

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

**М. П. Тиличенко, А. Н. Вершинин**

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
по одноименному курсу для студентов  
неэлектротехнических специальностей  
дневной и заочной форм обучения**

**В трех частях  
Часть 3**

Гомель 2011

УДК 621.3+621.313(075.8)  
ББК 31.2+31.261я73  
Т40

*Рекомендовано научно-методическим советом  
машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 10 от 28.06.2010 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Промышленная электроника»  
ГГТУ им. П. О. Сухого *Н. И. Вяхирев*

**Тиличенко, М. П.**  
Т40      Электротехника, электрические машины и аппараты : лаборатор. практикум по од-  
ноим. курсу для студентов неэлектротехн. специальностей днев. и заоч. форм обучения :  
в 3 ч. Ч. 3 / М. П. Тиличенко, А. Н. Вершинин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. –  
53 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное  
место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа:  
<http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Содержит лабораторные работы по электротехнике, электрическим машинам и аппаратам,  
может использоваться как на занятиях по ТОЭ, так и для самостоятельной работы.  
Для студентов неэлектротехнических специальностей дневной и заочной форм обучения.

**УДК 621.3+321.313(075.8)  
ББК 31.2+31.261я73**

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2011

## Лабораторная работа № 13

### Переходные процессы в линейных электрических цепях

#### 1. Цели работы:

- изучить классический метод расчета переходных процессов применительно к неразветвленным линейным электрическим цепям с одним и двумя реактивными элементами;
- овладеть навыками экспериментальных исследований переходных процессов при воздействии на электрическую цепь периодической последовательности прямоугольных импульсов.

#### 2. Теоретические сведения

Переходные процессы изучают составлением и решением системы уравнений по законам Кирхгофа применительно к мгновенным напряжениям на элементах цепи и токам в ветвях цепи, а экспериментальное их исследование выполняют при помощи осциллографа.

Исследуемая цепь присоединяется к генератору периодических прямоугольных импульсов напряжения длительностью  $t_1$  превышающей время существования переходного процесса. Это позволяет в течение времени  $t_1$  наблюдать на экране осциллографа кривые изменения переходного напряжения на элементах и переходного тока в ветвях цепи при включении цепи на напряжение  $U_m = const$ , а в течение времени  $t_2$ , когда  $u_{вх}(t) = 0$  (пауза между импульсами) - наблюдать аналогичные кривые при замыкании цепи на выходное сопротивление генератора.

Схема лабораторной установки приведена на рис. 13.1.

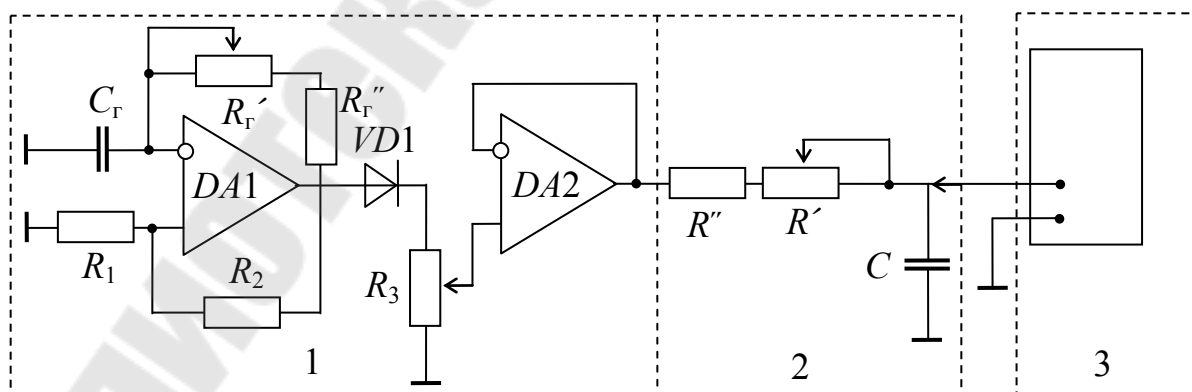


Рис. 13.1 Схема установки для исследования переходных процессов: 1 – генератор однополярных прямоугольных импульсов; 2 – исследуемая RLC-цепь; 3 – осциллограф

$R_r' = 47 \text{ кОм}$ ;  $C_r = 0,1 \text{ мкФ}$ ;  $VD1 - КД522$ ;  $R_1 = 5,1 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 10 \text{ кОм}$ ;

$R_3 = 15 \text{ кОм}$ ;  $DA1, DA2 - К157УД2$ ;  $R_r'' = 2 \text{ кОм}$ ;  $R'' = 2 \text{ кОм}$

На микросхеме DA1 собран генератор двухполярных прямоугольных импульсов с регулируемой (резистором  $R'_2$ ) частотой

$$f = 1/[2R_T C_T \ln(1 + 2R_1/R_2)]; R_T = R'_T + R''_T. \quad (13.1)$$

На микросхеме DA2 собран повторитель напряжения, используемый в качестве согласующего каскада с большим входным и малым выходным сопротивлениями.

2.1. *Переходные процессы в RC-цепи при переключении входного напряжения с 0 на  $U_m$ .*

Записав уравнение по второму закону Кирхгофа для RC-цепи для момента времени после коммутации

$$\tau \frac{du_c}{dt} + u_c = U_m, \quad (13.2)$$

где  $\tau = RC$  - постоянная времени исследуемой RC-цепи; ( $R = R' + R''$ );

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} - \text{мгновенное значение тока в цепи,}$$

будем искать решение для  $u_c(t)$  в виде суммы

$$u_c(t) = u_{c\text{пр}} + u_{c\text{своб}}, \quad (13.3)$$

где  $u_{c\text{пр}}$  - принужденная (установившаяся) составляющая напряжения на конденсаторе  $C$  ( $u_{c\text{пр}} = U_m$ );

$u_{c\text{своб}}$  - свободная составляющая, которую находят общим решением однородного (без правой части) дифференциального уравнения

$$\tau \frac{du_c}{dt} + u_c = 0. \quad (13.4)$$

Заменив  $u_c$  на 1, а  $\frac{du_c}{dt}$  - на  $p$ , получим характеристическое уравнение

$$\tau p + 1 = 0, \quad (13.5)$$

из которого находим единственный корень

$$p = \frac{1}{\tau}. \quad (13.6)$$

Следовательно,

$$u_c(t) = U_m + A_1 e^{-t/\tau}. \quad (13.7)$$

Так как  $u_c(0_+) = u_c(0_-) = 0$ , то из (13.7) следует, что  $0 = U_m + A_1$  или  $A_1 = -U_m$ .

Таким образом, искомая функция  $u_c(t)$  имеет вид

$$\left. \begin{array}{l} \text{Ток в цепи} \\ u_{1c}(t) = U_m - U_m e^{-t/\tau}. \\ i_1(t) = C \frac{du_c}{dt} = \frac{U_m}{R} e^{-t/\tau}. \\ \text{Напряжение на резисторе } R \\ u_{1R}(t) = R i(t) = U_m e^{-t/\tau}. \end{array} \right\} \quad (13.8)$$

2.2. Переходный процесс в RC-цепи при переключении входного напряжения с  $U_m$  на 0

$$\tau \frac{du_c}{dt} + u_c = 0;$$

$$u_{c\text{пр}} = 0; u_c(t) = u_{c\text{пр}} + u_{c\text{св}} = 0 + A_2 e^{-t/\tau}.$$

По закону коммутации  $u_c(0_+) = u_c(0_-) = U_m$ , и, следовательно,  $U_m = A_2$  или  $u_{2c}(t) = U_m e^{-t/\tau}$ .

Получаем систему функций:

$$\left. \begin{array}{l} u_{2c}(t) = U_m e^{-t/\tau} \\ i_2(t) = -\frac{U_m}{R} e^{-t/\tau} \\ u_{2R}(t) = -U_m e^{-t/\tau} \end{array} \right\} \quad (13.9)$$

На рис. 13.2 приведены временные синхронизированные диаграммы на входе цепи и на ее элементах. При этом в выражениях (13.8) и (13.9) принято, что  $R_{\text{вых}}$  повторителя напряжения равно нулю.

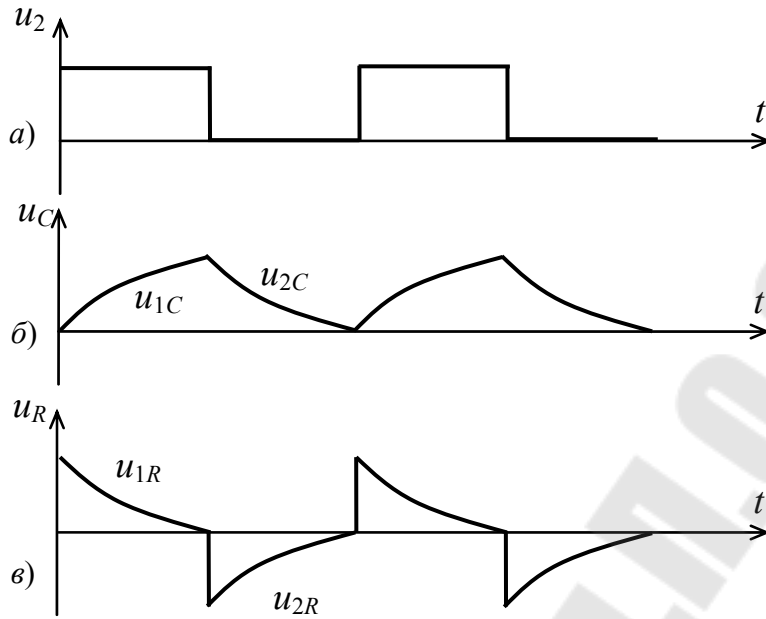


Рис. 13.2. Временные синхронизированные диаграммы мгновенных значений напряжений на входе  $RC$  цепи и на ее элементах

### 2.3. Переходный процесс в $RL$ -цепи при переключении входного напряжения с 0 на $U_m$

Заменяя на рис. 13.1 конденсатор  $C$  на катушку индуктивности, получим  $RL$ -цепь с параметрами  $R_\Sigma = R + R_k, L$ .

$$i(t)R_\Sigma + L \frac{di(t)}{dt} = U_m. \quad (13.10)$$

Разделив все слагаемые на  $R_\Sigma$ , получим линейное неоднородное дифференциальное уравнение вида

$$\tau \frac{di(t)}{dt} + i(t) = \frac{U_m}{R_\Sigma}, \quad (13.11)$$

где  $\tau = \frac{L}{R_\Sigma}$  - постоянная времени  $RL$ -цепи.

Заменяя  $i(t)$  на 1, а  $\frac{di(t)}{dt}$  - на  $p$  и приравняв нулю правую часть уравнения (13.11), получим характеристическое уравнение

$$\tau p + 1 = 0 \text{ или } p = -1/\tau. \quad (13.12)$$

Поскольку  $i_{\text{пр}} = \frac{U_m}{R_\Sigma}$ , то

$$i(t) = \frac{U_m}{R_\Sigma} + A_3 e^{-t/\tau}. \quad (13.13)$$

Так как по закону коммутации для катушки индуктивности  $i(0_+) = i(0_-) = 0$ , то для  $t = 0$  из (13.13) следует  $0 = \frac{U_m}{R_\Sigma} + A_3$ , или

$$A_3 = -\frac{U_m}{R_\Sigma}.$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Значит, } i_1(t) &= \frac{U_m}{R_\Sigma} - \frac{U_m}{R_\Sigma} e^{-t/\tau} = \frac{U_m}{R_\Sigma} (1 - e^{-t/\tau}); \\ i_{1R}(t) &= R i_1(t) = \frac{R}{R_\Sigma} U_m (1 - e^{-t/\tau}); \\ i_{1к}(t) &= i_1(t) R_k + L \frac{d i_1(t)}{d t} = \frac{U_m}{R_\Sigma} (R_k + R e^{-t/\tau}). \end{aligned} \right\} \quad (13.14)$$

2.4. *Переходный процесс в RL-цепи при переключении входного напряжения с  $U_m$  на 0*

Решая задачу аналогично предыдущей, получим функции

$$\left. \begin{aligned} i_2(t) &= \frac{U_m}{R_\Sigma} e^{-t/\tau} \\ u_{2R}(t) &= U_m \frac{R}{R_\Sigma} e^{-t/\tau} \\ u_{2к}(t) &= -\frac{U_m}{R_\Sigma} R e^{-t/\tau} \end{aligned} \right\}. \quad (13.15)$$

На рис. 13.3 приведены временные диаграммы напряжений на входе RL-цепи и на ее элементах.

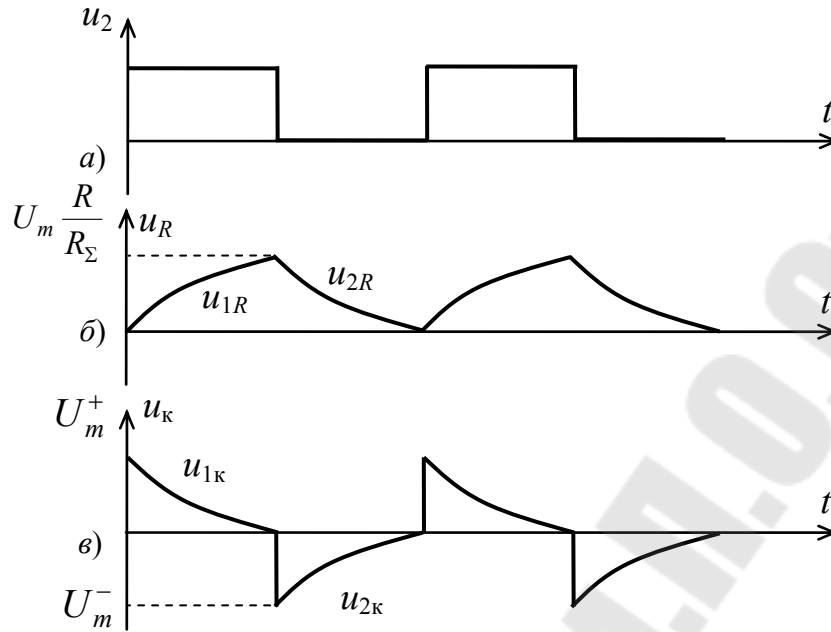


Рис. 13.3. Временные диаграммы напряжений на входе и на элементах RLC-цепи

## 2.5. Переходные процессы в неразветвленной линейной RL-цепи

Добавив в схеме рис. 13.1 катушку индуктивности с параметрами  $R_k, L$ , получим цепь с двумя разнородными реактивными элементами.

### 2.5.1. Переходный процесс переключения входного напряжения с 0 на $U_m$

По второму закону Кирхгофа для мгновенных напряжений для момента времени после переключения имеем уравнение

$$R_\Sigma i + L \frac{di}{dt} + u_c = U_m. \quad (13.16)$$

Так как  $i = C \frac{du_c}{dt}$ , то уравнение (13.16) принимает вид

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + R_\Sigma C \frac{du_c}{dt} + u_c = U_m, \text{ или} \\ \frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R_\Sigma}{L} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{LC} u_c = U_m, \quad (13.17)$$

где  $u_c(t) = u_{c\text{пр}} + u_{c\text{св}}(t)$ ;  $u_{c\text{пр}} = U_m$ .



Для нахождения функции  $u_{c\text{cb}}(t)$  приравняем нулю правую часть уравнения (13.17) и составляем характеристическое уравнение

$$p^2 + \frac{R_\Sigma}{L} p + \frac{1}{LC} = 0. \quad (13.18)$$

Находим корни этого уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{R_\Sigma}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R_\Sigma}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}. \quad (13.19)$$

2.5.1.1. Корни  $p_1, p_2$  действительные и разные.

Если  $\frac{R_\Sigma^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}$ , или если  $R_\Sigma > 2\rho$ , где  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$  - характеристическое сопротивление RLC-цепи, то корни  $p_1$  и  $p_2$  действительные и разные.

В этом случае

$$u_{c\text{cb}}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \text{ а } u_c(t) = U_m + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \quad (13.20)$$

Постоянные интегрирования  $A_1$  и  $A_2$  находим из начальных условий

$$u_c(0_+) = u_c(0_-) = 0; \quad i(0_+) = i(0_-) = C \frac{du_c(0_+)}{dt} = 0.$$

Из (13.20) получаем (для  $t = 0_+$ )

$$\left. \begin{aligned} 0 &= U_m + A_1 + A_2 \\ 0 &= A_1 p_1 + A_2 p_2 \end{aligned} \right\}; \quad A_1 = \frac{p_2}{p_1 - p_2} U_m; \quad A_2 = -\frac{p_1}{p_1 - p_2} U_m.$$

Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} u_{1c}(t) &= U_m + \frac{U_m}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \\ i_1(t) &= \frac{U_m}{L} \frac{1}{p_1 - p_2} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \\ u_{1R}(t) &= R i_1(t) = \frac{R}{L} \frac{1}{p_1 - p_2} U_m (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \\ u_{1K}(t) &= R_K i_1(t) + L \frac{di_1(t)}{dt} = \\ &= \frac{U_m}{L} \frac{1}{p_1 - p_2} [R_K (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) + L (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t})] \end{aligned} \right\}. \quad (13.21)$$

На рис. 13.4б приведены временные диаграммы напряжений на элементах цепи для этого случая. Из диаграмм следует, что временные функции напряжения изменяются аperiodически.

### 2.5.1.2. Корни $p_1$ и $p_2$ действительные и равные

Аналогичные по характеру процессы имеют место при равных корнях, когда

$$R_{\Sigma} = 2\rho. \quad (13.22)$$

В этом случае

$$p_1 = p_2 = -\frac{R_{\Sigma}}{2L}, \quad (13.23)$$

$$u_c(t) = U_m + (A_1 + A_2 t)e^{pt}.$$

Из начальных условий составляем систему уравнений для определения  $A_1$  и  $A_2$

$$\left. \begin{aligned} 0 &= U_m^+ + A_1 \\ 0 &= A_2 + pA_1 \end{aligned} \right\} A_1 = -U_m; A_2 = pU_m.$$

$$\left. \begin{aligned} u_{1c}(t) &= U_m(1 - e^{pt} + Pt e^{pt}) \\ i_1(t) &= CU_m p^2 t e^{pt} \\ u_{1R}(t) &= i_1(t)R = RCU_m p^2 t e^{pt} \\ u_{1K}(t) &= Cp^2 U_m [R_K t + L(1 + pt)]e^{pt} \end{aligned} \right\}. \quad (13.24)$$

Графики этих функций приведены на рис. 13.4б.

### 2.5.1.3. Корни $p_1$ и $p_2$ комплексные, сопряженные

Если  $R_{\Sigma} < 2\rho$ , то корни  $p_1$  и  $p_2$  характеристического уравнения (13.18) будут комплексные и сопряженные друг другу.

Проведем следующие преобразования

$$\sqrt{R_{\Sigma}^2/4L^2 - 1/LC} = j\sqrt{1/LC - R_{\Sigma}^2/4L^2} = j\omega_{св}. \quad (13.25)$$

Обозначим

$$R_{\Sigma}/2L = \delta, \quad (13.26)$$

тогда корни  $p_1$  и  $p_2$  можно записать в виде

$$p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_{св}, \quad (13.27)$$

где  $\delta$  - коэффициент затухания;

$\omega_{\text{св}} = \sqrt{1/LC - R'^2/4L^2} = 2\pi/T_0$  - угловая частота собственных колебаний в контуре;

$T_0$  - период собственных колебаний.

Если обозначить  $\frac{1}{LC} = \omega_0^2$ , то

$$\omega_{\text{св}} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (13.28)$$

$u_c(t) = u_{\text{с пр}} + u_{\text{с св}}$ , где  $u_{\text{с пр}} = U_m$ .

Будем искать решения для  $u_{\text{с св}}(t)$  в виде выражения

$$u_{\text{с св}}(t) = A e^{-\delta t} \sin(\omega_{\text{св}} t + \psi). \quad (13.29)$$

Выражения для  $A$  и  $\psi$  найдем из начальных условий

$$u_c(0_+) = u_c(0_-) = 0; \quad i(0_+) = i(0_-) = 0;$$

$$u_c(0) = U_m + A \sin \psi = 0 \quad \text{или} \quad A \sin \psi = -U_m;$$

$$i(t) = C \frac{d u_c(t)}{d t} = C A e^{-\delta t} [-\delta \sin(\omega_{\text{св}} t + \psi) + \omega_{\text{св}} \cos(\omega_{\text{св}} t + \psi)];$$

$$i(0) = C A (-\delta \sin \psi + \omega_{\text{св}} \cos \psi) = 0 \quad \text{или} \quad \text{tg} \psi = \omega_{\text{св}} / \delta. \quad (13.30)$$

$$\text{Тогда} \quad A = -\frac{U_m}{\sin \psi} = -U_m \frac{\omega_0}{\omega_{\text{св}}}.$$

Таким образом,

$$u_{1c}(t) = U_m - U_m \frac{\omega_0}{\omega_{\text{св}}} e^{-\delta t} \sin(\omega_{\text{св}} t + \psi).$$

С учетом (13.21) получим

$$i_1(t) = \frac{U_m}{L \omega_{\text{св}}} e^{-\delta t} \sin \omega_{\text{св}} t;$$

$$u_{1R} = i_1 R = U_m \frac{R}{L \omega_{\text{св}}} e^{-\delta t} \sin \omega_{\text{св}} t;$$

$$u_{1к}(t) = R_k i_1(t) + L \frac{d i_1(t)}{d t} = \frac{U_m}{\omega_{\text{св}}} e^{-\delta t} \left[ \frac{R_k}{L} \sin \omega_{\text{св}} t - \omega_0 \sin(\omega_{\text{св}} t - \psi) \right].$$

Графики некоторых из этих функций приведены на рис. 13.4в.

2.5.2. *Переходный процесс переключения входного напряжения с  $U_m$  на 0*

Для цепи после коммутации имеем дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R_\Sigma}{L} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{LC} u_c = 0, \quad (13.32)$$

где  $u_c(t) = u_{c\text{св}}; u_{c\text{пр}} = 0$ .

2.5.2.1. *Корни  $p_1$  и  $p_2$  действительные и разные, т.е.  $R_\Sigma > 2\rho$*

$$u_c(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t};$$

$$u_c(0_+) = u_c(0_-) = U_m; i(0_+) = i(0_-) = C \frac{du_c(0)}{dt} = 0;$$

$$A_1 = -U_m \frac{p_2}{p_1 - p_2}; A_2 = U_m \frac{p_2}{p_1 - p_2}.$$

$$\left. \begin{aligned} u_{2c}(t) &= \frac{U_m}{p_1 - p_2} (p_1 e^{p_2 t} - p_2 e^{p_1 t}) \\ i_2(t) &= \frac{U_m}{L} \frac{1}{p_1 - p_2} (e^{p_2 t} - e^{p_1 t}) \\ u_{2R}(t) &= \frac{RU_m}{L} \frac{1}{p_1 - p_2} (e^{p_2 t} - e^{p_1 t}) \\ u_{2K}(t) &= \frac{U_m}{L} \frac{1}{p_1 - p_2} [(R_K + Lp_2)e^{p_2 t} - (R_K + Lp_1)e^{p_1 t}] \end{aligned} \right\} (13.33)$$

Графики этих функций приведены на рис. 13.4б.

2.5.2.2. *Корни  $p_1$  и  $p_2$  действительные и равные*

$$u_c(t) = 0 + (A_1 + A_2 t) e^{pt}.$$

Из начальных условий

$$u_c(0_+) = u_c(0_-) = U_m; i(0_+) = i(0_-) = C \frac{d u_c(0)}{d t} = 0$$

следует система уравнений

$$\left. \begin{aligned} A_1 = U_m \\ A_2 + A_1 p = 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} A_1 = U_m \\ A_2 = -p U_m \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} u_{2c}(t) &= (U_m - p U_m t) e^{pt} = U_m (1 - pt) e^{pt} \\ i_2(t) &= -C U_m p^2 t e^{pt} \\ u_{2R}(t) &= R i_2(t) = -C R U_m p^2 t e^{pt} \\ u_{2K}(t) &= -C U_m p^2 [R_K t + L(1 + pt)] e^{pt} \end{aligned} \right\} \quad (13.34)$$

Графики этих функций приведены на рис. 13.4б.

2.5.2.3. Корни  $p_1$  и  $p_2$  комплексные и сопряженные

$$u_c(t) = A e^{-\delta t} \sin(\omega_{CB} t + \psi);$$

$$u_c(0_+) = u_c(0_-) = U_m; i(0_+) = i(0_-) = C \frac{d u_c(0)}{d t} = 0;$$

$$\left. \begin{aligned} U_m &= A \sin \psi \\ \operatorname{tg} \psi &= \frac{\omega_{CB}}{\delta} \end{aligned} \right\}$$

Так как  $\sin \psi = \frac{\omega_{CB}}{\omega_0}$ , то  $A = \frac{U_m \omega_0}{\omega_{CB}}$  и, следовательно,

$$\left. \begin{aligned} u_{2c}(t) &= U_m \frac{\omega_0}{\omega_{CB}} e^{-\delta t} \sin(\omega_{CB} t + \psi) \\ i_2(t) &= -U_m \frac{1}{L \omega_{CB}} e^{-\delta t} \sin \omega_{CB} t \\ u_{2R}(t) &= -U_m \frac{R}{L \omega_{CB}} e^{-\delta t} \sin \omega_{CB} t \\ u_{2K}(t) &= -U_m \frac{1}{\omega_{CB}} e^{-\delta t} \left[ \frac{R_K}{L} \sin \omega_{CB} t - \omega_0 \sin(\omega_{CB} t - \psi) \right] \end{aligned} \right\}$$

Графики некоторых из этих функций приведены на рис. 13.4в.

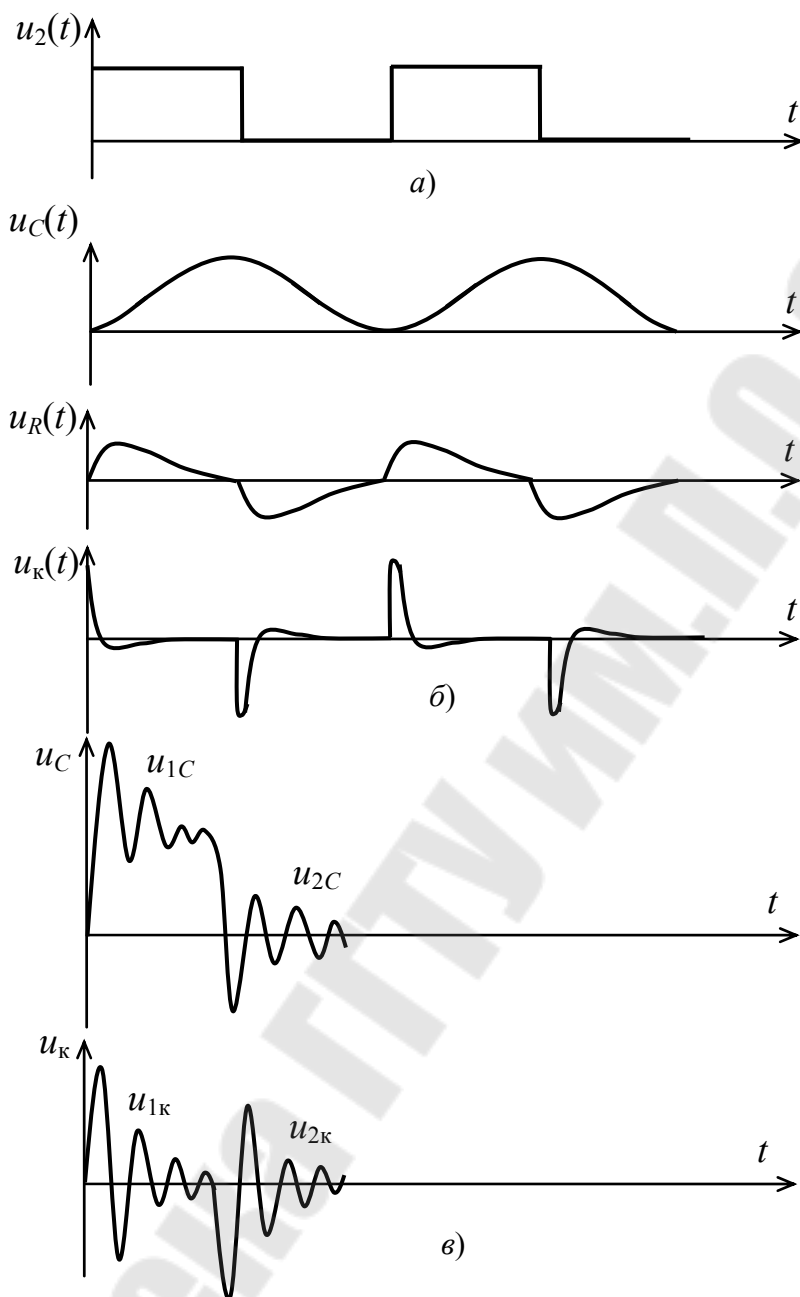


Рис. 13.4. Временные диаграммы напряжений на элементах RLC-цепи для различных значений корней характеристического уравнения

### 3. Задание, выполняемое при домашней подготовке

3.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе [1] и разделу 1 данной работы изучить классический метод расчета переходных процессов применительно к неразветвленным электрическим цепям с одним и двумя реактивными элементами.

3.2. Уяснить физический смысл и размерность величин, характеризующих переходные процессы в RC, RL и RLC- цепях (постоянная времени, коэффициент затухания, угловая частота и период затухания)

колебаний, критическое сопротивление, логарифмический декремент затухания, добротность). Научиться рассчитывать эти величины.

3.3. По данным табл. 13.1 рассчитать значение  $R = R' + R''$  для RC-цепи и для RL-цепи, необходимые для получения заданного значения постоянной времени  $\tau$ .

Таблица 13.1

№ бригады Параметр	1	2	3	4
$\tau$ , мс	0,10	0,2	0,30	0,4
$C$ , мкФ	0,01	0,01	0,01	0,01
$L$ , Гн	1,15	1,15	1,15	1,15
$R_k$ , Ом	158	158	158	158

3.4. По данным табл. 13.2 рассчитать зависимости  $u_{1c}(t)$ ,  $u_{2c}(t)$ ,  $u_{1R}(t)$ ,  $u_{2R}(t)$  для RC-цепи и  $u_{1R}(t)$ ,  $u_{2R}(t)$ ,  $u_{1k}(t)$ ,  $u_{2k}(t)$  для RL-цепи по выражениям (13.8), (13.9), (13.15), (13.16).

Таблица 13.2

№ бригады Параметр	1	2	3	4
$f_{\Gamma}$ , Гц	800	600	400	200
$U_m$ , В	2,5	5,0	7,5	10

где  $t = 0 \div t_{\text{имп}}$ ;  $t_{\text{имп}} = T/2 = 1/(2f_{\Gamma})$ ;  $\Delta t = t_{\text{имп}}/10$ .

3.5. По данным табл. 13.1 определить значение характеристического сопротивления  $\rho = \sqrt{L/C}$ . Приняв  $R_{\Sigma} = R' + R'' + R_k = \rho/2$ , определить значения коэффициента затухания  $\delta = R_{\Sigma}/2L$ ,  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  и угловой частоты собственных колебаний  $\omega_{\text{св}} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ .

3.6. По данным табл. 13.2 рассчитать зависимости  $u_{1c}(t)$ ,  $u_{2c}(t)$ ,  $u_{1k}(t)$ ,  $u_{2k}(t)$  по выражениям (13.32), (13.36), изменяя  $t$  от 0 до  $t_{\text{имп}}$  с шагом  $t_{\text{имп}}/100$ .

#### 4. Лабораторное задание

4.1. Исследовать переходные процессы в RC-цепи. Для этого:

4.1.1. Собрать на монтажной панели схему по рис. 13.1, применив конденсатор  $c$  заданной в табл. 13.1 емкости и переменный резистор  $R'$  на 47кОм ( $R'' = 2$  кОм).

4.1.2. Настроить генератор на частоту  $f_r$ , заданную в табл. 13.2, изменяя  $R_r$  и измеряя период  $T_k = 1/f_r$  с помощью осциллографа. Вход канала А осциллографа подключить к выходу микросхемы DA2 (к входу исследуемой RC-цепи). Изменяя  $R_3$ , установить амплитуду  $U_m$  входных однополярных прямоугольных импульсов по таблице 13.2.

4.1.3. Подключить входной кабель канала Б осциллографа к конденсатору и, регулируя время развертки и чувствительность усилителей, получить неподвижное изображение 1-2-х периодов переходных процессов. Изменяя сопротивление  $R'$ , убедиться в изменении постоянной времени.

4.1.4. Установить с помощью омметра значение сопротивления  $R'$ , равное рассчитанному по п.2.3 домашней подготовки ( $R' = R_\Sigma - R''$ ) и включив  $R'$  в исследуемую цепь отснять в протокол временные синхронизированные диаграммы сигналов  $u_r(t)$ ,  $u_C(t)$ ,  $u_R(t)$ , оформив их по образцу рис. 13.2. Рядом с диаграммами указать значения масштабных множителей  $m_{UA}$ ,  $m_{UB}$ ,  $m_t$ .

4.1.5. Измерить и записать в протокол (с помощью преподавателя) значение постоянной времени  $\tau_{изм} = RC$  и сравнить с  $\tau_3$ .

4.2. Исследовать переходные процессы в RL-цепи. Для этого:

4.2.1. Заменить в схеме рис. 13.1 конденсатор С на катушку индуктивности (резисторы  $R' = 22$  кОм,  $R'' = 2$  кОм).

4.2.2. Изменяя  $R'$  плавно (вращая ручку переменного резистора) наблюдайте за изменением постоянной времени для функций  $u_R(t)$  и  $u_k(t)$ .

4.2.3. Установив значение  $R$ , равное рассчитанному в п.2.3 ( $R' = R_\Sigma - R_k - R''$ ) для RL-цепи, получить на экране осциллографа и зафиксировать в протокол временные синхронизированные диаграммы сигналов  $u_r(t)$ ,  $u_R(t)$  и  $u_k(t)$  по образцу рис. 13.3. Указать значения масштабных множителей.

4.2.4. Измерить и записать в протокол значение постоянной времени

$$\tau_{изм} = \frac{L}{R_\Sigma} \text{ и сравнить с } \tau_3.$$

4.3. Исследовать переходные процессы в RLC-цепи. Для этого:

4.3.1. Собрать последовательную RLC-цепь на выходе микросхемы DA2, рис. 13.1. Значение емкости С конденсатора установить по табл. 13.1 (резисторы  $R' = 22$  кОм,  $R'' = 2$  кОм).



4.3.2. Установить с помощью омметра значение  $R' = \rho/2 - R_k - R''$  и получить на экране осциллографа неподвижное изображение одного периода импульсов генератора  $u_r(t)$  (канал А) и функций  $u_c(t)$  и  $u_k(t)$  (канал Б). При необходимости отрегулировать частоту импульсов  $u_r(t)$  (резистором  $R_r'$ ). Зарисовать в протокол осциллограммы функций  $u_r(t)$ ,  $u_c(t)$  и  $u_k(t)$  по образцу рис. 13.4а,в. Указать значения масштабных множителей.

4.3.3. Измерить и записать период  $T_{св}$  свободных колебаний. Измерить и записать амплитуды колебаний в точках, отстоящих на расстоянии одного периода  $U_m(t)$  и  $U_m(t+T)$  и определить логарифмический декремент затухания  $\Delta = \ln \frac{U_m(t)}{U_m(t+T)}$ , коэффициент затухания

$$\delta = \frac{\Delta}{T} \text{ и добротность } q = \frac{\pi}{\delta T};$$

4.3.4. Увеличивая  $R'$ , наблюдайте за изменением характера колебательного переходного процесса  $u_c(t)$ . Установите с помощью омметра  $R_\Sigma = 2,2\rho$  и зарисуйте в протокол осциллограммы функций  $u_c(t)$ ,  $u_R(t)$  и  $u_k(t)$  по образцу рис. 13.4б.

## 5. Контрольные вопросы

5.1. Дайте определение переходного процесса в электрической цепи. Укажите возможные причины возникновения переходных процессов.

5.2. Сформулируйте законы коммутации.

5.3. Поясните суть классического метода расчета переходных процессов. Перечислите этапы метода.

5.4. Что понимается под установившейся и свободной составляющими переходного процесса?

5.5. Как составляется характеристическое уравнение и в каком виде записывается решение для свободной составляющей для электрической цепи с одним и двумя реактивными элементами?

5.6. Как определяются постоянные интегрирования, какие условия называются начальными?

5.7. Дайте определение постоянной времени и укажите, как она связана с длительностью переходного процесса.

5.8. Как определяется значение постоянной времени RC, RL-цепи с помощью осциллографа?

5.9. Поясните особенности применения осциллографа для экспериментального исследования переходных процессов.

5.10. Какие условия должны быть соблюдены для получения апериодического и колебательного характера разряда конденсатора в RLC-цепи?

5.11. От чего зависит период свободных колебаний переходного колебательного процесса разряда конденсатора в RLC-цепи?

5.12. Как по осциллограмме колебательного процесса в RLC-цепи определить период колебаний, коэффициент затухания, добротность, декремент затухания?

## 6. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- краткие письменные ответы на контрольные вопросы;
- раздел “Домашняя подготовка” с указанием исходных данных и результатов расчетов;
- раздел “Ход работы” с названиями пунктов 4.1, 4.2, 4.3.

По пункту 4.1, 4.2:

- схему исследуемой цепи с указанием параметров  $R$  и  $C$  элементов. Временные синхронизированные диаграммы напряжений  $u_r(t)$ ,  $u_c(t)$  и  $u_R(t)$  по образцу рис. 13.2, рис. 13.3, построенных с соблюдением масштабов и фазовых отношений;
- результат измерения постоянной времени  $\tau_{\text{изм}}$  и сравнение с  $\tau_{\text{расч}} = \tau_z$

По пункту 4.3:

- схему исследуемой цепи с указанием параметров RLC-элементов;
- временные синхронизированные диаграммы напряжений  $u_r(t)$ ,  $u_c(t)$  и  $u_k(t)$  по образцу рис. 13.4а,в (для  $R = \rho/2 - R_k$ );
- результаты измерения (определения) с помощью осциллографа  $U_m(t)$ ,  $U_m(T+t)$  и расчета  $\Delta$ ,  $\delta$  и  $q$ ;
- для  $R > 2\rho$  - синхронизированные временные диаграммы по образцу рис. 13.4б;
- анализ результатов и выводы по результатам эксперимента и расчета.

## Лабораторная работа № 14 Трехфазные трансформаторы

### 1. Цели работы

- изучить устройство трехфазного трансформатора и выполнить маркировку выводов его обмоток;
- определить значение фазного и линейного коэффициентов трансформации при различных типах соединения его обмоток;
- определить группы соединения обмоток.

### 2. Теоретические сведения

Трехфазные трансформаторы преобразуют электрическую энергию в трехфазных цепях с одним соотношением линейных напряжений и токов в электрическую энергию с другим соотношением этих же величин, при неизменной частоте.

В стержневых трехфазных трансформаторах с расположением трех стержней в одной плоскости, замкнутых сверху и снизу ярмами, имеется трехфазная обмотка высшего напряжения (ВН) и низшего напряжения (НН), в каждую из которых входят по три фазные обмотки (или фазы). Таким образом, трехфазный трансформатор имеет шесть фазных обмоток и двенадцать выводов. Начальные выводы фазных обмоток высшего напряжения обозначают буквами А, В, С, а конечные – Х, Y, Z. Для обмоток низшего напряжения применяют аналогичные обозначения – буквами а, b, с и х, у, z.

Фазные обмотки высшего напряжения соединяют между собой звездой или треугольником. По таким же схемам соединяют между собой фазные обмотки низшего напряжения. При соединении звездой, нейтральные точки обозначают буквой N для обмоток ВН и n – для обмоток НН.

Фазный коэффициент трансформации определяется отношением фазных напряжений при холостом ходе, т.е. при разомкнутых фазных обмотках НН

$$K_{\phi} = \frac{U_{1\phi}^{xx}}{U_{2\phi}^{xx}}. \quad (14.1)$$

Линейный коэффициент трансформации определяется аналогично

$$K_{л} = \frac{U_{1л}^{xx}}{U_{2л}^{xx}}. \quad (14.2)$$

Для соединений Y-Y и Δ-Δ  $K_{л} = K_{ф}$ , для соединения Y-Δ  $K_{л} = \sqrt{3}K_{ф}$ , а для соединения Δ-Y  $K_{л} = K_{ф}/\sqrt{3}$ .

При параллельном включении силовых трансформаторов в электрическую энергосистему либо при использовании в энергосистеме нескольких ступеней трансформации напряжения, применяются трехфазные трансформаторы с одинаковой группой соединения обмоток. При этом группа соединения указывает схему соединения обмоток и разность фаз между линейными напряжениями на высшей и низшей стороне. Угол сдвига фаз между соответствующими линейными напряжениями на высшей и низшей стороне отсчитывается в направлении вращения часовой стрелки от вектора  $\underline{U}_{1л}$  к вектору  $\underline{U}_{2л}$ . Величина этого угла зависит от направления навивки обмоток, маркировки их выводов и типа соединения обмоток, и выражается в часах. При этом каждый час соответствует углу в  $30^\circ$  ( $360^\circ/12 = 30^\circ$ ).

Пусть, например, обмотка высшего напряжения (ВН) соединена звездой (рис. 14.1а).

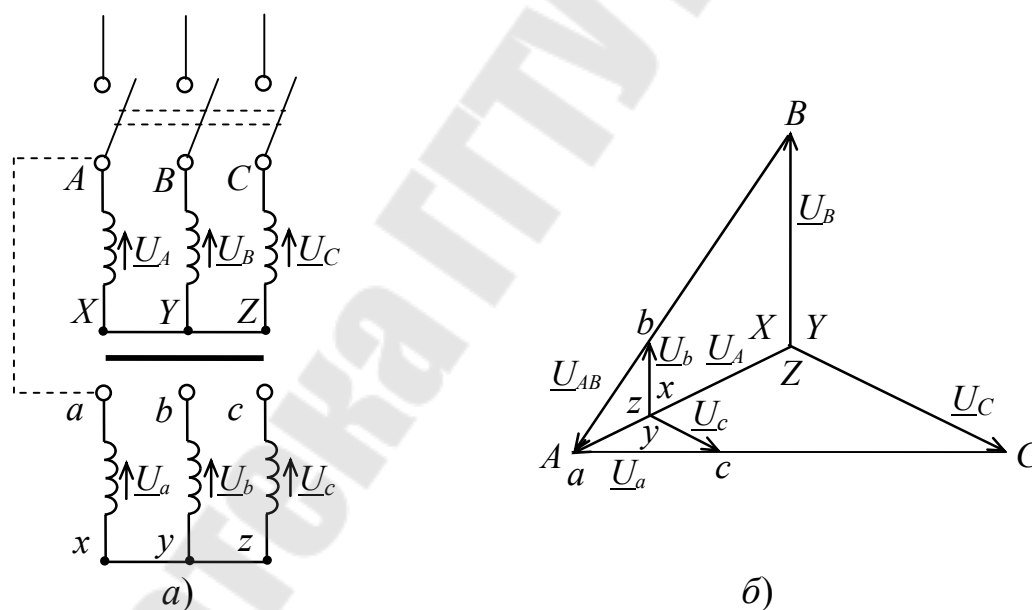


Рис. 14.1. Схема соединения (а) и потенциальная диаграмма (б) для группы Y/Y-12

Если обмотка низшего напряжения так же соединена звездой (рис. 14.1а), то, представив себе, что выводы  $A$  и  $a$  электрически соединены вместе, можно звезду напряжений для этой обмотки расположить так, как показано на рис. 14.1б.

Если сопоставить вектор  $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{1л}$  с минутной стрелкой часов, указывающей на 12 часов, то часовая стрелка, представляющая условно вектор  $\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{2л}$  укажет на группу соединения. В данном случае сдвиг фаз между  $\underline{U}_{1л}$  и  $\underline{U}_{2л}$  равен  $360^\circ$ , а часовая стрелка указывает на цифру 12, поэтому имеем группу соединения Y/Y-12.

Напряжения  $U_{Bb}$  и  $U_{Cc}$  определяют группу соединения обмоток и могут быть рассчитаны из выражений

$$\left. \begin{aligned} U_{Bb} &= U_{AB} - U_{ab} = K_{л} U_{ab} - U_{ab} = U_{ab} (K_{л} - 1) \\ U_{Cc} &= U_{CA} - U_{ca} = K_{л} U_{ca} - U_{ca} = U_{ca} (K_{л} - 1) \end{aligned} \right\}. \quad (14.3)$$

Поменяв местами начала и концы фазных обмоток НН, получим соединения Y/Y-6 и потенциальную диаграмму рис. 14.2.

Для этой схемы

$$U_{Bb} = U_{ab} (K_{л} + 1); \quad U_{Cc} = U_{ca} (K_{л} + 1). \quad (14.4)$$

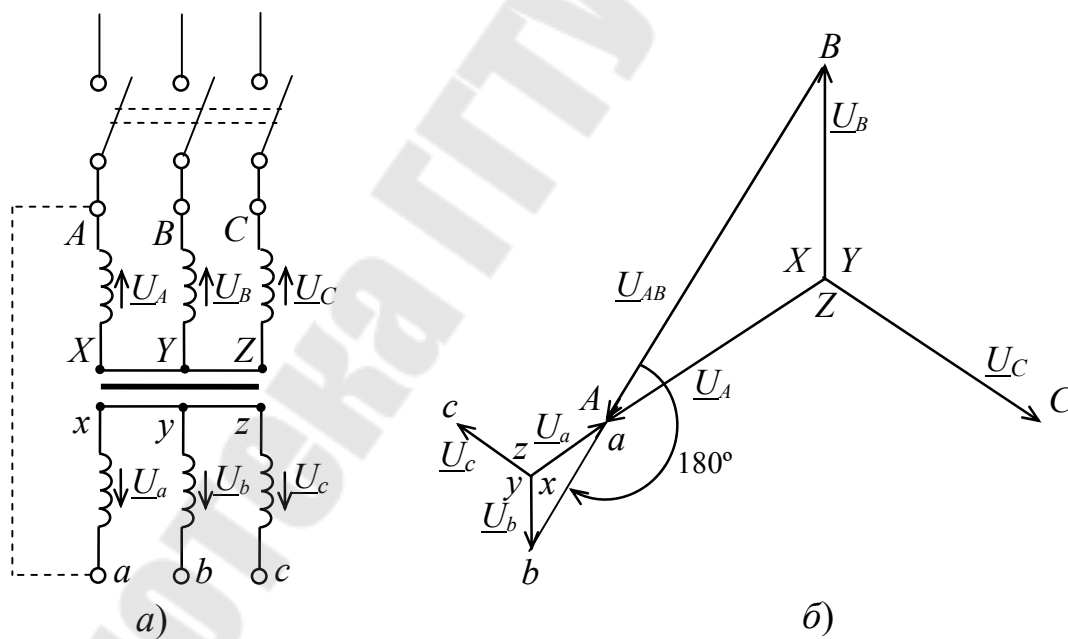


Рис. 14.2. Схема соединения (а) и потенциальная диаграмма для группы Y/Y-6 (б)

Схема соединения и потенциальная диаграмма для групп Y/Δ-11 приведена на рис. 14.3.

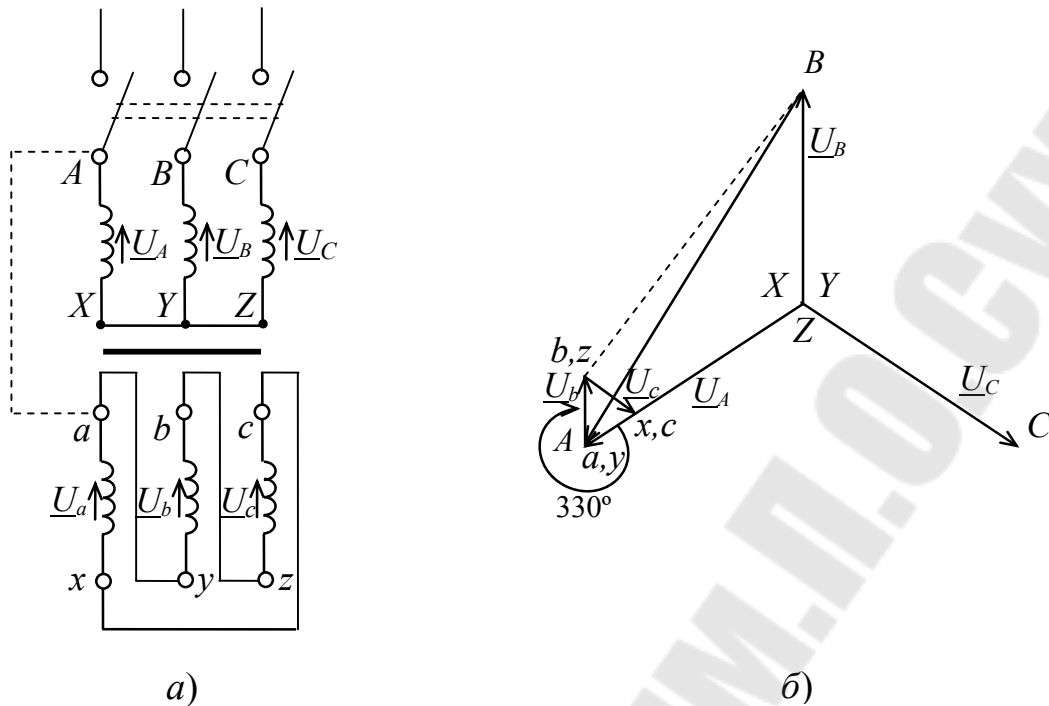


Рис. 14.3. Схема соединения (а) и потенциальная диаграмма (б) для группы Y/Δ-11

Для этой группы

$$U_{Bb} = U_{Cc} = U_{ab} \sqrt{1 - \sqrt{3}K_{\text{л}} + K_{\text{л}}^2}. \quad (14.5)$$

Поменяв местами начала и концы фазных обмоток НН, получим схему и диаграмму рис. 14.4 с группой Y/Δ-5 рис.14.4.

Для этой группы

$$U_{Bb} = U_{Cc} = U_{ab} \sqrt{1 + \sqrt{3}K_{\text{л}} + K_{\text{л}}^2}. \quad (14.6)$$

В трехфазных трансформаторах можно получить еще ряд групп соединения обмоток круговым перемещением выводов этих обмоток, т.е. перемаркировкой зажимов “а” на “с”, “b” на “а” и “с” на “b”. Это поворачивает векторы линейных напряжений обмотки НН на 120° по отношению к первоначальному положению.

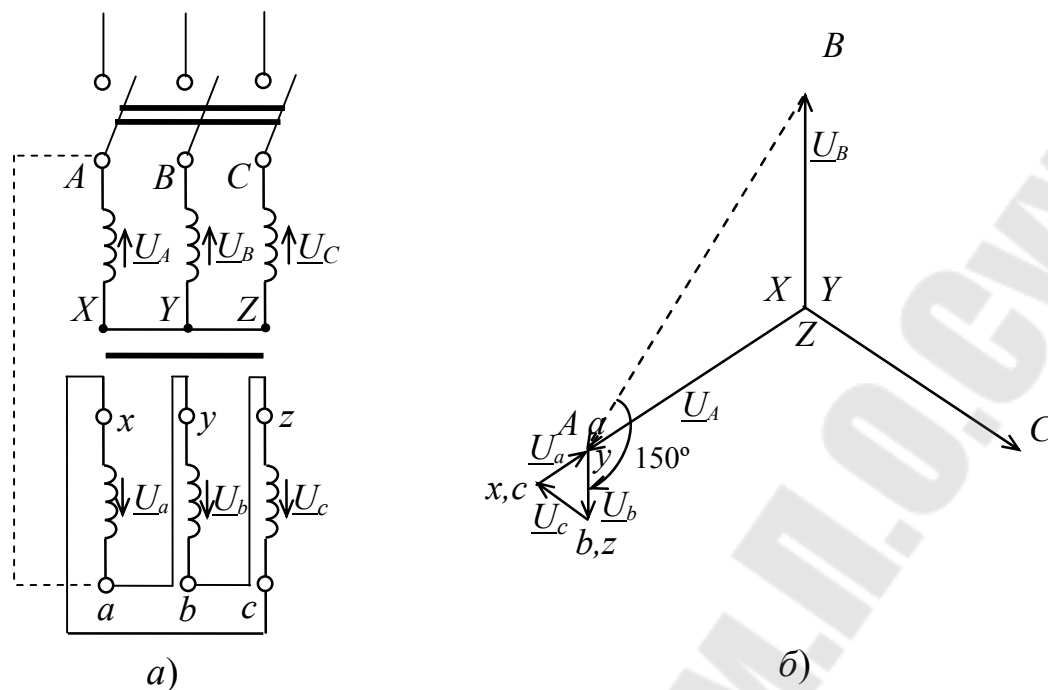


Рис. 14.4. Схема соединения (а) и потенциальная диаграмма (б) для группы Y/Δ-5

Не трудно убедиться, что при схемах соединения обмоток Y/Y и Δ/Δ возможны только четные группы, а при схеме Y/Δ - нечетные группы.

При отсутствии маркировки выводов обмоток трансформатора, ее выполняют при помощи вольтметра электромагнитной системы, собрав схему рис. 14.5а. Принадлежность пары выводов к одной фазной обмотке определяется по отклонению стрелки вольтметра

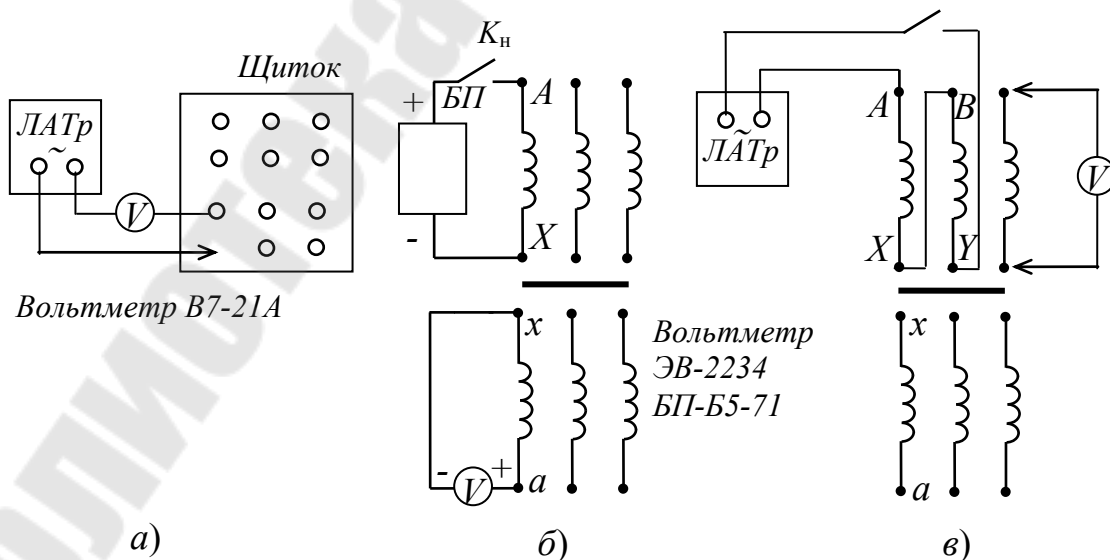


Рис. 14.5. Разметка выводов фазных обмоток

Если в цепь включена обмотка высшего напряжения, то отклонения стрелки вольтметра будет меньше, чем в случае включения обмотки низшего напряжения, вследствие разного по величине полного сопротивления этих обмоток ( $Z_1 > Z_2$ ).

подав далее от ЛАТРа переменное напряжение  $U \leq U_n$  на одну из обмоток ВН, измеряют вольтметром напряжения на трех фазах НН. При этом фазная обмотка НН с наибольшей ЭДС намотана на тот же стержень, что и включенная в цепь обмотка ВН, т.е. принадлежит к той же фазе трансформатора.

Для определения начал и концов каждой фазной обмотки (каждой фазы) трансформатора, одну из обмоток ВН размечают произвольно буквами А-Х и собирают цепь рис. 14.5б с использованием вольтметра магнитоэлектрической системы с нулем посередине шкалы, с указанием знаками “+” и “-” полярности его зажимов.

Если замыкание кнопки  $K_n$  вызывает отклонение стрелки вольтметра вправо от нулевой отметки, а при размыкании ее – влево, то зажим вольтметра “+” будет соединен с началом “а” фазной обмотки НН. При обратных отклонениях стрелки этот зажим вольтметра будет соединен с концом “х” этой же обмотки.

Далее выводы фазных обмоток ВН размечаются на переменном токе рис. 14.5в с применением вольтметра электромагнитной системы.

Если вольтметр при подаче напряжения от ЛАТРа покажет значительное напряжение, то обмотки А-Х и В-Х включены согласно, а если показание близко к нулю, включение этих обмоток – встречное. После этого обмотки В-У и С-З меняют местами и определяют начало и конец обмотки С-З. Далее аналогично размечают выводы b-у и с-z обмоток НН.

### **3. Задание, выполняемое при домашней подготовке**

3.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе [1] и разделу 1 данной работы изучите назначение, устройство и принцип действия трехфазных трансформаторов.

3.2. По разделу 1 данной работы освойте методику маркировки выводов фазных обмоток трехфазного трансформатора, а также методику определения группы соединения обмоток трансформатора на основе измерений  $U_{Bb}$ ,  $U_{Cc}$  и построения потенциальных (векторных) диаграмм для различных схем соединения его фазных обмоток.

3.3. Заготовить отчет по требованиям раздела 6.



#### 4. Лабораторное задание

4.1. Выполните маркировку выводов фазных обмоток трансформатора. Для этого:

4.1.1. Соберите цепь рис. 14.5а и подайте от ЛАТРа переменное напряжение  $U_{\sim} = 10\text{В}$  на один из 12 выводов на монтажном щитке трансформатора через вольтметр. При этом вторым проводом от ЛАТРа следует поочередно касаться остальных 11 выводов до момента отклонения стрелки вольтметра. Соответствующую пару выводов разметить (например, цифрами 1,1). Остальные пары выводов, принадлежащие одной обмотке, разметьте аналогично (2,2; 3,3; ... 6,6).

4.1.2. По величине угла отклонения стрелки вольтметра установите три обмотки ВН и три обмотки НН, разметив их (например,  $1,1^{\text{В}}$ ;  $2,2^{\text{Н}}$ ;  $3,3^{\text{Н}}$  и т.д.). Можно также воспользоваться омметром.

4.1.3. Подайте на одну из обмоток ВН (разметив ее выводы произвольно буквами “А” и “Х”) переменное напряжение  $U \leq U_{1\text{н}}$ , измерьте вольтметром ЭДС на каждой из трех обмоток НН. Обмотка с наибольшей ЭДС принадлежит той же фазе “ах”, что и обмотка “АХ” ВН.

4.1.4. Соберите цепь рис. 14.5б, в которой положительный полюс аккумуляторной батареи соедините с выводом А, а отрицательный – с выводом “Х”. При этом к выводам “а” и “х” обмотки НН присоедините вольтметр магнитоэлектрической системы с нулем посередине шкалы и, замыкая или размыкая цепь первичной обмотки “АХ”, определите начало и конец обмотки “ах” низкого напряжения. Разберите цепь рис. 14.5б.

4.1.5. Соберите цепь рис. 14.5в и установите начало и конец второй и третьей обмоток ВН по описанной в разделе 1 методике. Величину напряжения на выходе ЛАТРа установите равной  $0,5U_{1\text{ном}}$ .

4.1.6. Установите величину напряжения на выходе ЛАТРа равной  $0,5U_{2\text{ном}}$  и выполните разметку второй и третьей обмоток низкого напряжения, действуя аналогично.

4.2. Определите группу соединения фазных обмоток трехфазного трансформатора. Для этого:

4.2.1. Соедините первичные и вторичные фазные обмотки трехфазного трансформатора по рис. 14.1а, соединив между собой одноименные зажимы “А” и “а”.

4.2.2. После проверки схемы преподавателем или учебным мастером, подайте от трехфазного источника переменное напряжение величины  $U_{1\text{ном}}$  и измерьте вольтметром действующие значения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$

и  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ , и, определив линейный коэффициент трансформации  $K_{л} = U_{AB}/U_{ab}$ , вычислите по формулам (14.3), (14.4), (14.5), (14.6) напряжение  $U_{Bb}$  для различных групп соединения. Полученные величины занесите в таблицу 14.1.

Таблица 14.1

Группа	Угловой сдвиг $U_{ab}$ от $U_{AB}$ , град	Схема соединения	$U_{Bb}$ , В	$U_{Bb}$ , В
			рассчитано	измерено
12	0	Y/Y; $\Delta/\Delta$	$U_{ab}(K_{л} - 1) =$	
6	180	Y/Y; $\Delta/\Delta$	$U_{ab}(K_{л} + 1) =$	
11	330	Y/ $\Delta$ ; $\Delta/Y$	$U_{ab}\sqrt{1 - \sqrt{3}K_{л} + K_{л}^2} =$	
5	150	Y/ $\Delta$ ; $\Delta/Y$	$U_{ab}\sqrt{1 + \sqrt{3}K_{л} + K_{л}^2} =$	

4.2.3. С помощью вольтметра измерить на трансформаторе величину  $U_{Bb}$  и занести в соответствующую строку (столбца  $U_{Bb}$ , В, измерено) таблицы 4.1. Выключить питание.

4.2.4. Собрать схему рис. 14.2а, поменяв местами начала и концы фазных обмоток НН. Измерить величину  $U_{Bb}$  и занести в таблицу 14.1. Выключить питание.

4.2.5. Собрать схему рис. 14.3а и, после проверки ее преподавателем, включить питание, измерить  $U_{Bb}$  и занести результат в таблицу 14.1. Выключить питание.

4.2.6. Собрать схему рис. 14.4а, измерив  $U_{Bb}$  записать результат в табл. 14.1. Выключить питание установки. Разобрать схему и навести порядок на рабочем месте.

## 5. Контрольные вопросы

5.1. Как устроен стержневой трехфазный трансформатор?

5.2. Что называют фазным и линейным коэффициентами трансформации?

5.3. Как осуществляется маркировка выводов фазных обмоток трехфазного трансформатора?

5.4. Как соотносятся  $K_{ф}$  и  $K_{л}$  для соединений Y/Y и  $\Delta/\Delta$ ; Y/ $\Delta$ ;  $\Delta/Y$ ?

5.5. По каким схемам могут соединяться между собой фазные обмотки ВН трехфазного трансформатора (фазные обмотки НН)?

5.6. Что понимается под группой соединения обмоток трехфазного трансформатора и как она определяется?

5.7. Поясните методику построения потенциальной (векторной) диаграммы для различных групп соединения обмоток трехфазного трансформатора.

5.8. Когда необходимо знать (учитывать) группу соединения трехфазного трансформатора?

## 6. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- марку (тип) и паспортные данные испытуемого трансформатора;
- схемы рис.14.1а, рис.14.2а, рис. 14.3а, рис.14.4а;
- потенциальные диаграммы (по образцу рис. 14.1б, 14.2б, 14.3б, 14.4б), выполненные в масштабе по данным измерений  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  и  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ ;
- результаты расчетов и измерений;
- анализ результатов и выводы по цели работы.

**Лабораторная работа № 15**  
**Исследование трехфазного асинхронного двигателя**  
**с короткозамкнутым ротором: опыты холостого хода и короткого**  
**замыкания**

**1. Цели работы**

Изучить конструкцию трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и освоить приемы снятия его характеристик.

**2. Основные теоретические сведения**

*2.1. Общие положения*

Существует два метода получения данных для построения рабочих характеристик асинхронных двигателей: метод непосредственной нагрузки и косвенный метод. Метод непосредственной нагрузки заключается в опытном исследовании двигателя в диапазоне нагрузок от холостого хода до режима номинальной нагрузки с измерением необходимых параметров. Этот метод обычно применяется для двигателей мощностью не более 10-15 кВт.

С ростом мощности двигателя усложняется задача его нагрузки, растут непроизводительный расход электроэнергии и загрузка электросети. Применение этого метода ограничивается еще и тем, что не всегда представляется возможным создать испытательную установку по причине отсутствия требуемого оборудования и недопустимости перегрузки электросети.

Широкое применение получил более универсальный косвенный метод, применение которого не ограничивается мощностью двигателя. Этот метод заключается в выполнении двух экспериментов: опыта холостого хода и опыта короткого замыкания.

Опыты холостого хода и короткого замыкания асинхронных двигателей в основном аналогичны таким же опытам трансформаторов. Но они имеют и некоторые особенности, обусловленные главным образом наличием у двигателя вращающейся части - ротора. Кроме того, при переходе из режима холостого хода в режим короткого замыкания параметры обмоток двигателя (активные и индуктивные сопротивления) не остаются неизменными, что объясняется зубчатой поверхностью статора и ротора. Все это создает некоторые затруднения в проведении опытов и в последующей обработке их результатов.

## 2.2. Опыт холостого хода

Данный опыт даёт возможность изучить свойства магнитной цепи машины, определить возникающие при холостом ходе потери и чисто механические свойства асинхронного двигателя при питании от источника регулируемого напряжения номинальной частоты. Асинхронный двигатель потребляет мощность, которая расходуется в основном на покрытие потерь в стали и механических потерь.

Известно, что намагничивающий ток берётся из сети. Для получения характеристики холостого хода производят несколько измерений при  $n = const$ ,  $f = const$  и  $U_1 = var$ . Напряжение может снижаться до одной трети  $U_{ном}$  без нарушения устойчивой работы асинхронного двигателя. Дальнейшее снижение ведёт к некоторым затруднениям и в большинстве случаев не даёт интересных результатов. При проведении опытов следует всегда повышать напряжение сверх номинального, чтобы проследить за характером изменения потерь в стали и намагничивающей силы при увеличении магнитного потока.

Наиболее важной частью характеристики холостого хода является кривая насыщения, называемая также кривой намагничивания или кривой холостого хода. Она показывает зависимость между током намагничивания ( $I_0$ ) и Э.Д.С. ( $E_0$ ), при этом последняя почти всегда приравнивается к напряжению  $U_0$  на зажимах АД при холостом ходе, так как падением напряжения на внутреннем активном и индуктивном сопротивлениях за счёт малой величины тока холостого хода можно пренебречь. При  $\cos \varphi$  холостого хода в пределах от 0,01 до 0,15 намагничивающий ток будет равен току холостого хода, при этом ошибка не превышает 1%.

Для всех электрических машин с воздушным зазором кривая насыщения имеет характерную форму. Вначале, с увеличением тока возбуждения (тока холостого хода), напряжение растёт прямолинейно, затем рост его замедляется и практически приближается к предельному значению. В этом состоянии наступает насыщение. Так как для полного использования свойств стали ЭДС двигателя  $E_0$  и поток  $\Phi$  должны по возможности иметь высокие значения, а с другой стороны необходимо избегать слишком больших потерь энергии на возбуждение. Знание кривой намагничивания для оценки этого соотношения очень важно, особенно для новых образцов.

Для полной оценки асинхронного двигателя необходимо знание потерь холостого хода, то есть механических потерь ( $P_{мех}$ ) и потерь в

стали ( $P_{ст}$ ). Они определяются на холостом ходу мощностью ( $P_0$ ) за вычетом потерь в обмотке статора ( $P_{эл1}$ ). Так как ( $P_{эл1}$ ) очень малы, ввиду малости  $I_0$ , (незначительная доля по сравнению с  $P_{мех}$  и  $P_{ст}$ ) – ими пренебрегают, и потери холостого хода можно приравнять к ( $P_0$ ).

Питание асинхронного двигателя при опыте холостого хода (рис. 15.1) осуществляется через трехфазный регулятор напряжения (РНТ), позволяющий изменять напряжение в широких пределах. При этом вал двигателя должен быть свободным от механической нагрузки.

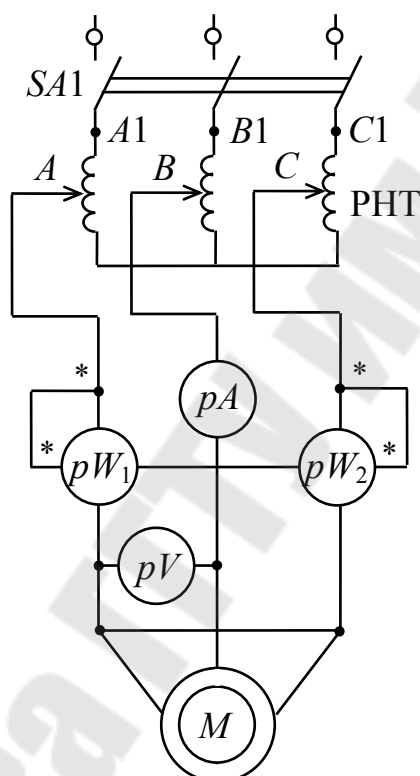


Рис. 15.1. Схема опытов холостого хода и короткого замыкания

Опыт начинают с напряжения питания  $U = 1,15 \cdot U_{ном}$ , затем постепенно понижают напряжение до  $U = 0,4 \cdot U_{ном}$  так, чтобы снять показания приборов в 5-7 точках. При этом один из замеров должен соответствовать номинальному напряжению  $U_{ном}$ .

Измеряют линейные значения напряжений и токов, а затем (в зависимости от схемы соединения обмотки статора) определяют фазные значения напряжения и тока холостого хода:

при соединении в звезду:

$$U_{\Phi} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} \quad \text{и} \quad I_{\Phi} = I_{л}, \quad (15.1)$$

при соединении в треугольник:

$$U_{\Phi} = U_{л} \text{ и } I_{\Phi} = \frac{I_{л}}{\sqrt{3}}. \quad (15.2)$$

Активная мощность  $P_0$  измеряется в опыте холостого хода ватт-метром и включает в себя электрические потери в обмотке статора:

$$P_{эл} = 3 \cdot r_1 \cdot I_{\Phi}^2, \text{ Вт.} \quad (15.3)$$

Здесь  $r_1$  - активное сопротивление фазы обмотки статора (Ом), измеренное непосредственно после отключения двигателя от сети, чтобы обмотка не успела охладиться.

магнитные потери в сердечнике статора  $P_{ст}$  и механические потери  $P_{мех}$  :

$$P_0 = P_{эл} + P_{ст} + P_{мех}, \text{ Вт.} \quad (15.4)$$

Сумма магнитных и механических потерь двигателя:

$$P_{ст} + P_{мех} = P_0 - P_{эл}, \text{ Вт.} \quad (15.5)$$

Коэффициент мощности для режима холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_{\Phi 0} \cdot I_{\Phi 0}}. \quad (15.6)$$

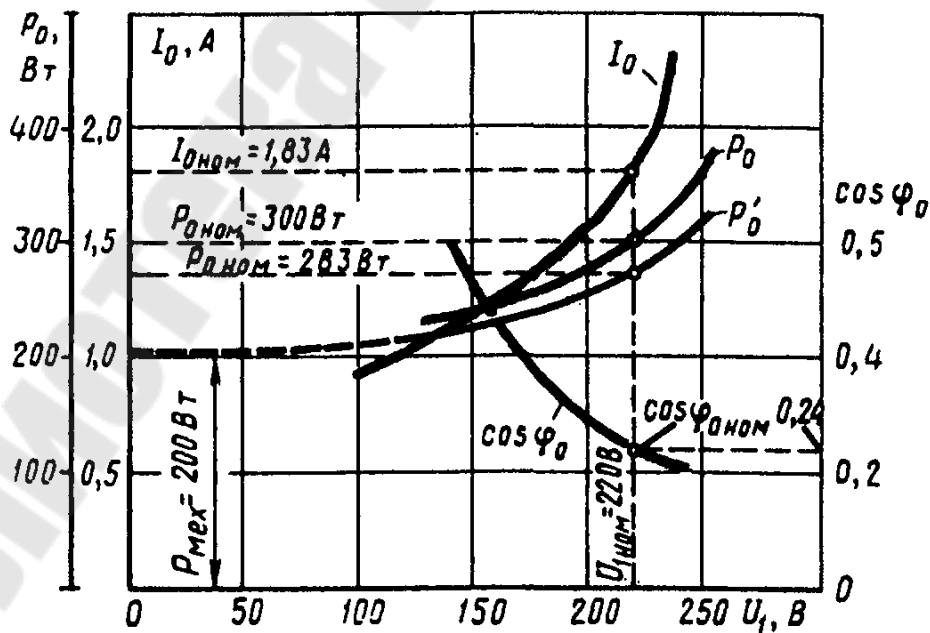


Рис. 15.2. Характеристики холостого хода трехфазного асинхронного двигателя (3,0 кВт, 220/380 В, 1430 об/мин)

По результатам измерений и вычислений строят характеристики холостого хода  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $\cos \varphi_0 = f(U_1)$ , на которых отмечают значения величин  $I_{0\text{ном}}$ ,  $P_{0\text{ном}}$ ,  $(P_{\text{ст}} + P_{\text{мех.ном}})$  и  $\cos \varphi_{\text{ном}}$ , соответствующих номинальному напряжению  $U_{1\text{ном}}$ .

Если график  $(P_{\text{ст}} + P_{\text{мех.ном}}) = f(U_1)$  продолжить до пересечения с осью ординат ( $U_1=0$ ), то получим величину потерь  $P_{\text{мех}}$ .

Это разделение магнитных и механических потерь основано на том, что при неизменной частоте сети  $f_1$  частота вращения ротора двигателя в режиме холостого хода  $n_0$ , а следовательно, и механические потери  $P_{\text{мех}}$  неизменны. В то же время магнитный поток  $\Phi$  прямо пропорционален ЭДС статора  $E_1$ .

Для режима холостого хода  $U_1 = E_1$ , а поэтому при  $U_1 = 0$  и магнитный поток  $\Phi=0$ , а, следовательно, и магнитные потери  $P_{\text{ст}} = 0$ . Определив величину механических потерь  $P_{\text{мех}}$ , можно вычислить магнитные потери  $P_{\text{ст}}$ :

$$P_{\text{ст}} = P_0 - P_{\text{мех}}, \text{ Вт.} \quad (15.7)$$

### 2.3. Опыт короткого замыкания

Опыт короткого замыкания проводится по такой же схеме, как и в опыте холостого хода (рис. 15.1), но при этом измерительные приборы должны быть выбраны в соответствии с пределами измерения тока, напряжения и мощности. Ротор двигателя следует жестко закрепить. Предельное значение тока статора при опыте короткого замыкания устанавливают исходя из допустимой токовой нагрузки питающей сети и возможности провести опыт в минимальный срок, чтобы не вызвать опасного перегрева двигателя.

Определив диапазон изменения тока статора при опыте короткого замыкания, опыт начинают с предельного значения этого тока, установив соответствующее напряжение короткого замыкания  $U_{\text{к}}$ . Затем постепенно снижают это напряжение до значения, при котором ток достигнет нижнего предела установленного диапазона его значений. При этом снимают показания приборов для 5-7 точек, одна из которых должна соответствовать номинальному току статора ( $I_{\text{к}} = I_{\text{ном}}$ ).

Продолжительность опыта должна быть минимально возможной. После снятия последних показаний приборов двигатель следует отключить и сразу же произвести замер активного сопротивления фа-



зы обмотки статора  $r_1$ , чтобы определить температуру обмотки. В зависимости от схемы соединения обмотки статора, линейные напряжения и токи пересчитывают на фазные  $U_K$  и  $I_K$  по формулам, аналогичным (15.1) и (15.2).

Активную мощность короткого замыкания  $P_K$  измеряют ваттметром. По полученным значениям напряжений  $U_K$ , токов  $I_K$  и мощностей  $P_K$  вычисляют следующие параметры:

коэффициент мощности при коротком замыкании:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{3 \cdot U_{\Phi K} \cdot I_{\Phi K}}; \quad (15.8)$$

полное сопротивление короткого замыкания:

$$Z_K = \frac{U_{\Phi K}}{I_{\Phi K}}, \text{ Ом}; \quad (15.9)$$

активные и индуктивные составляющие этого сопротивления:

$$x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}, \text{ Ом}. \quad (15.10)$$

При опыте короткого замыкания обмотки двигателя быстро нагреваются до рабочей температуры, так как при неподвижном роторе двигатель не вентилируется. Температуру обмотки статора  $T_1$  обычно определяют по сопротивлению фазы  $r_1'$ , измеренному непосредственно после проведения опыта, по формуле:

$$T_1 = \left( (r_1' - r_{1.20}) \left( \frac{255}{r_{1.20}} \right) \right) + 20, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (15.11)$$

где  $r_{1.20}$  - сопротивление фазы обмотки статора в холодном состоянии (обычно при температуре  $20^\circ\text{C}$ ), Ом.

Если же температура обмотки оказалась меньше расчетной рабочей температуры  $T_2$  для соответствующего класса нагревостойкости изоляции двигателя, то активное сопротивление короткого замыкания  $r_K$  пересчитывают на рабочую температуру:

$$r_{KT} = r_K' \cdot (1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)), \text{ Ом}; \quad (15.12)$$

где  $r'_k$  — активное сопротивление короткого замыкания при температуре  $T_1$ , отличающейся от расчетной рабочей;  $\alpha=0,004$ .

Затем пересчитывают на рабочую температуру параметры асинхронного двигателя:

полное сопротивление:

$$Z_{KT} = \sqrt{x_K^2 + r_{KT}^2}, \text{ Ом}; \quad (15.13)$$

ток короткого замыкания:

$$I_{KT} = \frac{U_K}{Z_{KT}}, \text{ А}; \quad (15.14)$$

мощность короткого замыкания:

$$P_{KT} = 3 \cdot r_{KT} \cdot I_{KT}^2, \text{ Вт}. \quad (15.15)$$

На характеристиках короткого замыкания (рис. 15.3) отмечают значения величин  $P_{Kном}$  и  $U_{Kном}$ , соответствующих току короткого замыкания  $I_K = I_{ном}$

Таблица 15.1

Обязательный отсчёт напряжения при опыте короткого замыкания

Номинальное фазное напряжение $U_{1ном}$ , В	127	220	380	500	3000	6000
Фазное напряжение короткого замыкания $U_{Kном}$ , В	33	58	100	130	800	1600

Опыт, проведённый при пониженном напряжении, относительно номинального, требует введения поправки на насыщение (ГОСТ7217-79). Эта поправка состоит в том, что выше наибольшего значения, при опыте короткого замыкания, ток предполагается возрастающим по касательной к кривой, изображающей его зависимость от напряжения.

Для определения  $U_{Kном}$  нужно построить график по данным табл. 15.1.

Ток и мощность короткого замыкания пересчитывают на номинальное напряжение  $U_{1ном}$  по формулам:

$$I_{II} = I_{1ном} \cdot \left( \frac{U_{1ном}}{U_{K.ном}} \right), \text{ А}; \quad (15.16)$$

$$P'_K = P_{K.ном} \cdot \left( \frac{U_{1ном}}{U_{K.ном}} \right)^2, \text{ Вт}. \quad (15.17)$$

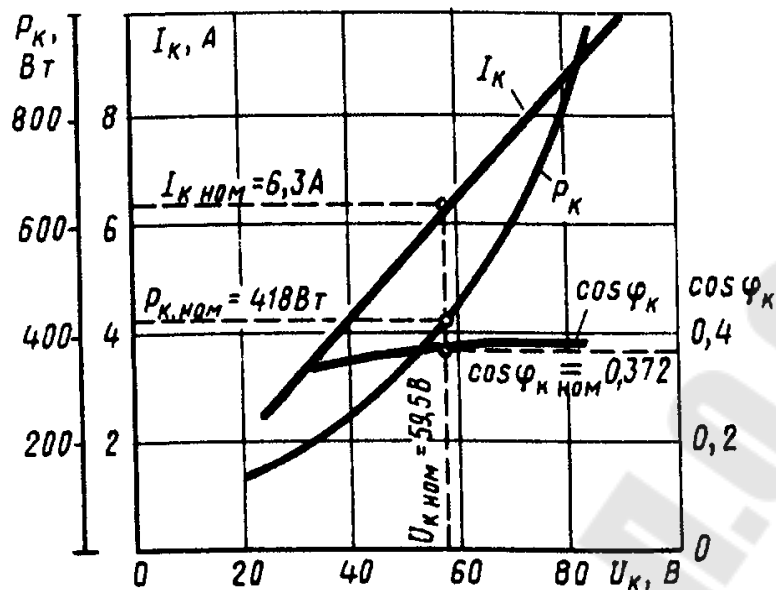


Рис. 15.3. Характеристики короткого замыкания трехфазного асинхронного двигателя (3,0 кВт, 220/380 В, 1430 об/мин)

Следует иметь в виду, что такой пересчет является приближенным, так как при  $U_K = U_{\text{ном}}$  наступает магнитное насыщение сердечника (особенно зубцовых слоев) статора и ротора. Это приводит к уменьшению индуктивного сопротивления  $X_K$ , что не учитывается формулами (15.16) и (15.17).

Кратность пускового тока равна:

$$K_I = \left( \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}} \right). \quad (15.18)$$

Электромагнитная мощность в режиме короткого замыкания, передаваемая на ротор двигателя, равна электрическим потерям в обмотке ротора  $P_{\text{э2к}}$ , поэтому электромагнитный момент при опыте короткого замыкания определяется по формуле:

$$M_{\text{п}} = \frac{30 \cdot P_{\text{э2к}}}{\pi \cdot n} = \frac{30 \cdot (P_{\text{к.ном}} - P_{\text{э1к}} - P_{\text{мк}})}{\pi \cdot n}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (15.19)$$

где электрические потери в обмотке статора при опыте короткого замыкания:

$$P_{\text{э1к}} = 3 \cdot r_K \cdot I_{\text{к.ном}}^2, \text{ Вт.} \quad (15.20)$$

Магнитные потери при опыте короткого замыкания  $P_{\text{стк}}$  приближенно определяют по характеристикам холостого хода при напряжении  $U_1 = U_K$ .

В режиме холостого хода магнитный поток  $\Phi$  больше, чем в режиме короткого замыкания, но если в режиме холостого хода магнитные потери происходят только в сердечнике статора, то в режиме короткого замыкания ( $s = 1$ ) магнитные потери происходят еще и в сердечнике ротора, так как  $f_2 = f_1$ .

Характеристика короткого замыкания воспроизводит начальные пусковые условия асинхронного двигателя и потому позволяет определить – начальный пусковой ток и начальный пусковой момент.

Начальный пусковой момент получают пересчетом момента  $M_{\Pi}$  при начальном пусковом токе  $I_{\Pi}$ :

$$M_{\Pi} = M_{\Pi} \cdot \left(\frac{I_{\Pi}}{I_K}\right)^2, \text{ Н}\cdot\text{м} . \quad (15.21)$$

Затем определяют кратность пускового момента:

$$K_M = \left(\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{НОМ}}}\right) . \quad (15.22)$$

### 3. Лабораторное задание

- 3.1. Записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.
- 3.2. Ознакомиться со схемой и порядком включения стенда.
- 3.3. Снять характеристики холостого хода. Определить потери холостого хода.
- 3.4. Снять характеристики короткого замыкания при заторможенном роторе. Определить потери короткого замыкания. Определить кратность пускового тока и пускового момента асинхронного двигателя.

### 4. Порядок выполнения работы

#### 4.1. Опыт холостого хода

Для исследования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (машина М) собрать схему, представленную на рис. 15.1.

4.1.1. Ознакомиться с двигателем, записать его номинальные данные.

4.1.2. Измерить сопротивление обмотки статора постоянному току методом вольтметра и амперметра по схеме рис. 15.5

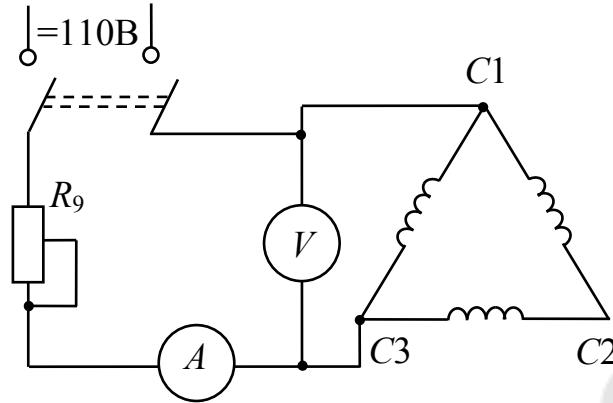


Рис. 15.4. Схема измерения сопротивления обмотки статора постоянному току

4.1.3. Собрать схему рис. 15.2 для проведения опыта холостого хода. Выполнить опыт холостого хода. Результаты измерений занести в табл.

Таблица 15.2

	Измерено				Вычислено		
	$I_0$	$U_1$	$P_a$	$P_c$	$P_0$	$S_0$	$\cos \varphi_0$
1							
2							
3							
4							

Построить зависимости  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $\cos \varphi_0 = f(U_1)$  (примерный вид на рис. 15.5).

4.1.4. Выполнить опыт короткого замыкания. Для этого в схеме опыта холостого хода измерительные приборы нужно заменить с учетом тех величин токов и напряжений, которые имеют место при коротком замыкании. Результаты измерений занести в табл. 15.3.

Таблица 15.3

	Измерено				Вычислено		
	$I_k$	$U_{1k}$	$P_a$	$P_c$	$P_k$	$S_k$	$\cos \varphi_k$
1							
2							
3							
4							

По данным опыта построить зависимости  $I_k$ ,  $P_k$ ,  $\cos \varphi_k = f(U_{1k})$  (примерный вид на рис. 15.6).

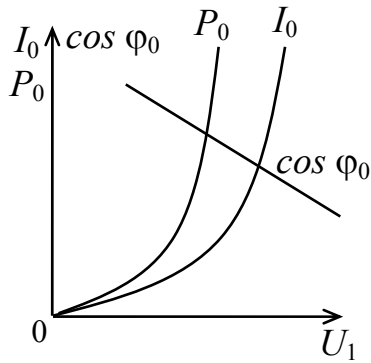


Рис. 15.5. Характеристики холостого хода

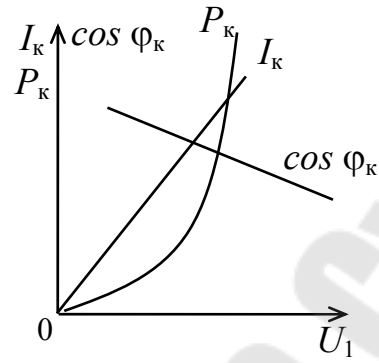


Рис. 15.6. Характеристики короткого замыкания

## 5. Контрольные вопросы

- 5.1. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
- 5.2. Принцип действия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
- 5.3. Что такое скольжение и каким оно обычно бывает у асинхронного двигателя общего применения?
- 5.4. С какой целью у асинхронного двигателя обычно делают шесть выводов обмотки статора?
- 5.5. Почему относительная величина тока холостого хода у асинхронного двигателя больше, чем у трансформатора такой же мощности?
- 5.6. Как изменится электромагнитный момент асинхронного двигателя, если питающее напряжение уменьшить в 3 раза?
- 5.7. Почему без нагрузки асинхронный двигатель работает с малыми значениями КПД и коэффициента мощности?
- 5.8. Какие виды потерь имеют место в асинхронном двигателе?
- 5.9. Почему магнитные потери в сердечнике ротора не учитывают?
- 5.10. На какие виды потерь влияет величина воздушного зазора и толщина пластин сердечника статора?
- 5.11. Почему график  $I_1 = f(P_2)$  не выходит из начала координат?
- 5.12. С какой целью делают опыт холостого хода?
- 5.13. С какой целью делают опыт короткого замыкания?
- 5.14. Почему ток холостого хода асинхронного двигателя значительно больше, чем у трансформатора?

## Лабораторная работа № 16

### Исследование трехфазного синхронного генератора

#### 1. Цели работы

- изучить устройство синхронного генератора и приобрести практические навыки в сборке схем и снятии характеристик,
- получить экспериментальное подтверждение его свойств теоретическим сведениям.

#### 2. Основные теоретические сведения

##### 2.1 Общие положения

Синхронные машины - это машины переменного тока. По своему устройству они отличаются от асинхронных машин лишь конструкцией ротора, который может быть явнополюсным или неявнополюсным. Что же касается свойств, то синхронные машины отличаются от асинхронных синхронной скоростью вращения ротора ( $n_2 = n_1 = const$ ) при любой нагрузке, а также возможностью регулирования коэффициента мощности.

Синхронные машины обратимы и могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Синхронные генераторы составляют основу электротехнического оборудования электростанций, т. е. практически вся электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами. Единичная мощность современных синхронных генераторов достигает миллиона киловатт и более. В крупных электроэнергетических установках синхронные машины иногда используются в качестве компенсаторов - генераторов реактивной мощности, позволяющих повысить коэффициент мощности всей установки.

Синхронная машина состоит из неподвижной части - статора - и вращающейся части - ротора. Статоры синхронных машин в принципе не отличаются от статоров асинхронных двигателей, т. е. состоят из корпуса, сердечника и обмотки.

Конструктивное исполнение статора синхронной машины может быть различным в зависимости от назначения и габаритов машины. Так, в многополюсных машинах большой мощности при наружном диаметре сердечника статора более 900 мм пластины сердечника делают из отдельных сегментов, которые при сборке образуют цилиндр сердечника статора. Корпуса статоров крупногабаритных машин делают разъемными, что необходимо для удобства транспортировки и монтажа этих машин.

Роторы синхронных машин могут иметь две принципиальные различающиеся конструкции: явнополюсную и неявнополюсную.

В энергетических установках по производству электроэнергии переменного тока в качестве первичных (приводных) двигателей синхронных генераторов применяют в основном три вида двигателей: паровые турбины, гидравлические турбины либо двигатели внутреннего сгорания (дизели). Применение любого из перечисленных двигателей принципиально влияет на конструкцию синхронного генератора.

Если приводным двигателем является гидравлическая турбина, то синхронный генератор называют гидрогенератором. Гидравлическая турбина обычно развивает небольшую частоту вращения (60-500 об/мин), поэтому для получения переменного тока промышленной частоты (50 Гц) в гидрогенераторе применяют ротор с большим числом полюсов. Ротор гидрогенератора имеет явнополюсную конструкцию, т. е. с явно выраженными полюсами, при которой каждый полюс выполняют в виде отдельного узла, состоящего из сердечника, полюсного наконечника и полюсной катушки. Все полюсы ротора закреплены на обode, являющемся также и ярмом магнитной системы машины в котором замыкаются потоки полюсов. Гидрогенераторы обычно изготавливаются с вертикальным расположением вала.

Паровая турбина работает при большой скорости вращения, поэтому приводимый ею во вращение генератор, называемый турбогенератором, является быстроходной синхронной машиной. Ротор этих генераторов выполняют либо двухполюсным ( $n_1 = 3000$  об/мин), либо четырехполюсным ( $n_1 = 1500$  об/мин).

В процессе работы турбогенератора на его ротор действуют значительные центробежные силы. Поэтому по условиям механической прочности в турбогенераторах применяют неявнополюсный ротор, имеющий вид удлиненного стального цилиндра с профрезерованными на поверхности продольными пазами для обмотки возбуждения. Сердечник неявнополюсного ротора изготавливают в виде цельной стальной поковки вместе с хвостовиками (концами вала) или же делают сборным. Обмотка возбуждения неявнополюсного ротора занимает лишь две трети его поверхности (по периметру). Оставшаяся поверхность образует полюсы. Для защиты лобовых частей обмотки ротора от разрушения действием центробежных сил ротор с двух сторон прикрывают стальными бандажными кольцами (каппами), изготавливаемыми обычно из немагнитной стали.



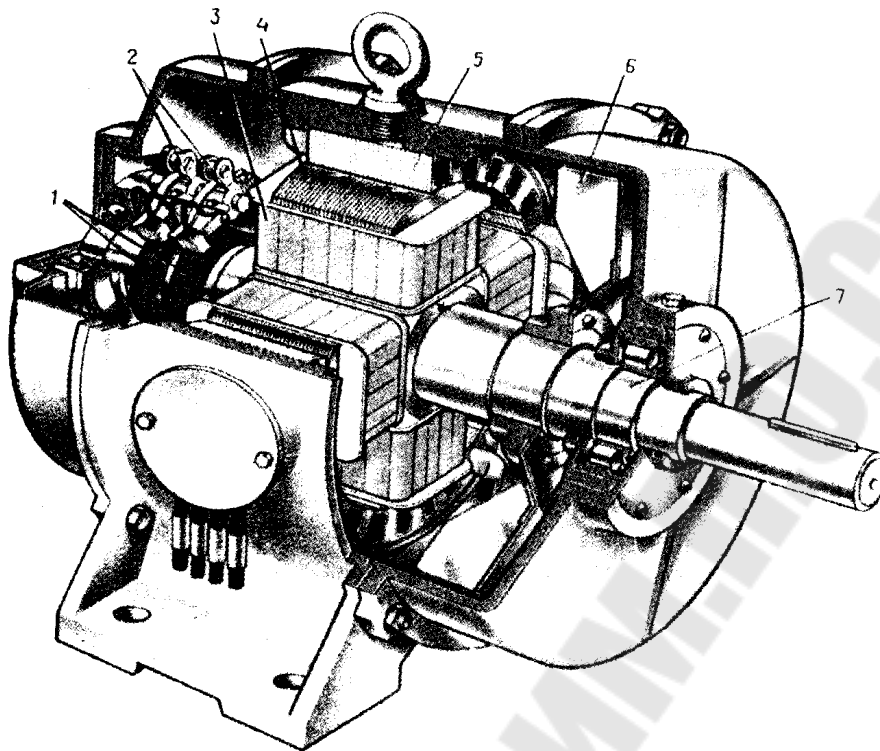


Рис. 16.1. Синхронный генератор

1 - контактные кольца, 2 - щеткодержатели, 3 - полюсная катушка ротора, 4 - полюсный наконечник, 5 - сердечник статора, 6 - вентилятор, 7 - вал

Турбогенераторы и дизель - генераторы изготавливают с горизонтальным расположением вала. Дизель - генераторы рассчитывают на частоту вращения 600-1500 об/мин и выполняют с явнополюсным ротором. Сердечник статора, запрессованный в стальной корпус, состоит из пакетов-сегментов, собранных из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Для лучшего охлаждения двигателя пакеты разделены радиальными вентиляционными каналами шириной по 10 мм. Обмотка статора двухслойная с укороченным шагом.

Сердечники полюсов ротора крепятся к корпусу шпильками. Обмотка ротора состоит из полюсных катушек. Контактные кольца крепятся на конце вала. На роторе имеются лопатки центробежного вентилятора. Подшипники скольжения установлены на подшипниковых полушитах. Генератор с торцовых сторон прикрыт стальными щитами. В обшивке корпуса имеются вентиляционные окна, прикрытые жалюзи. На боковой поверхности корпуса расположена коробка выводов.

Между наружной поверхностью полюсного наконечника и внутренней поверхностью сердечника статора имеется воздушный за-

зор. По оси полюса этот зазор минимален, а на краях — максимален. Такая конфигурация полюсного наконечника необходима для синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре.

Основным способом возбуждения синхронных машин является электромагнитное возбуждение.

В современных синхронных генераторах получила применение бесконтактная система электромагнитного возбуждения, при которой синхронный генератор не имеет контактных колец на роторе.

В качестве возбудителя и в этом случае применяют генератор переменного тока, у которого обмотка, в которой наводится ЭДС (обмотка якоря), расположена на роторе, а обмотка возбуждения расположена на статоре. В результате обмотка якоря возбудителя и обмотка возбуждения синхронной машины оказываются вращающимися и их электрическое соединение осуществляется непосредственно, без контактных колец и щеток. Но так как возбудитель является генератором переменного тока, а обмотку возбуждения необходимо питать постоянным током, то на выходе обмотки якоря возбудителя включают полупроводниковый преобразователь, закрепленный на валу синхронной машины и вращающийся вместе с обмоткой возбуждения синхронной машины и обмоткой якоря возбудителя. Питание постоянным током обмотки возбуждения возбудителя осуществляется от подвозбудителя - генератора постоянного тока.

Отсутствие скользящих контактов в цепи возбуждения синхронной машины позволяет повысить ее эксплуатационную надежность и увеличить КПД.

В синхронных генераторах, в том числе гидрогенераторах, получил распространение принцип самовозбуждения, когда энергия переменного тока, необходимая для возбуждения, отбирается от обмотки статора синхронного генератора и через понижающий трансформатор и выпрямительный полупроводниковый преобразователь преобразуется в энергию постоянного тока. Принцип самовозбуждения основан на том, что первоначальное возбуждение генератора происходит за счет остаточного магнетизма магнитопровода машины.

В современных синхронных двигателях для возбуждения применяют тиристорные возбудительные устройства, включаемые в сеть переменного тока и осуществляющие автоматическое управление током возбуждения во всевозможных режимах работы двигателя, в том числе и переходных. Такой способ возбуждения является наиболее надежным и экономичным, так как КПД тиристорных возбудительных устройств выше, чем у генераторов постоянного тока. Промыш-

ленностью выпускаются тиристорные возбудительные устройства на различные напряжения возбуждения.

В синхронных машинах малой мощности находит применение принцип возбуждения постоянными магнитами, когда на роторе машины располагаются постоянные магниты. Такой способ возбуждения дает возможность избавиться машину от обмотки возбуждения. В результате конструкция машины упрощается, становится более экономичной и надежной. Однако из-за дефицитности материалов для изготовления постоянных магнитов с большим запасом магнитной энергии и сложности их обработки применение возбуждения постоянными магнитами ограничивается лишь машинами мощностью не более нескольких киловатт.

## 2.2. Характеристики синхронного генератора

Основными характеристиками синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку, являются характеристики: холостого хода, короткого замыкания, внешняя, регулировочная и нагрузочная.

### 2.2.1. Характеристика холостого хода синхронного генератора

Характеристику холостого хода снимают при постоянной номинальной скорости вращения ротора в функции тока возбуждения  $E = U = f(I_f)$  (рис. 16.2). При изменении тока возбуждения от нуля, ЭДС и поток сначала изменяются по линейному закону, а затем, при близких к номинальным значениям тока возбуждения и ЭДС, из-за насыщения магнитной цепи характеристика холостого хода отклоняется от линейного закона. При больших насыщениях характеристика холостого хода снова становится линейной.

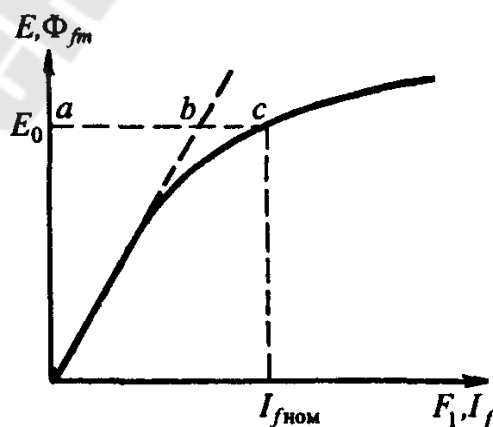


Рис. 16.2 . Характеристика холостого хода

По характеристике холостого хода определяют коэффициент насыщения:

$$K_H = \frac{ac}{ab}. \quad (16.1)$$

Отрезок  $bc$  определяет МДС, приходящуюся на стальные участки магнитной системы. Если машина ненасыщенная, то характеристика холостого хода линейная. Чтобы обеспечить лучшее использование материалов, при проектировании рабочая точка выбирается на изгибе характеристики холостого хода (точка  $c$ ) на рис. 16.2.

При исследовании характеристики холостого хода сначала при увеличении тока возбуждения строят восходящую ветвь, а затем при уменьшении — нисходящую. При расчетах используется средняя кривая.

Гистерезис в синхронных машинах имеет место из-за того, что ротор не перемагничивается и по его сердечнику замыкается постоянный поток возбуждения.

### 2.2.2. Характеристика короткого замыкания синхронного генератора

Одной из важных характеристик синхронного генератора является характеристика короткого замыкания — зависимость тока статора от тока возбуждения  $I_k = f(I_f)$  при симметричном коротком замыкании на выводах статора при номинальной скорости вращения ротора.

Зависимость тока короткого замыкания в обмотке статора от тока возбуждения снимается при постепенном повышении тока возбуждения. Ток статора изменяется от нуля до значения  $1,25I_{ном}$ . Эта зависимость линейная, так как генератор не насыщен.

Индуктивный характер тока при коротком замыкании определяется индуктивным сопротивлением обмотки статора, которое значительно больше активного сопротивления обмотки (в относительных единицах  $R=0,01-0,001$ , а  $X=1,0-2,5$ ).

Ток короткого замыкания может быть определен как

$$I_k = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + X^2}}, \text{ А}, \quad (16.2)$$

где  $E_0$  - ЭДС, соответствующая току возбуждения  $I_{f0}$ , которая определяется по характеристике холостого хода.

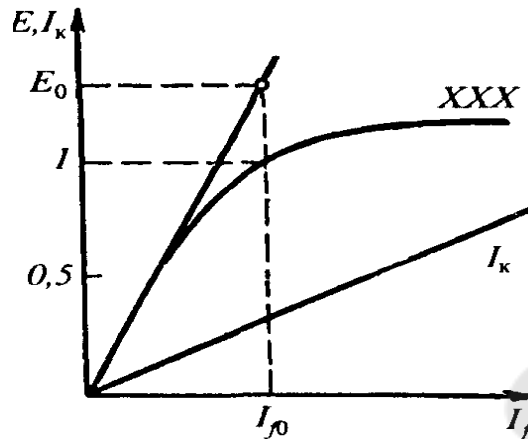


Рис. 16.3. Характеристики холостого хода и короткого замыкания

Пренебрегая активным сопротивлением, ток короткого замыкания можно считать чисто индуктивным

$$I_k = \frac{E_0}{X}, \text{ А.} \quad (16.3)$$

Таким образом, по характеристике холостого хода и характеристике короткого замыкания можно определить опытным путем значение индуктивного сопротивления обмотки статора  $X$ :

$$X = \frac{E_0}{I_k}. \quad (16.4)$$

Характеристики холостого хода и короткого замыкания дают возможность определить значения токов возбуждения двух составляющих: одна компенсирует падения напряжения в цепи статора  $I_{вх}$ , а другая компенсирует размагничивающее влияние реакции статора  $I_{вд}$ .

Отношение короткого замыкания, так же, как и индуктивное сопротивление обмотки статора  $X$  определяет перегрузочную способность синхронной машины. Чем больше  $K_{окз}$ , тем больше предельная нагрузка.  $K_{окз}$  тем больше, чем больше воздушный зазор, т.е. при той же мощности меньше концентрация энергии магнитного поля. Такие машины требуют больших вложений материалов, что увеличивает их стоимость. У турбогенераторов  $K_{окз} = 0,4-1,0$ , а гидрогенераторов  $K_{окз} = 0,8-1,8$ .

$$K_{окз} = \frac{U_{ном}}{X \cdot I_{ном}} = \frac{1}{X}. \quad (16.5)$$

Отношение короткого замыкания имеет большое практическое значение при оценке свойств синхронной машины. Машины с малым

$K_{\text{окз}}$  менее устойчивы при параллельной работе с сетью и имеют значительные колебания напряжения при изменениях нагрузки. Но такие машины имеют меньшие габариты и, следовательно, дешевле, чем машины с большим  $K_{\text{окз}}$ .

### 2.2.3. Внешние характеристики синхронного генератора

Внешними характеристиками синхронного генератора называются зависимости  $U = f(I_a)$  при  $n = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = \text{const}$ , снятые при неизменном токе возбуждения  $I_f = \text{const}$ .

На рис. 16.4 показаны внешние характеристики синхронного генератора в относительных единицах при активной ( $R$ ), индуктивной ( $L$ ) и емкостной ( $C$ ) нагрузках.

При увеличении тока активной нагрузки  $I_a$  напряжение на выходе генератора уменьшается вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении машины  $z_a = r_a + jx_{\sigma a}$ , и влияния поперечной реакции статора.

При индуктивной нагрузке за счет более сильного размагничивающего действия продольной реакции статора внешняя характеристика идет ниже внешней характеристики при активной нагрузке.

При емкостной нагрузке реакция статора подмагничивающая, поэтому с ростом нагрузки растет напряжение на выводах генератора.

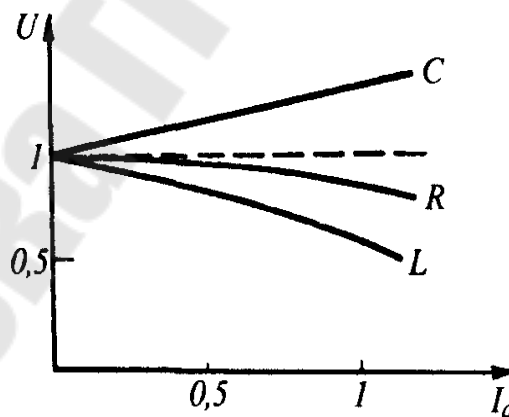


Рис. 16.4. Внешние характеристики синхронного генератора при разных видах нагрузки

В процентном отношении внутреннее сопротивление машины по отношению к сопротивлению нагрузки обычно составляет небольшое значение, поэтому можно реакцию статора при активной нагрузке считать без учета индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора. В машинах небольшой мощности поперечная реакция

статора (чисто активный ток) будет при наличии в нагрузке небольшой емкости, компенсирующей индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора машины.

Номинальным изменением напряжения синхронного генератора  $\Delta U_{\text{НОМ}}$  называется изменение напряжения при изменении нагрузки от нуля до номинальной при неизменном токе возбуждения.

Номинальное изменение напряжения определяется по формуле:

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \frac{E_0 - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100, \% \quad (16.6)$$

#### 2.2.4. Регулировочная характеристика синхронного генератора

Регулировочная характеристика - это зависимость тока возбуждения от тока статора  $I_f = f(I_a)$  при постоянном напряжении  $U = \text{const}$ , постоянной скорости вращения  $n = \text{const}$  и неизменном  $\cos \varphi$  нагрузки.

Регулировочные характеристики показывают, как нужно изменять ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение на выводах генератора оставалось постоянным (рис.16.5).

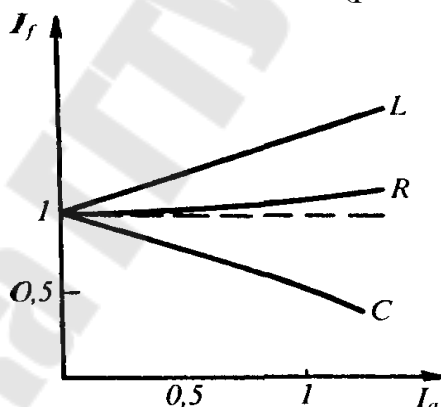


Рис. 16.5. Регулировочные характеристики синхронного генератора при разных видах нагрузки

Регулировочные характеристики могут быть построены, если известны внешние характеристики. При увеличении нагрузки при индуктивной нагрузке напряжение уменьшается. Чтобы напряжение оставалось неизменным, надо увеличивать ток возбуждения. При емкостной нагрузке при увеличении тока в статоре машины напряжение на выводах генератора растет. Чтобы оно оставалось неизменным, надо уменьшать ток возбуждения.

Так же, как и внешние характеристики, регулировочные характеристики при небольших нагрузках линейны. При нагрузках, близ-

ких к номинальному значению, из-за насыщения регулировочные характеристики становятся нелинейными.

При работе синхронного генератора на емкостную нагрузку магнитное поле в машине создается током возбуждения и реактивными токами, протекающими в статоре. При небольших зазорах в синхронной машине, работающей на емкостную нагрузку, может наступить самовозбуждение, когда при отключенной обмотке возбуждения ( $I_f = 0$ ) на выводах генератора появится напряжение. Это явление называется самовозбуждением синхронной машины.

### 3. Лабораторное задание

3.1. Записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.

3.2. Ознакомиться со схемой рис. 16.6 и порядком включения стенда.

3.3. Снять и построить характеристику холостого хода синхронного генератора. Определить коэффициент насыщения при номинальном значении тока возбуждения.

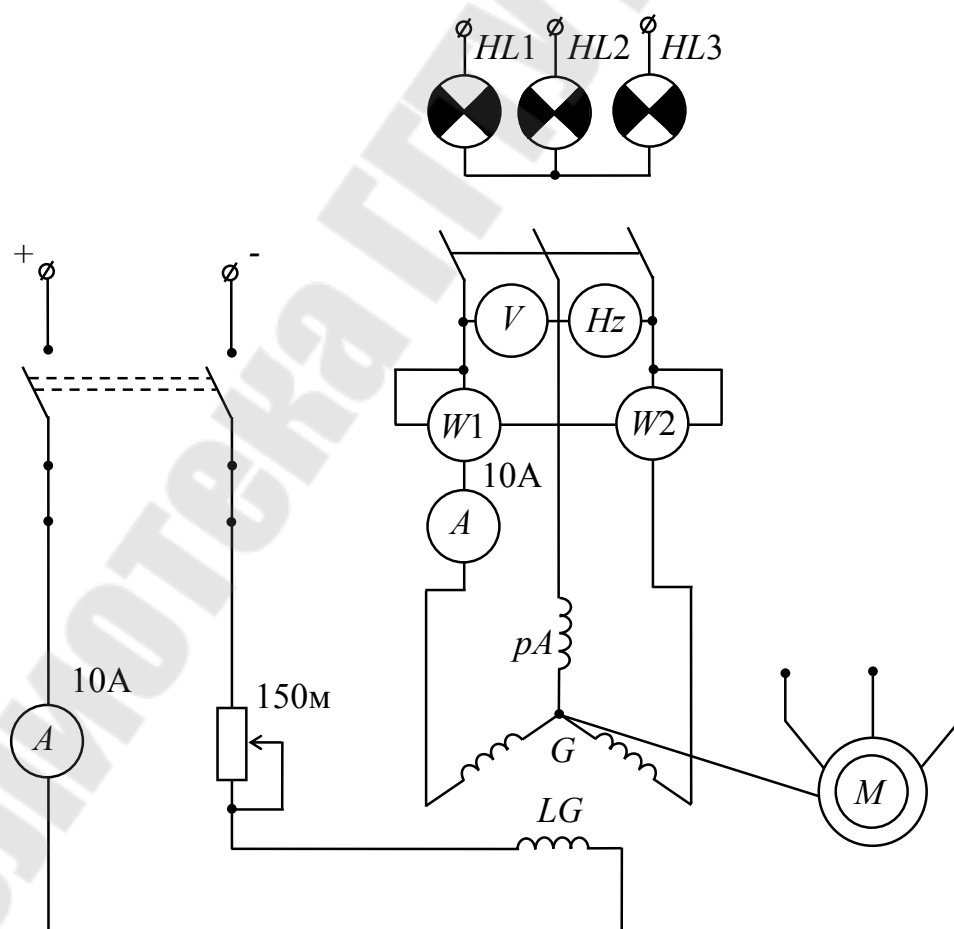


Рис. 16.6. Схема испытания синхронного генератора



3.4. Снять и построить характеристику короткого замыкания синхронного генератора. По характеристике холостого хода и характеристике короткого замыкания определить опытным путем значение  $E_0$  и рассчитать значение индуктивного сопротивления обмотки статора  $X$ .

3.5. Снять и построить внешние характеристики синхронного генератора. Определить номинальное изменение напряжения синхронного генератора.

3.6. Снять и построить регулировочные характеристики синхронного генератора.

3.7. Сделать обработку полученных данных. Провести анализ результатов лабораторной работы и составить подробный отчет.

#### 4. Порядок выполнения работы

##### 4.1. Опыт холостого хода синхронного генератора

4.1.1. Ознакомиться с установкой и записать данные машины, аппаратов и приборов. Собрать схему рис. 16.6.

4.1.2. Проверить вольтметром симметричность напряжений обмотки якоря на холостом ходу.

4.1.3. Снять характеристику холостого хода генератора и сравнить ее с нормальной. Дать заключение о степени насыщения магнитной системы машины. Данные занести в табл. 16.1.

Таблица 16.1

Данные опыта холостого хода

№	Намагничивание				Размагничивание			
	$I_B, A$	$E_0, B$	$I_B^*$	$E_0^*$	$I_B, A$	$E_0, B$	$I_B^*$	$E_0^*$
1								
2								
3								
4								
5								

4.1.4. Снять внешние характеристики генератора  $U_1 f(I_1)$  при  $f = const$ ,  $I_B = const$  и а)  $\cos \varphi = 1$ , б)  $\cos \varphi = 0,8$ . Данные занести в табл. 16.2.

Таблица 16.2

## Данные опыта внешних характеристик

№	Активная			Индуктивная			Емкостная		
	$I_1, A$	$U, B$	$P_2, Вт$	$I_1, A$	$U, B$	$P_2, Вт$	$I_1, A$	$U, B$	$P_2, Вт$
1									
2									
3									
4									
5									

4.1.5. Снять характеристики короткого замыкания генератора  $I_{1к} = f(I_B)$  при  $U_1 = 0$   $f = const$ . Найти соотношения между токами двухфазного и трехфазного коротких замыканий. Данные занести в табл. 16.3.

Таблица 16.3

## Данные опыта короткого замыкания

№	$I_B, A$	$I_{1к}, A$	$I_B^*$	$I_{1к}^*$
1				
2				
3				
4				
5				

4.1.6. Снять регулировочные характеристики. Данные занести в табл. 16.4.

Таблица 16.4

## Данные опыта регулировочных характеристик

№	Активная		Индуктивная		Емкостная	
	$I_1, A$	$I_B, A$	$I_1, A$	$I_B, A$	$I_1, A$	$I_B, A$
1						
2						
3						
4						

Снятые показания приборов при увеличении тока возбуждения (при намагничивании), соответствуют восходящей ветви характеристики холостого хода, а при уменьшении тока возбуждения (при размагничивании) - нисходящей ветви.

Характеристика холостого хода представляет собой зависимость ЭДС генератора в режиме холостого хода  $E_0$  от тока возбуждения  $I_{\text{в}}$  при номинальной скорости вращения  $n_2 = n_1$ .

Характеристику холостого хода принято строить в относительных единицах:

$$E_0^* = f(I_{\text{в}}^*) , \quad (16.7)$$

где  $E_0^* = \frac{E_0}{U_{\text{ном}}}$  ,  $I_{\text{в}}^* = \frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{в.ном}}}$ .

За характеристику холостого хода принимают среднюю линию, проведенную между восходящей и нисходящей ветвями характеристики.

**ВНИМАНИЕ!** При снятии данных восходящей ветви характеристики холостого хода необходимо, чтобы изменение тока возбуждения происходило только в направлении нарастания, при снятии данных нисходящей ветви — только в направлении убывания. Для сравнения характеристики холостого хода, полученной опытным путем, с нормальной характеристикой холостого хода синхронной машины следует строить обе характеристики в одних координатных осях.

## 5. Контрольные вопросы

- 5.1. Объясните принцип действия синхронного генератора.
- 5.2. Что такое нормальная характеристика холостого хода? Что она характеризует?
- 5.3. Почему характеристика короткого замыкания синхронного генератора прямолинейна?
- 5.4. Что такое ОКЗ? Какова его величина?
- 5.5. Почему при индуктивном характере нагрузки напряжение генератора с увеличением нагрузки уменьшается, а при емкостном характере — увеличивается?
- 5.6. Какое число полюсов имеет синхронная машина, если  $f_1 = 50$  Гц, а  $n_1 = 100$  об/мин?
- 5.7. Какие существуют способы возбуждения синхронных машин?
- 5.8. Объясните устройство явнополюсных и неявнополюсных роторов.
- 5.9. Объясните устройство синхронного генератора.
- 5.10. Почему характеристика короткого замыкания синхронной машины имеет вид прямой линии?

## Литература

1. Тиличенко, М.П., Грачев, С.А. “Электротехника, электрические машины и аппараты”: Учебное пособие для студентов металлургических и машиностроительных специальностей/ М.П. Тиличенко, С.А. Грачев. - Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2009.- 342 с.
2. Сборник задач по электротехнике и основам электроники: Учебное пособие /под ред. Г.Г. Рекус, А.И. Белоусова. – М.: Высшая школа, 1991.- 416с.
3. Сборник задач по электротехнике и основам электроники: Учебное пособие /под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1987.- 288с.

## Содержание

Лабораторная работа №13. Переходные процессы в линейных электрических цепях .....	3
Лабораторная работа №14. Трехфазные трансформаторы .....	19
Лабораторная работа №15. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: опыты холостого хода и короткого замыкания.....	28
Лабораторная работа №16. Исследование трехфазного синхронного генератора.....	39
Литература .....	52

**Тиличенко Михаил Павлович  
Вершинин Андрей Николаевич**

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ**

**Лабораторный практикум  
по одноименному курсу для студентов  
неэлектротехнических специальностей  
дневной и заочной форм обучения  
В трех частях  
Часть 3**

Подписано в печать 27.01.11.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 2,84.

Изд. № 68.

E-mail: [ic@gstu.by](mailto:ic@gstu.by)

<http://www.gstu.by>

Отпечатано на цифровом дуплекаторе  
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.

Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого».

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.