателе вращающееся магнитное поле статора пересекает и обмотки статора и в обмотках статора индуцируется противо ЭДС, которое противоположно направлению приложенного напряжения сети. Как и в случае трансформатора, каждая из фаз статора обладает активным сопротивлением r_1 , и существует поток рассеивания статора, который пропорционален индуктивному сопротивлению рассеивания X_{S1} . Напряжение сети, приходящееся на одну фазу, обозначим через U_1 , и тогда, согласно II закону Кирхгофа для одной фазы статора получаем:

$$U_1 = -\mathcal{E}_1 + I_1 r_1 + jI_1 X_{S1} - \text{уравнение напряжения одной обмотки статора.}$$

На холостом ходу ток одной фазы статора обозначим через I_{10} и им пренебрегать нельзя, так как он отличается только в несколько раз от номинальных токов.

Электрическая схема замещения одной фазы статора выглядит показана на **рис. 7.2**

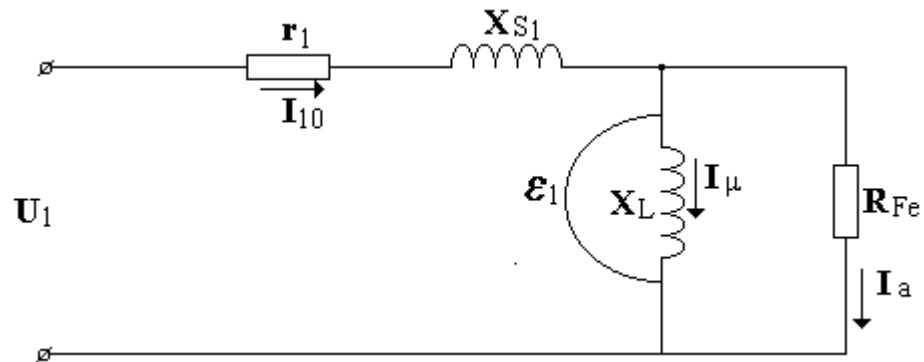


Рис. 7.2

Согласно I – му закону Кирхгофа:

$$I_{10} = I_a + I_{\mu}.$$

Вторичная обмотка трансформатора обладала параметрами, которые являлись постоянными, так как в обеих обмотках трансформатора ЭДС имели одинаковую частоту. В случае двигателя частота f_2 отлична от f_1 ($f_2 \neq f_1$):

$$f_2 = \frac{P}{60} (n_1 - n_2) \frac{n_1}{n_2} = S \cdot f_1;$$

$$\boxed{f_2 = S \cdot f_1}.$$

Как и у трансформаторов, в асинхронных двигателях действует закон постоянства магнитного потока в любых режимах работы двигателя.

$$kW_1 I_{10} = kW_1 I_1 + kW_2 I_2,$$

где: I_{10} - ток холостого хода одной фазы статора;

I_1 - ток одной фазы статора при нагрузке;

7.4. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя представлена на **рис. 7.7**. Асинхронный двигатель потребляет из сети активную мощность:

$$P_1 = m_1 I_{1\phi} U_{1\phi} \cos \varphi_1,$$

где m_1 – количество фаз статора.

Частично эта мощность рассеивается на потери в меди, потери в стали и механические потери.

Основная мощность – это магнитная мощность, часть которой затрачивается на потери в стали статора (α - угол потерь в стали).

$P_{эм}$ – мощность, которая передаётся ротору посредством электромагнитного поля.

$P_{Fe_2} \approx 0$, так как $f_2 \ll f_1$.

$\Delta P_{мех}$ – потери за счёт сил трения в подшипниках и за счёт сопротивления воздуха для вентилятора.

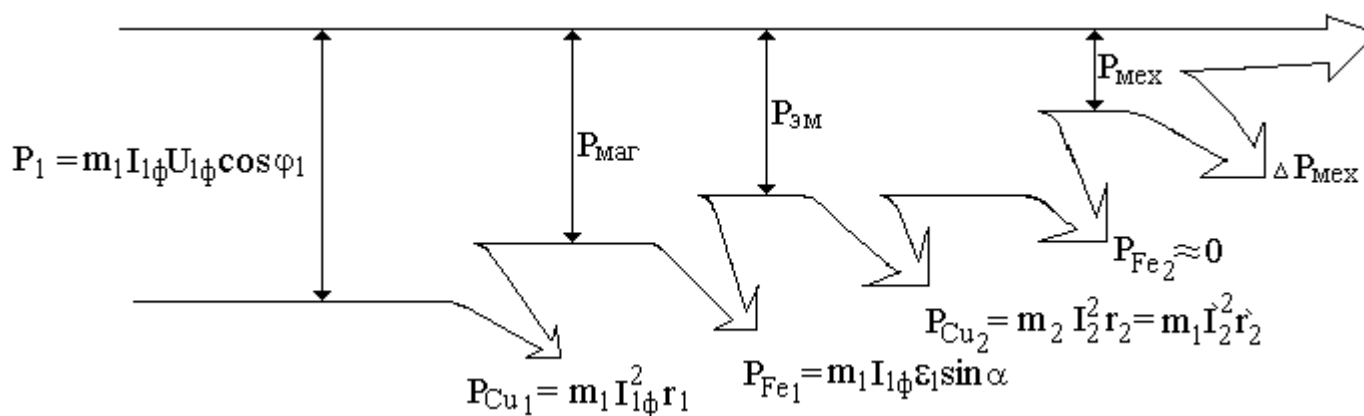


Рис. 7.7

P_2 – мощность, передаваемая валу двигателя – полезная мощность.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} (\%),$$

если ΔP – все потери, то

$$P_1 = \Delta P + P_2.$$

КПД асинхронных двигателей большой мощности при номинальной нагрузке достигает 85 – 93 %, у двигателей малой мощности КПД ниже.

7.5. Вращающий момент двигателя и механическая характеристика

Для двигателя:

$$M_{\text{вр}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega_1};$$

где ω_1 – угловая скорость вращения магнитного поля статора.

$\omega_1 = 2\pi f_1$, где f_1 – частота напряжения сети.

$$P_{\text{эм}} = m_1 I_2^2 \frac{r_2}{S},$$

где: m_1 – количество фаз статора;

I_2 – приведённый ток ротора;

$\frac{r_2}{S}$ – нагрузка.

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{S}\right)^2 + (X_{1s} + X_{2s}')^2}};$$

$$M_{\text{вр}} = \frac{m_1 U_1^2 \frac{r_2}{S}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2}{S}\right)^2 + (X_{1s} + X_{2s}')^2 \right]}.$$

Эта формула определяет вращающий момент асинхронного двигателя.

Можно показать, что зависимость вращающего момента от скольжения, то есть $M_{\text{вр}} = f(S)$ имеет один максимум.

При запуске двигателя $S=1$, поэтому $M_{\text{вр}}$ называется пусковым.

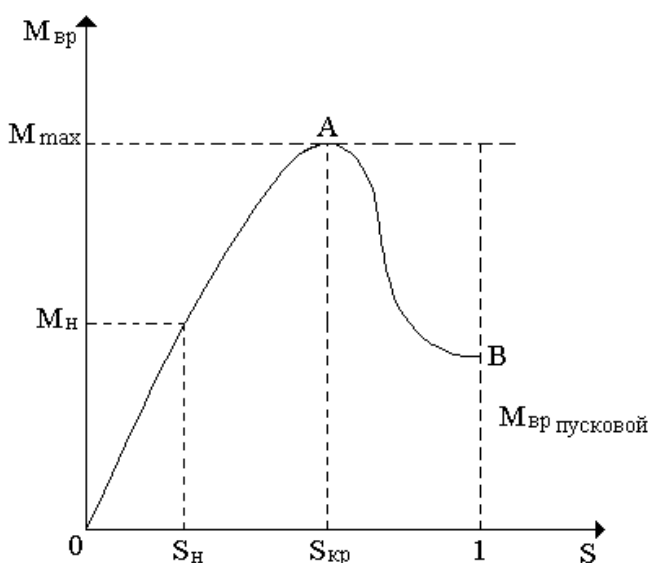


Рис. 7.8

$$M_{\text{вр пуск}} = \frac{m_1 U_1^2 r_2}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + r_1'\right)^2 + (X_{1s} + X_{2s}')^2 \right]};$$

при $S = 0$ нет тока I_2 и $M_{\text{вр}} = 0$.

Называется *механической характеристикой асинхронного двигателя* зависимость вращающего момента от скольжения (рис. 7.8).

$S_{\text{номинальное}}$ (S_H) для различных двигателя:

$S_H = 0,03 \div 0,05 = 3 - 5 \%$, то есть магнитное поле статора опережает вращение ротора на $3 \div 5 \%$.

$$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{вр.н.}}} = k = 3 \div 5\% \quad - \quad \text{перегрузочная}$$

способность, то есть двигатель может кратковременно работать с перегрузкой.

Интервал ОА – это устойчивый режим работы, интервал АВ – неустойчивый режим.

ГЛАВА VIII. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

8.1. Устройство синхронной машины

Назовём *синхронной машиной* ту машину, в которой частота вращения ротора строго постоянна, если частота напряжения сети не изменяется.

В случае, когда $P=1$ и $f=50$ Гц, то $n_1=n_2=3000$ об/мин.

$$n_1 = \frac{60 f_1}{P} \left[\frac{\text{об}}{\text{МИН}} \right].$$

Синхронные машины имеют три режима работы:

1. генератор: используют преимущественно для получения трёхфазных синусоидальных напряжений;
2. двигатель: используют в тех случаях, где требуется строго постоянная скорость вращения и большие вращающие моменты;
3. компенсатор: используют для повышения $\cos\varphi$ электрических сетей.

Синхронная машина состоит из статора, который подобен статору асинхронного двигателя. Ротор представляет собой электромагнит (для машин малой мощности может быть использован постоянный магнит), который запитывается через контактные кольца и щётки постоянным током. Этот ток (ток ротора) называют *током возбуждения*. Величина тока возбуждения I_b определяет индукцию магнитного поля электромагнита.

8.2. Генератор и его принцип работы

Первичная машина вращает ротор синхронной машины, если имеется то возбуждения, то вращается магнитное поле ротора, пересекая обмотки статора, в которых индуцируется ЭДС:

$$\begin{aligned} \varepsilon_A &= \mathcal{E}_m \sin \omega t, \\ \varepsilon_B &= \mathcal{E}_m \sin(\omega t - 120^\circ), \\ \varepsilon_C &= \mathcal{E}_m \sin(\omega t - 240^\circ), \\ \omega &= 2\pi f. \end{aligned}$$

Если ротор имеет одну обмотку возбуждения, то он обладает двумя магнитными полюсами N и S и для получения частоты 50 Гц необходимо вращать ротор со скоростью $n=3000$ об/мин. Это быстроходный генератор, поэтому ротор изготавливают в виде неявнополюсного (рис. 8.1). Это значит, что полюсные наконечники ротора не являются явными, то есть выходящими.

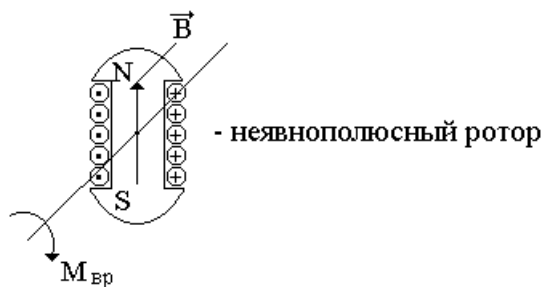


Рис. 8.1

8.3. Характеристика холостого хода синхронного генератора. Определение начал и концов обмотки статора

Метод одинаков для синхронных двигателей и для асинхронных двигателей и генераторов. Статор синхронной и асинхронной машины представляет собой симметричную нагрузку, так как обмотки идентичны.

Обмотки статора могут быть включены звездой без нулевого провода или треугольником. Обычно выводы статора маркированы.

Обозначают:


- C_1 – начало первой обмотки А;
- C_2 – начало второй обмотки В;
- C_3 – начало третьей обмотки С;
- C_4 – конец первой обмотки А;
- C_5 – конец второй обмотки В;
- C_6 – конец третьей обмотки С.

1) Выводы машины обозначены:

C_4, C_5, C_6 – концы обмоток

C_1, C_2, C_3 – начала, подаётся напряжение сети

$C_4 - C_2$
 $C_5 - C_3$
 $C_6 - C_1$ } соединяются треугольником Δ .

} соединяются звездой 

2) Выводы машины не обозначены. Если выводы обмоток статора не обозначены, то их определяют экспериментально:

I. Определяют концы (выводы) каждой обмотки статора. Выводы обмоток статора можно определить:

1) омметром или мегаомметром (рис. 8.2):

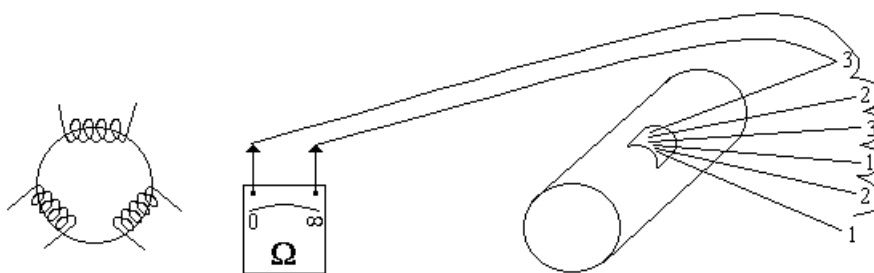


Рис. 8.2

Если стрелка омметра покажет ∞ , то выводы из различных катушек. Если стрелка покажет какое-то сопротивление, то эти два провода принадлежат к одной катушке;

2) используя источник питания постоянного или переменного тока и сигнальную лампочку рис. 8.3 (можно использовать батарейку от фонарика).

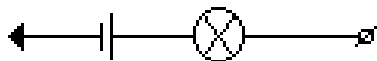


Рис. 8.3

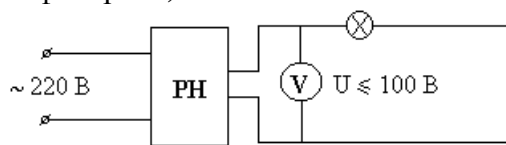


Рис. 8.4

8.4. Реакция якоря

Ток возбуждения синхронной машины создаёт основной магнитный поток Φ_0 . Вращение ротора первичной машиной индуцирует в фазах статора ЭДС (в случае генератора статор называется *якорем*).

$$\mathcal{E}_1 = -\frac{W_1 d\Phi}{dt} \text{ (закон Фарадея) ;}$$
$$\mathcal{E}_1 = 4,44 f_1 W_1 \Phi_0 k_1,$$

где: f_1 – определяется частотой вращения ротора;
 W_1 – количество витков одной фазы якоря;
 k_1 – обмоточный коэффициент фазы якоря ($k_1 \approx 0,8 \div 0,9$).

На холостом ходу ток через обмотки якоря $I_1 = 0$. Как и в случае трансформатора ЭДС \mathcal{E}_1 отстаёт на 90° от Φ_0 . На **рис. 8.12** показана векторная диаграмма синхронного генератора на холостом ходу).

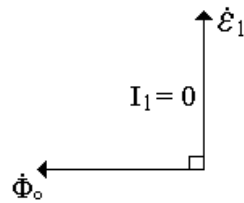


Рис. 8.12

Если к обмоткам якоря подключить симметричную нагрузку, то по ним потечёт ток $I_1 \neq 0$, который создаст магнитное поле $\Phi_{я}$. Называется *реакцией якоря* изменение основного магнитного потока Φ_0 под влиянием магнитного потока якоря $\Phi_{я}$.

8.5. Двухполюсный синхронный генератор

Рассмотрим несколько случаев:

1) Активная нагрузка (рис. 8.13)

Ротор представляет собой электромагнит с одной парой полюсов.

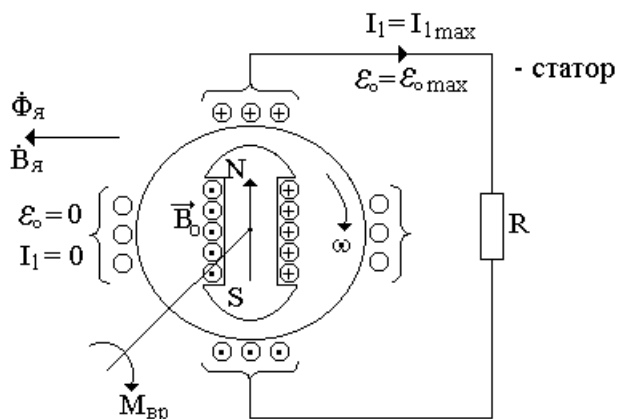


Рис. 8.13

$$B_0 S = \Phi_0.$$

Так как ротор вращается, то попеременно индуцирует ЭДС:

$$\mathcal{E}_0 = -W_1 \frac{d\Phi_0}{dt}.$$

Векторная диаграмма для данного случая показана на рис. 8.14, где I_1 – ток якоря.

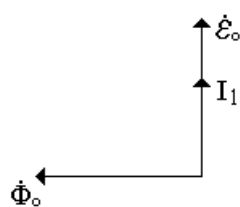


Рис. 8.14

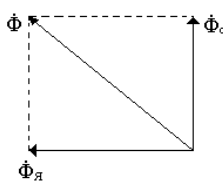


Рис. 8.15

$\Phi_я$ – магнитное поле, созданное током якоря, имеет поперечный характер относительно основного магнитного поля (рис. 8.15).

Результирующее магнитное поле Φ изменяет конфигурацию первоначального магнитного поля Φ_0 и увеличит магнитное поле под сбегающим краем полюсного наконечника и уменьшит магнитное поле под набегающим краем полюсного наконечника, то есть за счёт появления $\Phi_я$. Величина, которая зависит от R , модифицирует магнитное поле синхронного генератора, естественно изменит и ЭДС генератора.

напряжение на нагрузке. Конечная векторная диаграмма показана на рис.8.16.

$\psi=0$ – угол между I_1 и \mathcal{E}_0 .

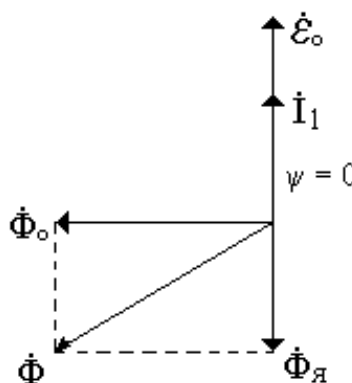


Рис. 8.16

8.6. Включение синхронной машины на параллельную работу с сетью

Предполагается, что мощность сети бесконечно велика, из этого следует, что напряжение в сети поддерживается постоянным, независимо от количества потребителей.

Для подключения синхронной машины на параллельную работу с сетью, должны выполняться следующие условия:

- 1) частота ЭДС синхронной машины должна быть равна частоте напряжения сети:

$$f_{см} = f_{сеть};$$

- 2) последовательность фаз синхронной машины должна соответствовать последовательности фаз сети;

$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ \text{A} & \text{B} & \text{C} \end{matrix}$ - сеть
 $\left. \begin{matrix} \text{а) } 0 & 0 & 0 \\ & \text{A} & \text{B} & \text{C} \\ \text{б) } 0 & 0 & 0 \\ & \text{B} & \text{C} & \text{A} \\ \text{в) } 0 & 0 & 0 \\ & \text{C} & \text{A} & \text{B} \end{matrix} \right\}$ синхронная машина

- 3) фазное или линейное ЭДС (напряжение) синхронной машины должно быть равно фазному или линейному напряжению сети:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{лсм} &= \mathcal{E}_{лсети} \\ \mathcal{E}_{фсм} &= \mathcal{E}_{фсети} \\ U_{лсм} &= \sqrt{3}U_{фсети} \\ U_{лсети} &= \sqrt{3}U_{фсм}. \end{aligned}$$

- 4) в момент включения синхронной машины на параллельную работу с сетью должно выполняться условие:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{фсм} &= \dot{U}_{фсети}; \\ \text{или} \\ \dot{U}_{лсм} &= \dot{U}_{лсети}. \end{aligned}$$

Фазное (линейное) напряжение синхронной машины должно быть равно и противоположно фазному (линейному) напряжению сети.

Невыполнение хотя бы одного из условий и попытка включения машины в этом случае приводит к аварийному режиму работы и выходу из строя синхронной машины.

Для включения синхронной машины на параллельную работу с сетью используется схема показанная на **рис. 8.25**, в которой используется ламповый синхроскоп, служащий для определения выполнения условий 1 – 4.

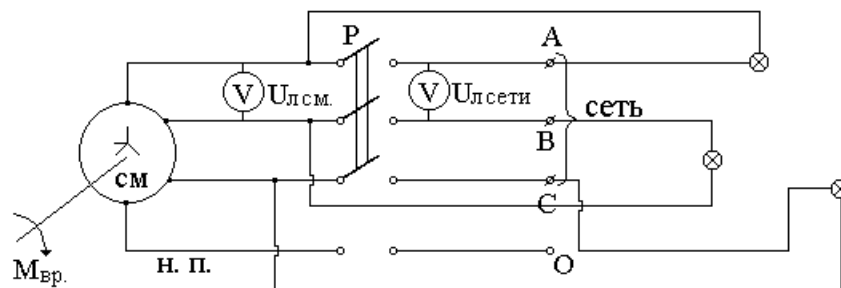


Рис. 8.25

8.7. Уравнение ЭДС и напряжений синхронной машины и векторная диаграмма

В любом режиме работы синхронной машины имеет место следующее уравнение напряжений и ЭДС:

$$\dot{U}_1 = \dot{\mathcal{E}} - j I_1 X,$$

где: \dot{U}_1 - напряжение на нагрузке (режим генератора) или напряжение сети (режим двигателя);

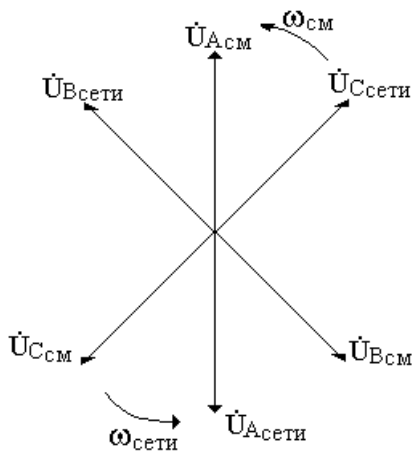
$\dot{\mathcal{E}}$ - ЭДС синхронной машины, не зависящее от режима работы;

I_1 - фазный ток нагрузки (режим генератора) или ток, потребляемый из сети (режим двигателя);

X - синхронный реактанс, то есть идеальное индуктивное сопротивление синхронной машины.

Так как активное сопротивление синхронной машины мало по сравнению с индуктивным сопротивлением, то и падение напряжения $I_1 R$ мало по сравнению с $I_1 X$ ($I_1 R \ll I_1 X$) и $I_1 R$ пренебрегают.

Уравнение представляет собой II-й закон Кирхгофа для одной фазы синхронной машины. После синхронизации синхронной машины с сетью звезда напряжений синхронной машины вращается в том же направлении с той же угловой скоростью, что и звезда напряжений сети (рис. 8.26).



$$f_{см} = f_{сети};$$

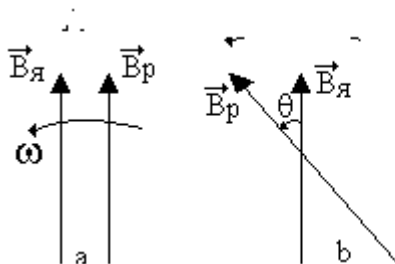
$$\omega_{см} = \omega_{сети}.$$

Каждая из ламп синхроскопа находится под векторной разностью напряжений синхронной машины и сети, и в режиме синхроскопа, так как $\dot{U}_{\phi_{см}} = -\dot{U}_{\phi_{сети}}$, напряжение на лампе равно нулю и лампы тухнут полностью.

Максимально возможное напряжение, приходящееся на одну лампу синхроскопа, это будет $2 \cdot U_{\phi_{сети(см)}}$.

Лампочка не сгорает, так как в синхроскопе включают три раза по две лампочки. Синхроскоп может быть подключён таким образом, чтобы при синхронизации синхронной машины с сетью лампы горели. Такой синхроскоп используют реже.

В момент синхронизации синхронной машины с сетью магнитное поле, образуемое статором (якорем) имеет одно и то же направление, что и магнитное поле ротора, и они



$\theta > 0$ - режим генератора.

Рис. 8.27

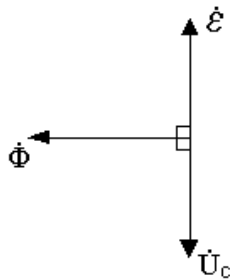
8.8. Режим генератора

В этом режиме может быть два случая:

- 1) перевозбуждённый генератор $\mathcal{E} > U_1$;
- 2) недозабуждённый генератор $\mathcal{E} < U_1$.

1. Перезабуждённый генератор

Для первого случая векторная диаграмма на холостом ходу синхронной машины, которая синхронизована с сетью, имеет положение векторов показанное на **рис. 8.32**.



$$I_{\text{я}}(I_1) = 0.$$

$$\mathcal{E}_{\phi} = -\dot{U}_c - j\dot{I}_1 x \quad \text{— четвертое условие синхронизации.}$$

Рис.8.32

В режиме генератора с нагрузкой Φ будет отклонён на угол θ относительно его положения на холостом ходу (**рис.8.33**).

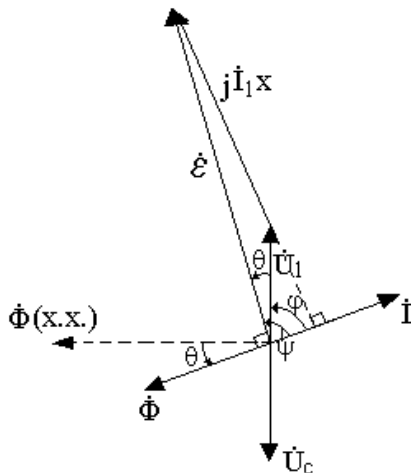


Рис. 8.33

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}_c.$$

\dot{U}_1 в данном случае будет компенсировать напряжение сети. Это четвертое условие компенсации работы генератора под нагрузкой. В режиме перевозбуждения генератора $\mathcal{E} > U_1$, ток нагрузки I_1 отстаёт от ЭДС на угол

$0^\circ < \varphi < 90^\circ$. Согласно уравнению $\dot{\mathcal{E}} = \dot{U}_1 + j\dot{I}_1 x$ вектор $j\dot{I}_1 x$

перпендикулярен вектору \dot{I}_1 и опережает его. Через конец

\dot{U}_1 проводят перпендикуляр к $\dot{\mathcal{E}}$ и получают на пересечении

$\dot{\mathcal{E}}$. Это упрощённая векторная диаграмма перевозбуждённого

генератора.

2. Недозабуждённый генератор

В этом случае: $\mathcal{E} < U_1$, $\theta > 0$, $-90^\circ < \psi < 0$.

Согласно уравнению $\dot{\mathcal{E}} = \dot{U}_1 + j\dot{I}_1 x$ через конец вектора \dot{U}_1 опускают перпендикуляр на вектор \dot{I}_1 или его продолжение (**рис. 8.34**).

$$\begin{aligned} \psi + (-\theta) &= \varphi; \\ <0 >0 &= 0. \end{aligned}$$

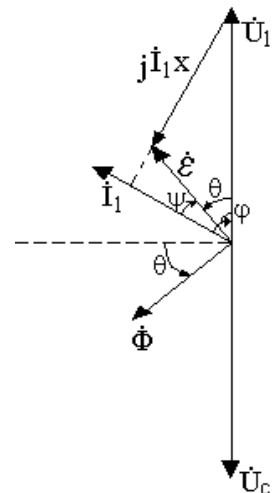


Рис. 8.34

8.9. Режим двигателя

В этом режиме может быть два случая:

1) перевозбуждённый двигатель (рис. 8.35)

$$\mathcal{E} > U_1, \theta < 0.$$

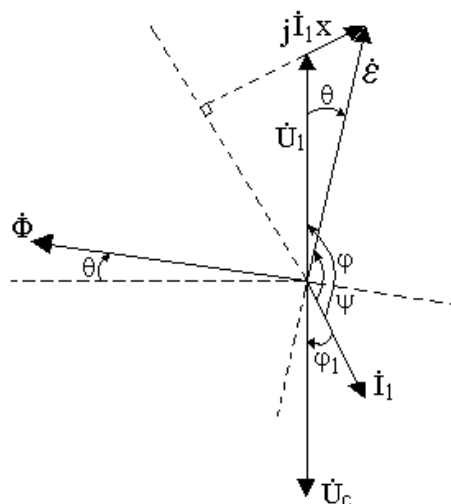


Рис. 8.35

Согласно четвертому условию синхронизации:

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}_c,$$

$$90^\circ < 0 < 180^\circ,$$

$$\psi + (-\theta) = \varphi.$$

$$\varphi > 0 \text{ относительно } \dot{U}_1.$$

$$\varphi_1 - \text{угол между } \dot{I}_1 \text{ и } \dot{U}_c.$$

$$\varphi_1 < 0.$$

Согласно уравнению:

$$\dot{\mathcal{E}} = \dot{U}_1 + j\dot{I}_1 x,$$

продолжают прямую вектора \dot{I}_1 в обратном направлении. Из конца вектора \dot{U}_1 опускают перпендикуляр на эту прямую и продолжают её до пересечения с направлением ЭДС.

$\varphi_1 < 0$ — означает, что ток \dot{I}_1 относительно \dot{U}_c является активно-ёмкостным. Когда $\varphi_1 = -90^\circ$ ток перевозбуждённого двигателя относительно \dot{U}_c является чисто ёмкостным.

2) Недовозбуждённый двигатель (рис. 8.36)

$$\mathcal{E} < U_1, \theta < 0, \dot{U}_1 = -\dot{U}_c, -180^\circ < 0 < 90^\circ.$$

Согласно уравнению:

$$\dot{\mathcal{E}} = \dot{U}_1 + j\dot{I}_1 x,$$

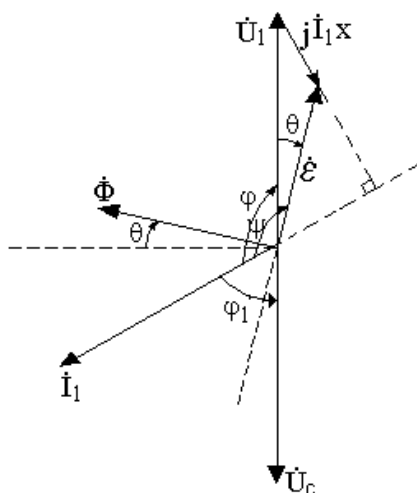


Рис. 8.36

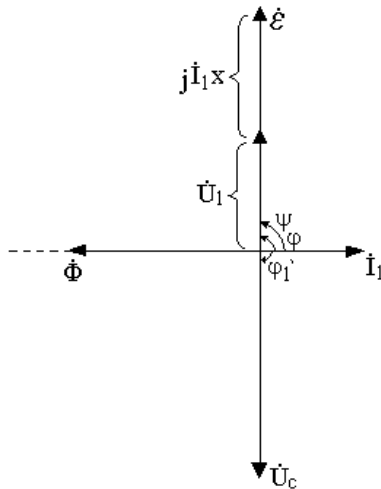
продолжают прямую вектора \dot{I}_1 в обратном направлении.

Через конец вектора \dot{U}_1 опускают перпендикуляр на эту прямую и в точке пересечения с направлением ЭДС, получаем вектора $\dot{\mathcal{E}}$ и $j\dot{I}_1 x$.

$\varphi_1 > 0$ значит, что ток \dot{I}_1 относительно напряжения сети имеет активно-индуктивный характер. При $\varphi_1 = 90^\circ$ \dot{I}_1 является чисто индуктивным.

8.10. Режим синхронного компенсатора

1. Перевозбуждённый компенсатор (рис. 8.37)



$$\mathcal{E} > U_1, \theta=0.$$

Магнитный поток и ЭДС имеют такое же направление, как и на холостом ходу.

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{U}_c, \\ \varphi &= \psi = 90^\circ, \\ \varphi_1 &= -90^\circ. \end{aligned}$$

В данном случае синхронная машина не потребляет и не отдаёт в сеть активной мощности (так как $\varphi_1 = -90^\circ$),

Рис. 8.37

Соответственно ток \dot{I}_1 является идеальным ёмкостным током относительно \dot{U}_c и компенсирует идеальную индуктивную составляющую тока сети, то есть уменьшает сдвиг фаз между током сети и напряжением сети, то есть увеличивает $\cos \varphi$ сети.

$$\text{Если } \dot{I}_1 = \dot{I}_{c1}; \dot{I}_c + \dot{I}_1 = \dot{I}_{ca} \Rightarrow \varphi_c = 0, \cos \varphi_c = 1.$$

Когда нет синхронного компенсатора, то $\cos \varphi_c < 1$; $\varphi_c \neq 0$ (рис. 8.38).

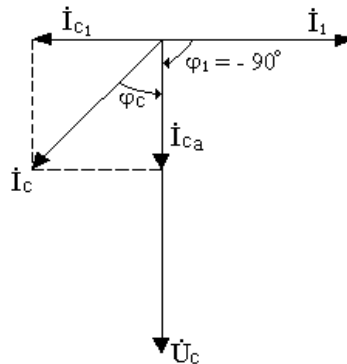


Рис. 8.38

2. Недовозбуждённый компенсатор (рис. 8.39)

Согласно выражению:

$$\begin{aligned} \dot{\mathcal{E}} &= U_1 + j I_1 x, \\ \varphi &= -90^\circ, \varphi_1 = 90^\circ. \end{aligned}$$

И здесь синхронная машина не потребляет и не отдаёт в сеть активную мощность, ток \dot{I}_1 относительно \dot{U}_c является идеально индуктивным.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА I. ОДНОФАЗНЫЙ СИНУСОИДАЛЬНЫЙ ТОК

- 1.1. Основные понятия
- 1.2. Способы представления синусоидальных величин
- 1.3. Получение синусоидальных токов
- 1.4. Средние и действующие значения переменных токов
- 1.5. Цепь с идеальным активным сопротивлением
- 1.6. Цепь синусоидального тока с идеальной индуктивностью
- 1.7. Цепь с идеальной ёмкостью
- 1.8. Энергетические процессы в цепях синусоидального тока
- 1.9. Последовательное соединение R, L, C – элементов
- 1.10. Резонанс напряжений
- 1.11. Треугольник напряжений. Треугольник сопротивлений. Треугольник мощностей.
Треугольник напряжений

ГЛАВА II. РАЗВЕТВЛЁННЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

- 2.1. Графо - аналитический метод решения задач
- 2.2. Резонанс токов
- 2.3. Коэффициент мощности. Его технико – экономическое значение и способы повышения
- 2.4. Представление чисел в комплексной форме
- 2.5. Представление параметров схемы в комплексной форме
- 2.6. Символический метод решения задач
- 2.7. Метод проводимостей
- 2.8. Решение сложных схем

ГЛАВА III. ТРЁХФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

- 3.1. Трёхфазный генератор
- 3.2. Соединение фаз генератора звездой
- 3.3. Соединение фаз генератора треугольником
- 3.4. Соединение нагрузки звездой
- 3.5. Симметричная нагрузка

- 3.6. Соединение нагрузки звездой без нулевого провода при изменении нагрузки в одной фазе
- 3.7. Соединение нагрузки треугольником
- 3.8. Мощности в трёхфазных цепях

ГЛАВА IV. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

- 4.1. Классификация электроизмерительных приборов
- 4.2. Магнитоэлектрическая система
- 4.3. Электромагнитная система
- 4.4. Электродинамическая система
- 4.5. *Индуктивная система*
- 4.6. *Электростатическая система*
- 4.7. Тепловая система
- 4.8. Вибрационная система

ГЛАВА V. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

- 5.1. Устройство машины постоянного тока
- 5.2. Генератор с независимым возбуждением и его характеристики
- 5.3. Генератор параллельного возбуждения
- 5.4. Генератор последовательного возбуждения и его характеристики
- 5.5. Генератор смешанного возбуждения и его характеристики
- 5.6. Двигатели постоянного тока
- 5.7. Вращающий момент двигателя постоянного тока. Пуск двигателя постоянного тока
- 5.8. Двигатель с параллельным возбуждением и его механическая характеристика
- 5.9. Двигатель последовательного возбуждения
- 5.10. Двигатель смешанного возбуждения и его механическая характеристика

ГЛАВА VI. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

- 6.1. Классификация трансформаторов
- 6.2. Режим холостого хода
- 6.3. Потери в меди и стали трансформатора
- 6.4. Катушка без сердечника
- 6.5. Натруженный трансформатор
- 6.6. Векторная диаграмма нагруженного трансформатора

6.7. Опыт холостого хода трансформатора

ГЛАВА VII. АСИНХРОННАЯ МАШИНА

- 7.1. Устройство асинхронной машины
- 7.2. Принцип действия асинхронного двигателя
- 7.3. Уравнение ЭДС статорной обмотки. Схема замещения асинхронного двигателя
- 7.4. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя
- 7.5. Вращающий момент двигателя и механическая характеристика

ГЛАВА VIII. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

- 8.1. Устройство синхронной машины
- 8.2. Генератор и его принцип работы
- 8.3. Характеристика холостого хода синхронного генератора. Определение начал и концов обмотки статора
- 8.4. Реакция якоря
- 8.5. Двухполюсный синхронный генератор
- 8.6. Включение синхронной машины на параллельную работу с сетью
- 8.7. Уравнение ЭДС и напряжений синхронной машины и векторная диаграмма
- 8.8. Режим генератора
- 8.9. Режим двигателя
- 8.10. Режим синхронного компенсатора