

## ЧАСТЬ I ДВИЖЕНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

### Глава 1

#### Параметры и характеристики синхронного генератора

##### § 1.1. Статические характеристики синхронного генератора; параметры и векторные диаграммы

Любую многополюсную синхронную машину можно привести к двухполюсной модели (рис. 1.1) с двумя осями симметрии: осью  $d$ , расположенной вдоль полюсов (продольная ось ротора), и перпендикулярной ей осью  $q$  (поперечная ось ротора)\*. В теории синхронной машины с целью упрощения теоретических исследований и практических расчетов к этим осям симметрии принято относить все электрические параметры машины. Процессы рассматриваются относительно одной фазы обмотки статора, так как благодаря симметричному расположению фаз относительно друг друга изменение напряжений, токов в обмотках имеет одинаковый характер, но со сдвигом во времени вследствие вращения ротора. Кроме того, принимается, что машина работает без насыщения магнитной цепи.

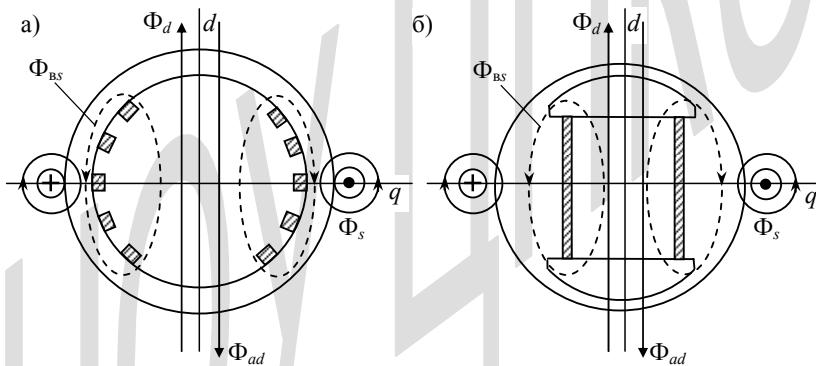


Рис. 1.1. Двухполюсная модель синхронного генератора:  
а – неявнополюсного; б – явнополюсного

\* Blondel A. Compliments a la theorie des alternateurs a deux reactans. Revue gene'rale de e'Electricite, v. 12, 1922.

При холостом ходе генератора ток возбуждения создает магнитный поток, основная часть которого  $\Phi_d$  пронизывает воздушный зазор, пересекает обмотку статора и наводит в ней ЭДС холостого хода  $E_q$ . По общему правилу для индуктивности вектор этой ЭДС отстает от вектора магнитного потока  $\Phi_d$ , ее создавшего, на угол  $90$  эл. град. (рис. 1.2). У нагруженного генератора ток  $I$  обмотки статора может быть разложен на две составляющие: продольную  $I_d$  и поперечную  $I_q$ . Эти составляющие создают магнитные потоки продольной  $\Phi_{ad}$  и поперечной  $\Phi_{aq}$  реакции якоря (статора), векторы которых вращаются синхронно с ротором и действуют на основной поток машины – один по продольной оси, а другой – по поперечной. В результате в воздушном зазоре генератора будет существовать магнитный поток  $\Phi_i$ . Потоки реакции якоря наводят в обмотке статора соответственно ЭДС продольной  $E_{ad}$  и поперечной  $E_{aq}$  реакции якоря, которые, взаимодействуя с ЭДС холостого хода  $E_q$ , создают так называемую внутреннюю ЭДС генератора  $E_i$ , соответствующую магнитному потоку в воздушном зазоре  $\Phi_i$ .

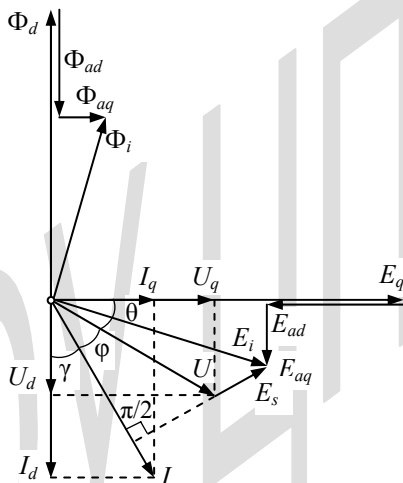


Рис. 1.2. Векторная диаграмма магнитных потоков и ЭДС явнополюсного синхронного генератора

Помимо потока  $\Phi_d$  и потоков реакции  $\Phi_{ad}$ ,  $\Phi_{aq}$ , пронизывающих воздушный зазор и сцепленных как с обмоткой статора, так и с обмоткой возбуждения, существуют еще магнитные потоки рассеяния обмоток статора и ротора, сцепленные каждый только со своей обмоткой.

Поток рассеяния обмотки возбуждения  $\Phi_{\text{вс}}$  не пронизывает обмотку статора и поэтому не наводит в ней ЭДС. Поток рассеяния обмотки статора  $\Phi_s$  наводит в ней ЭДС рассеяния  $E_s$ , вычитая которую геометрически из внутренней ЭДС машины определяют напряжение на зажимах обмотки статора  $U$ . Электродвижущая сила рассеяния статора может быть представлена как падение напряжения на индуктивном сопротивлении:  $E_s = x_s I$ , где  $x_s$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора генератора. Как падения напряжения могут быть представлены и ЭДС реакции якоря:  $E_{ad} = x_{ad} I$  и  $E_{aq} = x_{aq} I$ , где  $x_{ad}$ ,  $x_{aq}$  – индуктивные сопротивления реакции якоря по продольной и поперечной осям, соответственно.

У явнополюсного генератора сопротивление  $x_{ad}$  в 1,5–2 раза больше сопротивления  $x_{aq}$ , так как поток реакции по продольной оси встречает на своем пути значительно меньшее сопротивление воздушного зазора, чем поток по поперечной оси (см. рис. 1.1). Неравенство индуктивных сопротивлений реакции якоря и приводит к необходимости разложения тока генератора на продольную и поперечную составляющие.

У неявнополюсного генератора эти сопротивления равны ( $x_{ad} = x_{aq}$ ), так как поток реакции проходит через воздушный зазор, практически одинаковый по продольной и поперечной осям машины.

Полные падения напряжения на индуктивных сопротивлениях по продольной и поперечной осям явнополюсного генератора могут быть представлены соответственно произведениями  $x_d I_d$  и  $x_q I_q$ , где  $x_d = x_s + x_{ad}$  – синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси;  $x_q = x_s + x_{aq}$  – синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси. Помимо падения напряжения на индуктивных сопротивлениях машины имеет место падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора, которое в соответствии с разложением тока на составляющие также может быть представлено произведениями  $r_a I_d$  и  $r_a I_q$ .

Реактивные сопротивления синхронной машины носят название «операторные сопротивления» потому, что машина в статическом режиме описывается математическими зависимостями, в которые входят реактивные сопротивления, отражающие статический режим. В переходном процессе, например при коротком замыкании, машина описывается математическими зависимостями, которые включают в себя параметры, изменяющиеся во времени: в начальный период переходный

процесс, называемый сверхпереходным процессом, определяется сверхпереходными реактивными сопротивлениями; по окончании сверхпереходного процесса, собственно переходный процесс, отражается переходными реактивными сопротивлениями и, наконец, после окончания переходного процесса машина имеет синхронные реактивные сопротивления установившегося режима.

В паспортных данных синхронной машины (генератора, компенсатора, электродвигателя) приводятся следующие параметры, выраженные или в процентах, или в относительных единицах\*:  $x_d$ ,  $x_q$  – синхронные реактивности в продольной и поперечной осях;  $x'_d$ ,  $x'_q$  – переходные реактивности в продольной и поперечной осях ( $x'_q = x_q$ );  $x''_d$ ,  $x''_q$  – сверхпереходные реактивности в продольной и поперечной осях;  $x_2$ ,  $x_0$  – реактивности обратной и нулевой последовательностей;  $r_a$ ,  $r_b$  – активное сопротивление фаз статора и омическое сопротивление обмотки возбуждения;  $r_{rd}$ ,  $r_{rq}$  – активное сопротивление продольного и поперечного демпферных контуров.

В соответствии с наименованиями реактивностей обозначаются ЭДС машины также в относительных единицах:  $E_q$ ,  $E'_q$ ,  $E''_q$  – синхронная, переходная и сверхпереходная ЭДС в поперечной оси, соответственно;  $E'$ ,  $E''$  – переходная и сверхпереходная ЭДС, соответственно.

При построении векторных диаграмм синхронных машин используются вышеуказанные параметры. Векторная диаграмма неявнополюсного генератора (Ben–Eschenburg'a) и векторная диаграмма явнополюсного генератора (Blondel'a) приведены на рис. 1.3.

Из векторных диаграмм видно, что если при изменении тока и коэффициента мощности нагрузки напряжение генератора должно поддерживаться постоянным, то соответствующим образом нужно изменять ЭДС за синхронным индуктивным сопротивлением  $E_q$ , т. е. ток возбуждения машины, чтобы компенсировать все падения напряжения по продольной и поперечной осям машины. Необходимое изменение возбуждения определяется регулировочными характеристиками генератора. Регулировочные и любые другие статические характеристики могут быть построены не только опытным путем, но и по параметрам генератора при помощи зависимостей, вытекающих из его векторной диаграммы.

\* Размерность величин и параметров, выраженных в относительных единицах, сокращенно обозначается о. е.; величины в абсолютных единицах оговариваются особо.

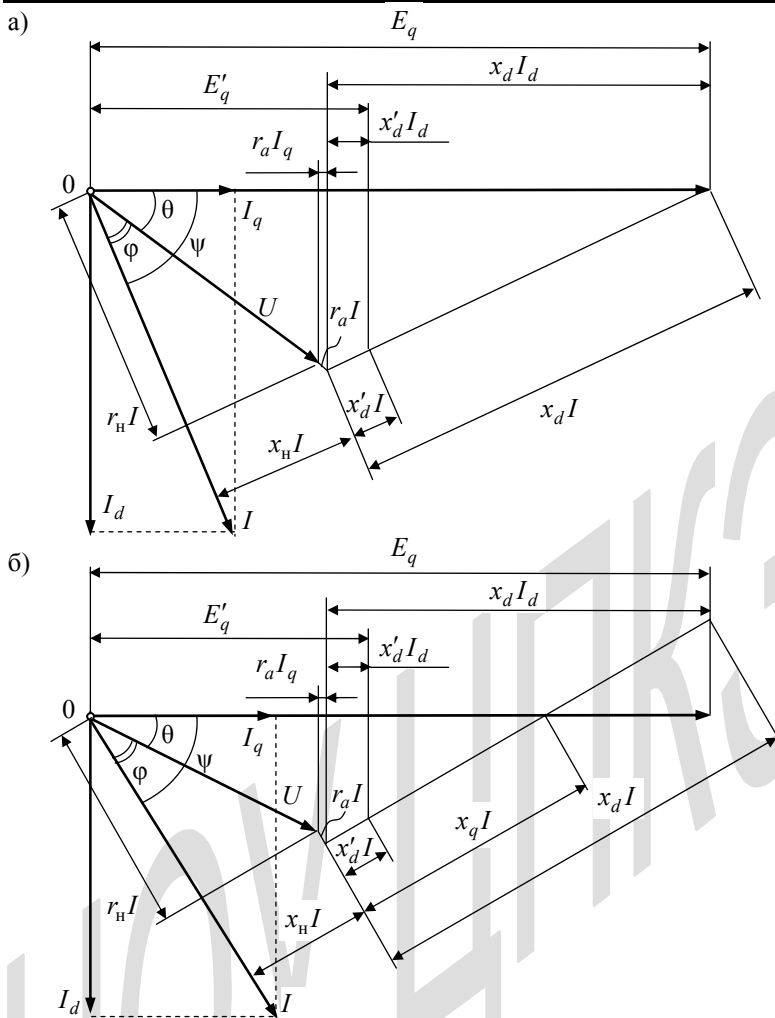


Рис. 1.3. Векторные диаграммы:

а – неявнополюсного генератора; б – явнополюсного генератора

Из векторной диаграммы явнополюсной машины следует

$$E_q = U \cos \theta + x_d I_d + r_a I_q;$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{x_q \cos \varphi - r_a \sin \varphi}{z_h + r_a \cos \varphi + x_q \sin \varphi}. \quad (1.1)$$

Имеем также  $I_d = I \sin(\theta + \varphi)$ ,  $I_q = I \cos(\theta + \varphi)$ . Подставляя эти соотношения в первое равенство (1.1), учитывая, что  $I = \frac{U}{z_H}$ ,

$\cos \varphi = \frac{r_H}{z_H}$ ,  $\sin \varphi = \frac{x_H}{z_H}$  и используя выражения

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}} \quad \text{и} \quad \sin \theta = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}},$$

получаем

$$E_q = \frac{U}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}} \left( 1 + \frac{1}{z_H^2} [x_d (r_H \operatorname{tg} \theta + x_H) + r_a (r_H + x_H \operatorname{tg} \theta)] \right).$$

Это выражение после подстановки в него второго равенства (1.1) и преобразований позволяет найти зависимость напряжения явноплюсного генератора от величины и вида нагрузки при данной величине возбуждения

$$U = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2} E_q = \xi E_q. \quad (1.2)$$

Аналогично выводится формула для неявноплюсного генератора

$$U = \frac{z_H}{\sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}} E_q = \zeta E_q. \quad (1.3)$$

В этих формулах  $x_{dH} = x_d + x_H$ ,  $x_{qH} = x_q + x_H$ ,  $r_{aH} = r_a + r_H$ .

Коэффициенты

$$\xi = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2}, \quad \zeta = \frac{z_H}{\sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}} \quad (1.4)$$

могут быть названы коэффициентами ЭДС за синхронным продольным сопротивлением, соответственно, явноплюсного и неявноплюсного генераторов.

Незначительной величиной активного сопротивления обмотки статора в расчетах регулировочных характеристик можно пренебречь, и тогда при условии сохранения на шинах генератора номинального напряжения ( $U = 1$ ) изменение тока возбуждения  $i_b$  (или напряжения возбуждения  $U_b$ ) при изменении нагрузки определится для явноплюсного и неявноплюсного генераторов соответственно формулами

$$E_q = \frac{x_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2}{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}} = i_b, \quad E_q = \frac{\sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}}{z_H} = i_b. \quad (1.5)$$

Задаваясь относительными значениями тока нагрузки  $I_n = 1; 0,8; 0,7; \dots$  и вычисляя  $z_n$ , можно по этим формулам построить регулировочные характеристики для различных значений коэффициента мощности нагрузки.

Для получения точных значений тока возбуждения (или напряжения возбуждения) следует учесть насыщение стали машины, т. е. ту часть тока возбуждения генератора, которая необходима для «преодоления» насыщения стали  $i_{в.нас}$ , чтобы напряжение на зажимах генератора было номинальным.

На рис. 1.4 величина  $i_{в0}$  представляет собой значение тока возбуждения на холостом ходу машины, определенное по спрямленной характеристике холостого хода, т. е. эта величина непосредственно вычисляется из (1.5). Действительное значение тока возбуждения больше на величину  $i_{в.нас}$  и равно  $i_{в0д}$ . Для нагруженной машины эта поправка, учитывающая насыщение генератора при номинальном напряжении, сохраняется. Действительно, если следуя Р. Рюденбергу [9], провести через точку номинального напряжения характеристики холостого хода луч нагрузки ЛН<sub>1</sub>, то на оси абсцисс этот луч отметит ту величину тока возбуждения, которая необходима для поддержания номинального напряжения генератора при этой нагрузке. Естественно, для этой же величины нагрузки, характеризуемой углом наклона  $\alpha$ , луч нагрузки ЛН<sub>2</sub>, проведенный через точку номинального напряжения на спрямленной характеристике холостого хода, будет проходить параллельно предыдущему лучу и, следовательно, на оси абсцисс отметит ток возбуждения  $i_{вн}$  меньше действительного  $i_{внд}$  на величину  $i_{в.нас}$ .

Таким образом, к значениям тока возбуждения, вычисленным по формулам (1.5), следует прибавлять поправку на насыщение стали машины, определяемую из характеристики холостого хода, как указано на рис. 1.4. Отметим, что при расчетах, связанных с напряжением выше номинального значения, эта поправка увеличивается, а при напряжениях меньше номинального поправка уменьшается и в точке  $a$  становится равной нулю. Ордината точки  $a$  может иметь величину, соответствующую  $0,9-0,65 U_{ном}$  номинального значения напряжения, и поправка на насыщение стали может лежать в пределах  $0,02-0,22$ . Поэтому в ряде случаев насыщением стали машины можно пренебречь.

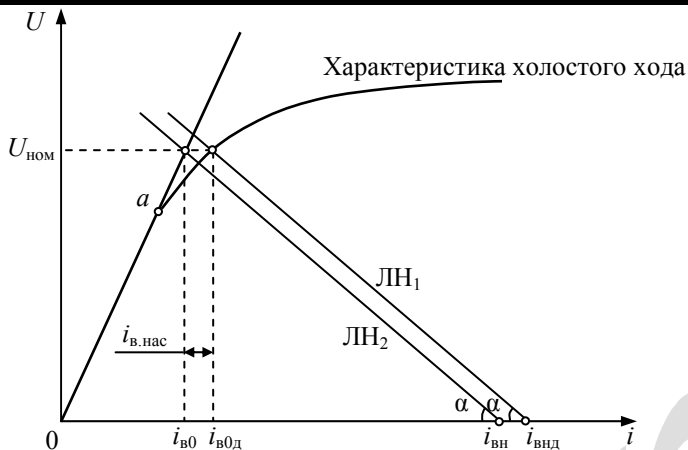


Рис. 1.4. Характеристика намагничивания стали синхронного генератора

Заметим, что зависимости (1.2)–(1.5) позволяют оценить влияние на режим генератора не только индуктивной нагрузки, но и емкостной. В этом случае величины реактивностей будут иметь значения  $x_{дн} = x_d - x_n$ ,  $x_{qn} = x_q - x_n$ . Влияние насыщения стали машины при емкостной нагрузке учитывается также при помощи кривой намагничивания.

Синхронные ЭДС для генераторов могут быть получены из векторных диаграмм (в пренебрежении активным сопротивлением  $r_a$ ), с выражением их через величины активной и реактивной мощности.

Соответственно, для неявнополюсной и явнополюсной машины

$$\left. \begin{aligned} E_q &= \frac{1}{U} \sqrt{(U^2 + x_d Q)^2 + (x_d P)^2}; \\ E_q &= \frac{1}{U} \frac{(U^2 + x_q Q)^2 + (x_q P)^2 + (x_d - x_q)(x_q + x_n) S^2}{\sqrt{(U^2 + x_q Q)^2 + (x_q P)^2}}. \end{aligned} \right\} (1.5, a)$$

Величина тока статора генератора может быть вычислена по выведенным формулам:

для явнополюсного генератора ток установившегося режима из (1.2) равен

$$I = \frac{U}{z_n} = \frac{\xi E_q}{z_n} = \frac{E_q}{z_{qn}}; \quad (1.6)$$



для неявнополюсного генератора из (1.3) получаем

$$I = \frac{\zeta E_q}{z_{\text{н}}} = \frac{E_q}{z_{\text{дн}}}. \quad (1.7)$$

Здесь символами полных сопротивлений обозначено – см. (1.4)

$$z_{\text{qn}} = \frac{x_{\text{дн}}x_{\text{qn}} + r_{\text{ан}}^2}{\sqrt{x_{\text{qn}}^2 + r_{\text{ан}}^2}}; \quad z_{\text{дн}} = \sqrt{x_{\text{дн}}^2 + r_{\text{ан}}^2}. \quad (1.8)$$

В общем случае связь между напряжением генератора, его ЭДС и нагрузкой может быть представлена в комплексной форме

$$\bar{U} = \bar{E}_q - \bar{I} \bar{z}_{\Gamma},$$

где  $\bar{z}_{\Gamma}$  – комплексное сопротивление генератора.

При установившемся коротком замыкании  $\bar{U} = 0$ , и ток в этом режиме равен

$$\bar{I}_{\text{к}} = \frac{\bar{E}_q}{\bar{z}_{\Gamma\text{к}}}. \quad (1.9)$$

Отсюда комплекс сопротивления

$$\bar{z}_{\Gamma\text{к}} = \frac{\bar{E}_q}{\bar{I}_{\text{к}}} = \frac{\bar{E}_q e^{j\varphi_E}}{\bar{I}_{\text{к}} e^{j\varphi_I}} = z_{\Gamma\text{к}} e^{j\varphi_Z},$$

где  $\varphi_Z = \varphi_E - \varphi_I$  – аргумент комплекса сопротивления.

Из сопоставления выражений (1.6), (1.7) и (1.9) следует, что величины  $z_{\text{qn}}$ ,  $z_{\text{дн}}$  можно считать модулями соответствующих комплексов полных сопротивлений.

Комплекс сопротивления для установившегося режима будет иметь вид:

для явнополюсного генератора

$$\bar{z}_{\text{qn}} = z_{\text{qn}} e^{j\varphi_{\text{qn}}} = \frac{x_{\text{дн}}x_{\text{qn}} + r_{\text{ан}}^2}{\sqrt{x_{\text{qn}}^2 + r_{\text{ан}}^2}} e^{j\varphi_{\text{qn}}}; \quad (1.10)$$

для неявнополюсного генератора

$$\bar{z}_{\text{дн}} = z_{\text{дн}} e^{j\varphi_{\text{дн}}} = \sqrt{x_{\text{дн}}^2 + r_{\text{ан}}^2} e^{j\varphi_{\text{дн}}}. \quad (1.11)$$

Аргументы комплексов сопротивлений могут быть найдены из векторных диаграмм генераторов, где они определяют положение вектора тока относительно вектора ЭДС.

Из диаграмм следует

$$\varphi_{\text{qn}} = \arctg \frac{x_{\text{qn}}}{r_{\text{ан}}}; \quad \varphi_{\text{дн}} = \arctg \frac{x_{\text{дн}}}{r_{\text{ан}}}. \quad (1.12)$$

Располагая значениями аргумента и модуля комплексного числа, легко найти его вещественную и мнимую части. Активная и реактивная составляющие комплекса полных сопротивлений определяются выражениями:

для явнополюсного генератора

$$\bar{z}_{qH} = z_{qH} (\cos \varphi_{qH} + j \sin \varphi_{qH}) = r_{яH} + jx_{яH}; \quad (1.13)$$

для неявнополюсного генератора

$$\bar{z}_{dH} = z_{dH} (\cos \varphi_{dH} + j \sin \varphi_{dH}) = r_{нH} + jx_{нH}. \quad (1.14)$$

При установившемся коротком замыкании на выводах генератора, когда  $x_H = 0$ ,  $r_H = 0$ , комплекс полного сопротивления определяется из формул (1.10), (1.11):

для явнополюсного генератора

$$\bar{z}_{qK} = \frac{x_d x_q + r_a^2}{\sqrt{x_q^2 + r_a^2}} e^{j\varphi_{qK}}; \quad (1.10, a)$$

для неявнополюсного генератора

$$\bar{z}_{dK} = \sqrt{x_d^2 + r_a^2} e^{j\varphi_{dK}}. \quad (1.11, a)$$

Аргументы этих комплексных чисел определяются по формулам (1.12) при  $x_H = 0$ ,  $r_H = 0$

$$\varphi_{qK} = \arctg \frac{x_q}{r_a}; \quad \varphi_{dK} = \arctg \frac{x_d}{r_a}. \quad (1.12, a)$$

При исследовании колебаний роторов синхронных генераторов, включенных на параллельную работу, необходимо знать угловую характеристику каждой машины, причем эту характеристику необходимо знать: для случая включения генератора на шины электростанции не только через индуктивное сопротивление, как обычно принимается при исследованиях статической и динамической устойчивости синхронной машины, но и для общего случая включения через активно-индуктивное сопротивление, характеризуемое составляющими  $r_d$  и  $x_d$ . Искомая характеристика синхронной машины может быть определена из векторной диаграммы.

Векторная диаграмма для явнополюсного генератора, в общем случае включенного на напряжение сети  $U_c$  через активно-индуктивное сопротивление электропередачи, представлена на рис. 1.5.

Величина мощности, выдаваемая генератором в энергосистему, равна

$$\begin{aligned} P &= U_c I \cos \varphi = U_c I \cos (\psi - \theta) = U_c I \cos \psi \cos \theta + U_c I \sin \psi \sin \theta = \\ &= U_c \cos \theta I \cos \psi + U_c \sin \theta I \sin \psi = U_c \cos \theta I_q + U_c \sin \theta I_d. \end{aligned} \quad (1.15)$$

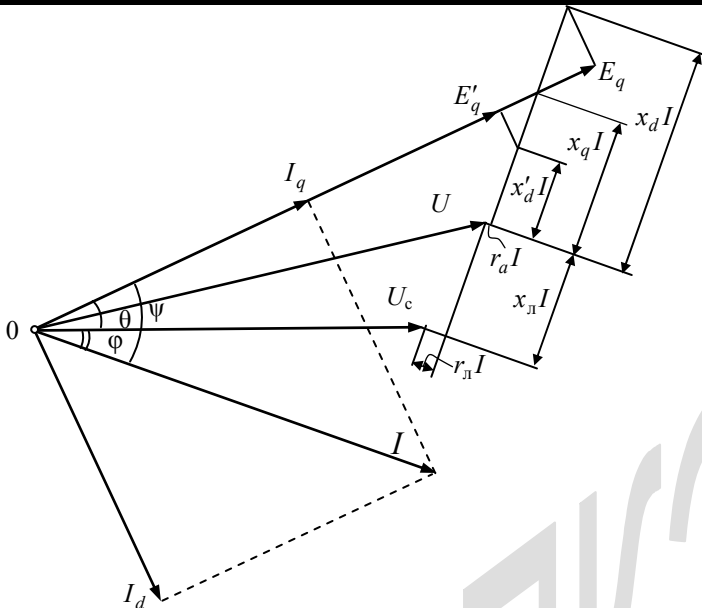


Рис. 1.5. Векторная диаграмма синхронного гидрогенератора мощностью 115 МВт (128,5 МВ·А) при 68,18 об/мин, включенного на шины энергосистемы через индуктивное  $x_l$  и активное  $r_l$  сопротивления

Из векторной диаграммы следует

$$\begin{aligned} U_c \cos \theta &= E_q - x_{dl} I_d - r_{al} I_q; \\ U_c \sin \theta &= x_{ql} I_q - r_{al} I_d, \end{aligned} \quad (1.16)$$

где  $x_{dl} = x_d + x_l$ ,  $x_{ql} = x_q + x_l$ ,  $r_{al} = r_a + r_l$ .

Решая зависимости (1.16) относительно токов  $I_q, I_d$  и подставляя их в выражение (1.15), можно после преобразований получить выражение мощности  $P$  в функции параметров генератора и электропередачи

$$\begin{aligned} P &= \frac{U_c}{x_{dl} x_{ql} + r_{al}^2} \{ E_q (x_{ql} \sin \theta + r_{al} \cos \theta) + \\ &+ \frac{U_c}{2} [(x_d - x_q) \sin 2\theta - 2r_{al}] \}. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Если положить в этой формуле  $r_{al} = r_a + r_l = 0$ , то

$$P = \frac{U_c E_q}{x_{dл}} \sin \theta + \frac{(x_d - x_q) U_c^2}{2x_{dл} x_{qл}} \sin 2\theta, \quad (1.18)$$

т. е. имеем формулу обычной угловой характеристики синхронного явнополюсного генератора, включенного на шины энергосистемы через индуктивное сопротивление  $x_{л}$ ; для неявнополюсной машины, у которой  $x_d = x_q$ , имеем

$$P = \frac{U_c E_q}{x_{дл}} \sin \theta. \quad (1.18, а)$$

В последних выражениях активная мощность определяется величиной ЭДС  $E_q$ , зависящей от электромагнитного потока, создаваемого током возбуждения в стационарном режиме.

При исследованиях отклонений от стационарного режима следует опираться на результирующий магнитный поток в воздушном зазоре машины, которому соответствует переходная ЭДС  $E'_q$ .

Характеристика активной мощности может быть получена из векторной диаграммы.

Мощность генератора будет соответствовать зависимости (1.15)

$$P = U_c \cos \theta I_q + U_c \sin \theta I_d.$$

Из векторной диаграммы следует

$$U_c \cos \theta = E'_q - x'_{дл} I_d - r_{ал} I_q;$$

$$U_c \sin \theta = x_{qл} I_q - r_{ал} I_d.$$

Решая эти уравнения относительно токов  $I_q$  и  $I_d$  и подставляя их в выражение (1.15), после преобразований можно получить искомую формулу

$$P = \frac{U_c}{x'_{дл} x_{qл} + r_{ал}^2} \left\{ E'_q (x_{qл} \sin \theta + r_{ал} \cos \theta) + \frac{U_c}{2} [(x'_d - x_q) \sin 2\theta - 2r_{ал}] \right\}. \quad (1.19)$$

Для неявнополюсного генератора  $x_d = x_q$  и формула (1.19) имеет вид

$$P = \frac{U_c}{x'_{дл} x_{дл} + r_{ал}^2} \left\{ E'_q (x_{дл} \sin \theta + r_{ал} \cos \theta) + \frac{U_c}{2} [(x'_d - x_d) \sin 2\theta - 2r_{ал}] \right\}. \quad (1.19, а)$$

В случае включения генератора непосредственно на шины энергосистемы следует принять  $x_d = 0$ ,  $r_d = 0$  и для  $r_a = 0$  последние зависимости будут такими

$$P = \frac{U_c E'_q}{x'_d} \sin \theta + \frac{x'_d - x_q}{2 x'_d x_q} U_c^2 \sin 2\theta; \quad (1.19, б)$$

$$P = \frac{U_c E'_q}{x'_d} \sin \theta + \frac{x'_d - x_d}{2 x'_d x_d} U_c^2 \sin 2\theta. \quad (1.19, в)$$

Располагая формулами, в которых отражается зависимость между параметрами генератора, с одной стороны, и параметрами нагрузки, с другой, можно исследовать практически любой режим генератора при статическом изменении нагрузки. Исследовать можно режимы как одиночного генератора, так и нескольких генераторов, включенных параллельно на общую сеть. Наибольшие трудности возникают при исследовании режимов параллельной работы, причем, если вопросы, касающиеся регулирования и распределения реактивной мощности между генераторами, могут быть решены с помощью полученных здесь формул, то вопросы регулирования и распределения активной мощности требуют отдельного анализа, так как распределение мощности полностью определяется параметрами и свойствами энергетических двигателей генераторов.

## § 1.2. Динамические свойства синхронного генератора

В нагруженном генераторе С.А. Лебедев и П.С. Жданов [3] рассматривали четыре потока: полезный, т. е. основной,  $\Phi_d$ , реакции якоря  $\Phi_{ad}$ , рассеяния обмотки статора  $\Phi_s$  и рассеяния обмотки возбуждения  $\Phi_{вс}$ . При внезапном нарушении режима генератора все эти магнитные потоки претерпевают изменение. Согласно известному принципу постоянства потокосцеплений Э.Х. Ленца\* результирующий магнитный поток, пронизывающий любую замкнутую обмотку, не может измениться скачкообразно, ибо в противном случае в обмотке наводилась бы бесконечно большая ЭДС. Поэтому пронизывающий обмотку магнитный поток сначала остается неизменным, а затем начинает плавно изменяться, стремясь к новому установившемуся значению. Если обмотку пронизывает несколько магнитных потоков, то принцип постоянства потокосцеплений следует относить ко всей совокупности потоков, а не к отдельным составляющим.

\* Ленц Э.Х. Доклад Академии Санкт-Петербурга, 1833.

По продольной оси машины в общем случае имеются три замкнутые обмотки: возбуждения, статора и демпферная. При рассмотрении относительно длительных переходных процессов влиянием последней можно пренебречь, так как наведенные в ней токи затухают чрезвычайно быстро – в сотые доли секунды.

Соотношения параметров обмоток ротора и статора, характеризующих их электромагнитную инерцию, позволяют считать, что потокоцепления обмотки статора могут свободно изменяться, следуя за изменением тока статора, а изменение потокоцеплений обмотки ротора подчиняется вышеуказанному принципу постоянства потокоцеплений.

Так, если пренебречь потоком рассеяния ротора и представить, что на ненагруженный генератор с потоком возбуждения  $\Phi_d$  будет включена реактивная нагрузка, то при появлении потока реакции статора  $\Phi_{ad}$  поток  $\Phi_d$  должен возрасти на величину  $\Delta\Phi_d = \Phi_{ad}$  с тем, чтобы начальный поток обмотки возбуждения  $\Phi_B = \Phi_d$  в первый момент нарушения режима остался неизменным (рис. 1.6, а).

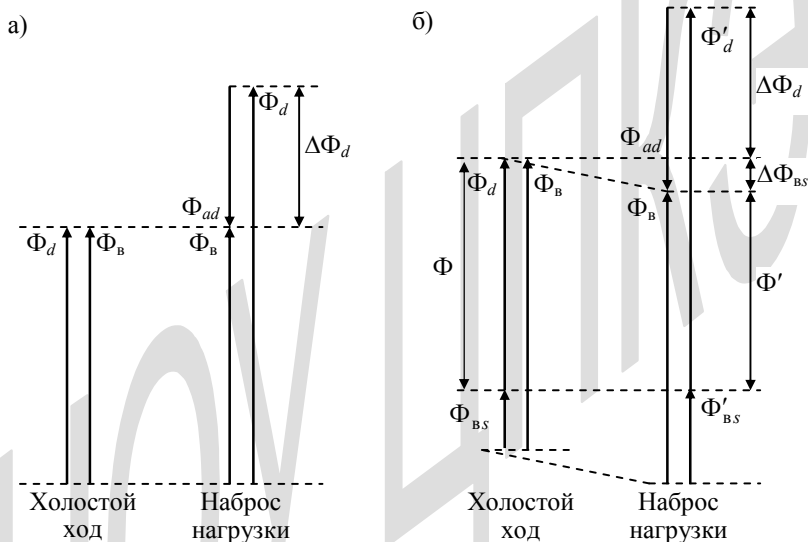


Рис. 1.6. Магнитные потоки в синхронном генераторе при нарушении режима: а – без учета потока рассеяния обмотки возбуждения; б – с учетом этого потока

Таким образом, реакция статора в первый момент нарушения режима не уменьшает величину потока в воздушном зазоре машины, т. е. совершенно не проявляется, так как компенсируется потоком  $\Delta\Phi_d$ , вызванным появлением свободного тока в обмотке возбуждения, и результирующий поток в воздушном зазоре машины остается неизменным [3].

Как уже указывалось, продольное индуктивное сопротивление синхронного генератора равно сумме индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора и его реакции

$$x_d = x_s + x_{ad},$$

но так как в этих условиях реакция статора не проявляется, то, следовательно, продольное индуктивное сопротивление машины сводится лишь к индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки статора, т. е.

$$x'_d = x_s.$$

Наличие потока рассеяния обмотки ротора  $\Phi_{BS}$  обуславливает иное значение величины  $x'_d$ . С учетом этого потока магнитный поток в воздушном зазоре машины  $\Phi$  при холостом ходе по-прежнему равен полезному потоку  $\Phi_d$ , однако поток обмотки возбуждения  $\Phi_B$  теперь представляет собой сумму полезного потока  $\Phi_d$  и потока рассеяния  $\Phi_{BS}$  (см. рис. 1.6, б). При включении реактивной нагрузки появление потока реакции статора  $\Phi_{ad}$  также компенсируется увеличением существовавших потоков до некоторых новых значений  $\Phi'_d$  и  $\Phi'_{BS}$  при сохраняющемся неизменном суммарном потоке  $\Phi_B$ . Как и раньше увеличение потока возбуждения  $\Phi_B$  (включающего в себя поток рассеяния) связано с появлением свободной составляющей тока в обмотке ротора.

В соответствии с принципом постоянства потокоцеплений реакция якоря уравнивается суммой приращений потоков обмотки возбуждения  $\Delta\Phi_d + \Delta\Phi_{BS}$ , однако это равновесие имеет место только внутри обмотки возбуждения. В воздушном же зазоре машины часть реакции статора, численно равная приращению потока рассеяния ротора  $\Delta\Phi_{ad} = \Delta\Phi_{BS}$ , оказывается нескомпенсированной, так как этот поток сцеплен только обмоткой возбуждения и в воздушный зазор между железом статора и полюсами ротора не попадает (см. рис. 1.1).

Следовательно, в этих условиях индуктивное сопротивление генератора кроме индуктивного сопротивления рассеяния статора должно содержать часть индуктивного сопротивления реакции статора

$$x'_d = x_s + k_a x_{ad} \quad \text{или} \quad x'_d = \sigma x_d,$$

где  $\sigma$  – коэффициент рассеяния общего магнитного потока статора и ротора.

Коэффициент  $k_a$  равен

$$k_a = \frac{x_{BS}}{x_{BS} + x_{ad}},$$

где  $x_{BS}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения.

Величина  $x'_d$  получила название «переходное продольное индуктивное сопротивление»\*.

Указанный характер изменения потоков в синхронной машине относится к первому моменту нарушения режима. В дальнейшем свободный ток, появившийся в цепи возбуждения, начинает затухать. По мере его затухания действие реакции статора начинает проявляться все в большей степени, и когда свободный ток окончательно исчезнет, оно проявится полностью. Поэтому замещение генератора при расчете переходным продольным сопротивлением в течение всего переходного процесса от одного установившегося режима к другому является неправильным. Однако в условиях, когда свободный ток ротора будет «поддержан» при помощи быстродействующей системы автоматического регулирования и действие реакции статора не будет проявляться в большей мере, чем это определяется переходным сопротивлением машины, генератор с полным основанием может быть замещен параметром  $x'_d$ .

При достаточной скорости увеличения возбуждения затухание результирующего тока ротора может быть полностью устранено и величина тока статора в любой момент времени будет определяться, как и в первый момент нарушения режима, переходным сопротивлением. Это чрезвычайно важное обстоятельство учитывается при разработке методов расчета переходных процессов, особенно для быстродействующего возбуждения.

Величина сопротивления  $x'_d$  может определять не только значения токов в момент нарушения режима, но и значения токов предшествующего установившегося режима, если в качестве ЭДС генератора рассматривают так называемую ЭДС за переходным продольным сопротивлением  $E'_q$ , равную сумме составляющей напряжения на зажимах генератора в нормальном режиме  $U_q$  и падения напряжения на переходном сопротивлении генератора  $x'_d I_d$  при  $r_a = 0$  (см. рис. 1.3)

$$E'_q = U_q + x'_d I_d.$$

Электродвижущая сила  $E'_q$  не является истинной ЭДС машины. Она представляет собой некоторую условную величину, пропорциональную потоку сцепления обмотки возбуждения и не изменяющуюся в первый момент нарушения режима генератора.

---

\* Далее в тексте для краткости записи сопротивления машины будут именоваться:  $x'_d$  – переходное продольное сопротивление,  $x_d$  – синхронное продольное сопротивление,  $x_q$  – синхронное поперечное сопротивление и т. п.



Постоянство ЭДС  $E'_q$  является очень важным свойством. Благодаря ему можно при помощи последнего уравнения найти изменение напряжения генератора при внезапном изменении тока нагрузки. Этого нельзя было бы сделать при помощи аналогичного выражения

$$E_q = U_q + x_d I_d,$$

содержащего в себе ЭДС генератора, которая пропорциональна току возбуждения и изменяется вместе с ним.

В переходном процессе генератора претерпевают изменение как продольная, так и поперечная составляющие тока статора. В связи с отсутствием замкнутых обмоток по поперечной оси (если пренебречь влиянием демпферной обмотки) поток реакции статора по этой оси машины изменяется, свободно следуя за изменением поперечной составляющей тока статора. Следовательно, поперечное сопротивление машины в переходном процессе должно полностью содержать составляющую поперечной реакции статора, т. е. переходное поперечное сопротивление генератора  $x'_q$  должно быть равно синхронному поперечному сопротивлению

$$x'_q = x_q = x_s + x_{aq}.$$

Таким образом, при ряде допущений генератор в переходном процессе может быть замещен по продольной оси переходным сопротивлением  $x'_d$  и ЭДС  $E'_q$ , а по поперечной оси – синхронным сопротивлением  $x_q$ .

Следовательно, при внезапном набросе реактивной нагрузки первоначальный «провал напряжения»  $\Delta U_0$  будет вызван падением напряжения на переходном продольном сопротивлении  $x'_d$  и будет тем больше, чем больше это сопротивление. Параметр  $x'_d$  зависит от конструктивных особенностей генератора, от свойств и качества применяемых материалов и будет тем меньше, чем больше размеры генератора, вес его стали и меди при одном и том же значении мощности.

Если первоначальный «провал напряжения» генератора обусловлен падением напряжения на переходном продольном сопротивлении, то максимальный «провал»  $\Delta U_{\max}$  вызван действием реакции статора, которая уменьшает результирующий магнитный поток в воздушном зазоре машины. Величина и длительность снижения напряжения зависят не только от параметров генератора, но и от быстродействия системы автоматического регулирования возбуждения, уменьшающего влияние реакции статора в воздушном зазоре машины.

Зависимость между напряжением на шинах генератора и величиной его ЭДС за переходным сопротивлением может быть найдена из векторной диаграммы. Обращаясь к рис. 1.3, можно для явнополюсного генератора составить равенства

$$\left. \begin{aligned} E'_q &= U \cos \theta + x'_d I_d + r_a I_q ; \\ \operatorname{tg} \theta &= \frac{x_q \cos \varphi + r_a \sin \varphi}{r_H + r_a \cos \varphi + x_q \sin \varphi} . \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

Преобразуя эти равенства таким же путем, каким были преобразованы зависимости (1.1), получим следующие формулы:

для явнополюсного генератора

$$U = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x'_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2} E'_q = \xi' E'_q ; \quad (1.21)$$

для неявнополюсного генератора

$$U = \frac{z_H \sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}}{x'_{dH} x_{dH} + r_{aH}^2} E'_q = \zeta' E'_q , \quad (1.21, a)$$

здесь

$$\xi' = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x'_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2} ; \zeta' = \frac{z_H \sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}}{x'_{dH} x_{dH} + r_{aH}^2} \quad (1.22)$$

– коэффициенты ЭДС за переходным сопротивлением для явнополюсного и неявнополюсного генераторов соответственно;  $z_H = \sqrt{x_H^2 + r_H^2}$  – сопротивление нагрузки.

Переходные ЭДС в продольной оси генераторов могут быть получены из векторных диаграмм (в пренебрежении активным сопротивлением  $r_a$ ) и выражены через величины активной и реактивной мощности. Соответственно для явнополюсного и неявнополюсного генераторов

$$E'_q = \frac{(U^2 + x'_d Q)(U^2 + x_q Q) + x'_d x_q P^2}{U \sqrt{(U^2 + x_q Q)^2 + (x_q P)^2}} ; \quad (1.23)$$

$$E'_q = \frac{(U^2 + x'_d Q)(U^2 + x_d Q) + x'_d x_d P^2}{U \sqrt{(U^2 + x_d Q)^2 + (x_d P)^2}} . \quad (1.23, a)$$

Величина напряжения при внезапном включении нагрузки на генератор или пуске электродвигателя «провал напряжения» – вычисляется по формулам (1.21)

$$U_0 = \xi' E'_q , \quad (1.24)$$

$$U_0 = \zeta' E'_q \quad (1.24, a)$$

соответственно для явнополюсного и неявнополюсного генераторов.

Величина тока статора генератора может быть вычислена по приведенным формулам:

для явнополюсного генератора

$$I_0 = \frac{U_0}{z_{\text{H}}} = \frac{\zeta' E'_q}{z_{\text{H}}} = \frac{E'_q}{z'_{q\text{H}}}; \quad (1.25)$$

для неявнополюсного генератора

$$I_0 = \frac{\zeta' E'_q}{z_{\text{H}}} = \frac{E'_q}{z'_{d\text{H}}}, \quad (1.25, a)$$

где символами полных сопротивлений обозначено

$$z'_{q\text{H}} = \frac{x'_{d\text{H}} x_{q\text{H}} + r_{a\text{H}}^2}{\sqrt{x_{q\text{H}}^2 + r_{a\text{H}}^2}}; \quad z'_{d\text{H}} = \frac{x'_{d\text{H}} x_{d\text{H}} + r_{a\text{H}}^2}{\sqrt{x_{d\text{H}}^2 + r_{a\text{H}}^2}}. \quad (1.26)$$

В общем случае связь между напряжением генератора и ЭДС за переходным сопротивлением может быть представлена в комплексном виде

$$\bar{U} = \bar{E}'_q - \bar{z}'_{\Gamma} \bar{I}'_{\text{K}},$$

где  $\bar{z}'_{\Gamma}$  – комплексное сопротивление генератора в переходном режиме.

При коротком замыкании  $U = 0$  и ток равен

$$\bar{I}'_{\text{K}} = \frac{\bar{E}'_q}{\bar{z}'_{\Gamma\text{K}}}. \quad (1.27)$$

Отсюда комплекс полного сопротивления цепи короткого замыкания определится в виде

$$\bar{z}'_{\Gamma\text{K}} = \frac{\bar{E}'_q}{\bar{I}'_{\text{K}}} = \frac{E'_q e^{j\varphi_E}}{I_{\text{K}} e^{j\varphi_I}} = z_{\Gamma\text{K}} e^{j\varphi_Z},$$

где  $\varphi_Z = \varphi_E - \varphi_I$  – аргумент комплекса сопротивления.

Из сопоставления выражений (1.25) и (1.27) следует, что величины  $z'_{q\text{H}}$ ,  $z'_{d\text{H}}$  можно считать модулями соответствующих комплексов полных сопротивлений.

Комплекс сопротивления в переходном режиме будет иметь следующий вид:

для явнополюсного генератора

$$\bar{z}'_{q\text{H}} = z'_{q\text{H}} e^{j\varphi_{q\text{H}}} = \frac{x'_{d\text{H}} x_{q\text{H}} + r_{a\text{H}}^2}{\sqrt{x_{q\text{H}}^2 + r_{a\text{H}}^2}} e^{j\varphi_{q\text{H}}}; \quad (1.28)$$

для неявнополюсного генератора

$$\bar{z}'_{dH} = z'_{dH} e^{j\varphi_{dH}} = \frac{x'_{dH} x_{dH} + r_{aH}^2}{\sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}} e^{j\varphi_{dH}}. \quad (1.28, a)$$

Аргументы комплексных сопротивлений можно найти из векторных диаграмм генераторов (см. рис. 1.3), где они, как и в статическом режиме, определяют положение вектора тока статора относительно вектора ЭДС. Поэтому численные значения аргументов могут быть найдены по формулам (1.12), и тогда активная и реактивная составляющие полного сопротивления определяются выражениями:

для явнополюсного генератора

$$\bar{z}'_{qH} = z'_{qH} (\cos \varphi_{qH} + j \sin \varphi_{qH}) = r'_{яH} + jx'_{яH}; \quad (1.29)$$

для неявнополюсного генератора

$$\bar{z}'_{dH} = z'_{dH} (\cos \varphi_{dH} + j \sin \varphi_{dH}) = r'_{нH} + jx'_{нH}. \quad (1.29, a)$$

При коротком замыкании на шинах генератора, когда  $x_H = 0$ ,  $r_H = 0$ , комплекс полного сопротивления определяется из формул (1.28) и (1.28, a):

для явнополюсного генератора

$$\bar{z}'_{qk} = \frac{x'_d x_q + r_a^2}{\sqrt{x_q^2 + r_a^2}} e^{j\varphi_{qk}}; \quad (1.30)$$

для неявнополюсного генератора

$$\bar{z}'_{dk} = \frac{x'_d x_d + r_a^2}{\sqrt{x_d^2 + r_a^2}} e^{j\varphi_{dk}}. \quad (1.30, a)$$

Величина провала напряжения может быть вычислена в виде комплексного числа соответственно для явнополюсного и неявнополюсного генератора

$$\bar{U}_0 = \frac{z_H e^{j\varphi_H}}{z'_{qH} e^{j\varphi_{qH}}} E'_q; \quad (1.31)$$

$$\bar{U}_0 = \frac{z_H e^{j\varphi_H}}{z'_{dH} e^{j\varphi_{dH}}} E'_q, \quad (1.31, a)$$

где модули комплексных сопротивлений  $z'_{qH}$ ,  $z'_{dH}$  вычисляются по (1.28); аргументы этих комплексных сопротивлений определяются формулами (1.12).

Связь между ЭДС за синхронным сопротивлением и ЭДС за переходным сопротивлением выражается при помощи параметров машины и нагрузки простыми зависимостями.

Для явнополюсного генератора на основании формул (1.2) и (1.21) имеем

$$E_q = \frac{\xi'}{\xi} E'_q = \frac{x_{dн} x_{qн} + r_{ан}^2}{x'_{dн} x_{qн} + r_{ан}^2} E'_q. \quad (1.32)$$

Для неявнополюсного генератора по (1.3) и (1.22) получаем

$$E_q = \frac{\zeta'}{\zeta} E'_q = \frac{x_{dн}^2 + r_{ан}^2}{x'_{dн} x_{dн} + r_{ан}^2} E'_q. \quad (1.32, a)$$

При исследованиях и расчетах токов генератора при коротком замыкании на выводах начальный сверхпереходный ток, возникающий в момент  $t = 0$ , определяется формулой

$$I'' = \frac{E''}{x_d''}, \quad (1.33)$$

где  $E''$  – сверхпереходная ЭДС;  $x_d''$  – сверхпереходное индуктивное сопротивление в продольной оси, величина которого определяется, в основном, параметрами демпферной обмотки машины.

Протекание сверхпереходного и переходного процесса в цепях синхронной машины зависит от электромагнитных постоянных времени цепей.

В паспортных данных помещаются следующие постоянные времени:  $T_a$  – постоянная времени обмотки статора;  $c$ ;  $T_d, T'_d, T''_d$  – постоянные времени в продольной оси: холостого хода, переходная и сверхпереходная,  $c$ ;  $T''_q$  – сверхпереходная постоянная времени в поперечной оси,  $c$ .

Эти постоянные времени носят и другие названия, а именно:  $T_{d0} \equiv T_a$  – постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора;  $T'_d$  – постоянная времени обмотки возбуждения при короткозамкнутой обмотке статора;  $T''_d, T''_q$  – соответственно постоянные времени демпферной обмотки в продольной и поперечной осях.

Постоянные времени взаимосвязаны через параметры машины (см. табл. 2.1) и вычисляются по формулам, опубликованным в литературе [3–5].