

Министерство образования Российской Федерации
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Л.М. Серова. А.Е. Серов

РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННЫХ МАШИН

Учебное пособие

Благовещенск

2001

ББК

Печатается по решению
редакционно-издательского совета
энергетического факультета
Амурского государственного
университета

Л.М. Серова, А.Е. Серов

Расчет и построение характеристик синхронных машин. Учебное пособие.

Благовещенск: Амурский гос.ун-т, 2001.

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей 1001 и 2104 очной и заочной форм обучения энергетического факультета, изучающих дисциплину “Электромеханика” и выполняющих по этой дисциплине курсовой проект “Проектирование гидрогенераторов”.

Рецензент: Ю.В.Мясоедов, доцент кафедры “Энергетика”, канд. техн. наук.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Характеристики синхронного генератора	4
1.1. Внешние характеристики	4
1.2. Регулировочные характеристики	5
1.3. V-образные характеристики	6
1.4. Угловая характеристика, коэффициент синхронизирующей мощности и статическая перегружаемость	8
2. Построение характеристик	11
2.1. Построение регулировочной характеристики	14
2.2. Построение внешней характеристики	15
2.3. Построение V-образных характеристик	17
2.4. Расчет и построение угловой характеристики и кривой коэффициента синхронизирующей мощности	19
Литература	23
Приложения	24
Таблица 1	26
Таблица 2	28
Таблица 3	30
Таблица 4	32

ВВЕДЕНИЕ

Важным этапом в изучении курса “Электромеханика” студентами специальностей «1001» и «2104» очной и заочной форм обучения является выполнение курсового проекта по расчету гидрогенератора.

Свойства гидрогенератора, как и всех электрических машин, анализируются с помощью характеристик. По характеристикам можно судить о том, в какой степени конструктору удалось выполнить технико-эксплуатационные требования, предъявленные к электрической машине при проектировании.

В объем курсового проекта применительно к гидрогенераторам входят расчет и построение внешней, регулировочной, V -образных и угловой характеристик.

В учебной литературе нет четких практических рекомендаций для расчета и построения таких характеристик, что вызывает у студентов затруднения при выполнении этой части курсового проекта.

Представляется целесообразным осветить эти вопросы на конкретном примере.

Методическое руководство состоит из двух глав и приложения. В первой главе излагаются основные теоретические положения, связанные с характеристиками синхронных генераторов; во второй – методика расчета и построения регулировочной, внешней и V -образных характеристик; в приложении приведены основные технические данные гидрогенераторов отечественного производства.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Среди разнообразных характеристик синхронных генераторов отдельную группу составляют характеристики, которые определяют зависимость между напряжением на зажимах якоря U , током якоря и током возбуждения I_f при $n = n_n$ или $f = f_n$ и $\varphi = \text{const}$ в установившемся режиме работы – регулировочные, внешние и V-образные. Эти характеристики наглядно отражают ряд основных свойств синхронных генераторов.

1.1 Внешние характеристики

Внешней характеристикой называется зависимость напряжения на зажимах генератора от тока якоря при постоянных значениях тока возбуждения, частоты вращения и коэффициента мощности: $U = f(I)$ при $I_{fH} = \text{const}$, $n = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$. (рис. 1).

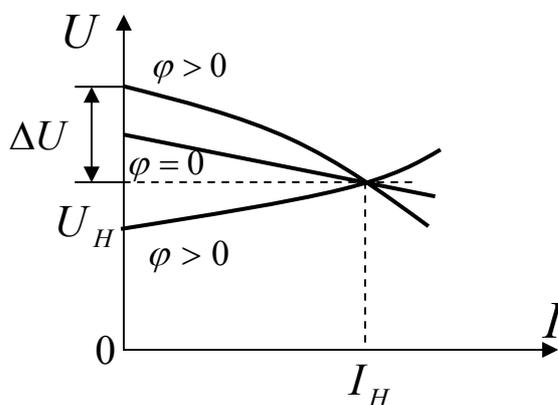


Рис. 1. Внешние характеристики.

Внешние характеристики показывают, как изменяется напряжение на зажимах генератора при увеличении тока нагрузки, если ток возбуждения и характер нагрузки неизменны. При индуктивной нагрузке $0 < \varphi < \pi/2$ внешняя характеристика с увеличением нагрузки резко падает из-за размагничивающего действия реакции якоря и падения напряжения $I r + j I x_\sigma$, которые растут с увеличением нагрузки. Причем с увеличением угла φ , т.е. с уменьшением величины $\cos \varphi$, возрастает величина падения напряжения. В случае чисто активной нагрузки $\varphi = 0$ ($\cos \varphi = 1$) размагничивающее действие реакции якоря намного слабее и поэтому напряжение падает незначительно. При емкостной нагрузке $-\pi/2 < \varphi < 0$ напряжение с увеличением нагрузки возрастает из-за намагничивающего действия реакции якоря [1,2].

По внешней характеристике определяется номинальное изменение напряжения синхронного генератора – ΔU_H . ΔU_H – это изменение напряжения на зажимах генератора (при его

работе отдельно от других генераторов) при изменении нагрузки от номинального значения до нуля и при неизменном токе возбуждения:

$$\Delta U\% = \frac{E_{f0} - U_n}{U_n} \cdot 100\%$$

1.2. Регулировочные характеристики

Регулировочной характеристикой генератора называется зависимость тока возбуждения от тока якоря при постоянных значениях напряжения, частоты вращения и коэффициента мощности: $I_f = f(I)$ при $U_n = const$, $n_n = const$, $\cos \varphi = const$ (рис. 2).

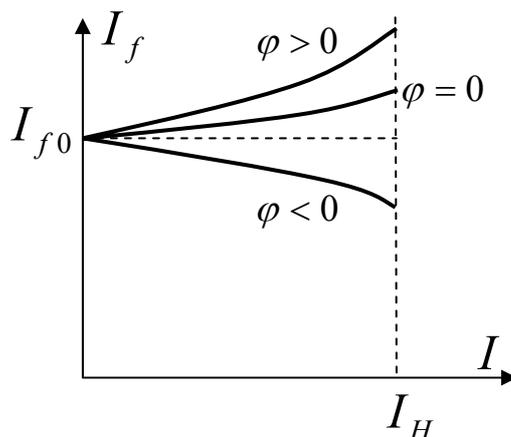


Рис. 2. Регулировочные характеристики.

Регулировочные характеристики показывают, как нужно регулировать ток возбуждения I_f , чтобы при изменении нагрузки « I » напряжение на зажимах якоря U осталось неизменным. Вид регулировочных характеристик также объясняется характером действия реакции якоря. При индуктивной нагрузке $\varphi > 0$ для поддержания напряжения $U_n = const$ с возрастанием нагрузки потребуется значительное увеличение тока возбуждения с целью компенсации размагничивающего действия реакции якоря и падения напряжения.

При чисто активной нагрузке $\varphi = 0$ размагничивающее действие реакции якоря слабее и требуется меньшее увеличение I_f .

В случае емкостной нагрузки реакция якоря стремится увеличить E_δ и U , вследствие чего для сохранения $U_n = const$ необходимо с увеличением I уменьшать I_f .

1.3. V-образные характеристики.

V-образные характеристики показывают зависимость тока якоря и $\cos \varphi$ от тока возбуждения при постоянной активной мощности, постоянном напряжении и постоянной частоте:

$$I, \cos \varphi = f(I_f) \text{ при } P = \text{const}, f_n = \text{const}, U_n = \text{const}.$$

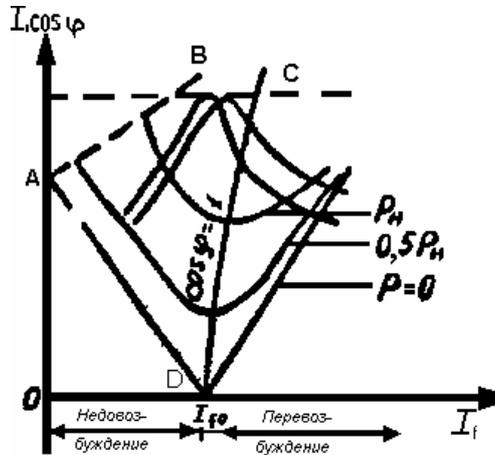


Рис. 3. V-образные характеристики.

Они снимаются при работе синхронного генератора параллельно с сетью. Из теории электрических машин [1,2] известно, что изменение тока возбуждения приводит к изменению реактивной мощности генератора. Если такое регулирование осуществляется, как указано, при постоянстве активной мощности $P = \text{const}$, то остается постоянной активная составляющая тока якоря:

$$I_a = I \cdot \cos \varphi = \frac{P}{m \cdot U_n} = \text{const}.$$

Следовательно, изменение тока якоря происходит только за счет изменения его реактивной составляющей:

$$I_r = I \cdot \sin \varphi = Q / m \cdot U = \text{var}$$

На рис. 3 показано семейство характеристик $I_r \cos \varphi = f(I_f)$ при различных значениях активной мощности P . Минимальное значение тока якоря для каждой кривой определяет активную составляющую тока якоря I_a ($I_r = 0$) и величину мощности $P = m \cdot U \cdot I_a$, для которой построена данная кривая. Нижняя кривая соответствует $P = 0$, т.е. холостому ходу синхронного генератора; I_{f0} — значение тока возбуждения при $E_r = U_n$. Правые части кривых соответствуют перевозбужденной машине и отдаче в сеть индуктивного тока и реактивной мощности, а левые части — недовозбужденной машине, отдаче в сеть емкостного тока и потреблению реактивной мощности. Кривая DC, соединяющая точки минимума семейства

характеристик $I = f(I_f)$, при увеличении мощности отклоняется вправо, так как вследствие падения напряжения $I r_a + j I x_\sigma$ возрастает значение результирующей ЭДС в воздушном зазоре E_δ и необходимый ток возбуждения при $\cos \varphi = 1$. ДС представляет собой регулировочную характеристику генератора $I_f = f(I)$ при $\cos \varphi = 1$. Точка А соответствует холостому ходу невозбужденной машины. При этом из сети потребляется намагничивающий ток:

$$I = \frac{U_{\text{нф}}}{x_d} \quad (1)$$

Линия АВ представляет собой границу устойчивости, на которой угол нагрузки: $\theta = \theta_{\text{кр}}$.

Левее линии АВ синхронный генератор выпадает из синхронизма. Величина минимального тока возбуждения $I_{f \text{ min}}$, при котором машина выпадает из синхронизма, определяется по спрямленной через номинальную точку характеристике холостого хода машины по минимальному значению ЭДС E_{min} ; E_{min} определяется аналитически из уравнения активной мощности. Расчет ведется в относительных единицах:

$$P = P_{\text{н}} = \frac{m \cdot U_{\text{н}} \cdot E_{\text{min}}}{x_d} \left[\cos \theta'_m + \frac{m \cdot U_{\text{н}}^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta'_m \right]. \quad (2)$$

θ'_m – критический угол при $I_{f \text{ min}}$ – определяется графически по рис. 9. Решая уравнение (2) относительно ЭДС E_{min} и принимая $U=1$ о. е. и $P_{\text{н}} = \cos \varphi_{\text{н}}$, получим

$$E_{\text{min}} = \frac{x_d}{\sin \theta'_m} \left[\cos \varphi_{\text{н}} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta'_m \right]. \quad (3)$$

В режиме перевозбуждения величина тока возбуждения ограничивается допустимым нагревом обмотки возбуждения. Следует отметить, что явнополюсные синхронные машины в периоды спада нагрузок, когда возникает необходимость в потреблении из сети индуктивного тока и реактивной мощности, могут работать и в режиме отрицательного возбуждения, не выпадая из синхронизма. Величины предельного отрицательного тока возбуждения и предельного угла смещения ротора, соответствующие границе устойчивости, могут быть определены согласно [3,]:

$$-I_{f \text{ нр}} = -\frac{x_d \cdot P_{\text{т}}}{U_{\text{н}} \cdot \sin \theta_{\text{нр}}} - U_{\text{н}} \left(\frac{x_d}{x_q} - 1 \right) \cos \theta_{\text{нр}}, \quad (4)$$

$$\theta_{\text{пр}} = \arcsin \left[\frac{P_{\text{т}}}{U_{\text{н}}^2 \left(1/x_{\text{q}} - 1/x_{\text{d}} \right)} \right]^{1/3},$$

где $P_{\text{т}}$ – суммарные механические потери в о.е.

1.4. Угловая характеристика, коэффициент синхронизирующей мощности и статическая перегружаемость

Угловой характеристикой называется зависимость активной мощности от угла θ при постоянных значениях напряжения, частоты и тока возбуждения: $P = f(\theta)$ при $U_{\text{н}} = \text{const}$, $f_{\text{н}} = \text{const}$, $I_{\text{f}} = \text{const}$.

Угловая характеристика дает возможность оценить эксплуатационные качества синхронной машины при работе ее параллельно с сетью. По данной характеристике определяются основные показатели, характеризующее статическую перегружаемость.

Активная мощность, развиваемая синхронным генератором при параллельной работе с сетью, определяется внешним вращающим моментом, приложенным к валу машины. В установившемся режиме (при синхронной частоте вращения ротора) внешний момент всегда уравновешен суммой электромагнитного момента M и момента холостого хода, и активная мощность равна $P = M \cdot \Omega$, где $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ (n – в об/мин).

Если при регулировании активной мощности ток возбуждения остается неизменным, $I_{\text{f}} = \text{const}$, то (без учета насыщения) $E_{\text{f}} = \text{const}$, и из числа величин, определяющих режим при параллельной работе, изменяется только угол θ .

Расчет и построение угловой характеристики ведутся по уравнению активной мощности:

$$P = \frac{m \cdot U_{\text{н}} \cdot E_{\text{f}}}{x_{\text{d}}} \sin \theta + \frac{m \cdot U_{\text{н}}^2}{2} \left(\frac{1}{x_{\text{q}}} - \frac{1}{x_{\text{d}}} \right) \sin 2\theta, \quad (5)$$

где

E_{f} – ЭДС синхронной машины определяется по спрямленной через номинальную точку характеристике холостого хода (рис. 4);

$x_{\text{d}}, x_{\text{q}}$ – синхронные индуктивные сопротивления машины по продольной и поперечной осям.

Уравнение активной мощности имеет две составляющие, одна из которых с амплитудой $m \cdot U_n \cdot E_f / x_d$ изменяется пропорционально $\sin \theta$ и называется основной, вторая – с амплитудой

$$\frac{m \cdot U_n^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right)$$

изменяется пропорционально $\sin 2\theta$ и называется реактивной.

Первая составляющая имеется в возбужденной машине при $E_f \neq 0$, вторая – только в явнополюсной машине, т.е. при $x_d \neq x_q$. В явнополюсной машине первая составляющая играет тем большую роль, чем больше отношение ее амплитуды к амплитуде второй составляющей:

$$n = \frac{2 \cdot E_f \cdot x_q}{U(x_d - x_q)} \quad (6)$$

Взяв производную по θ от выражения (5) и приравняв ее к нулю, можно найти по [2, с. 599], что мощность будет экстремальной при угле

$$\theta_m = \pm \arccos \frac{\sqrt{n^2 + 32} - n}{8}. \quad (7)$$

Величины угла θ_m и максимальной мощности P_m с достаточной степенью точности для дипломных и курсовых проектов могут быть найдены графически. При номинальном возбуждении и номинальном напряжении θ_m определяется абсциссой точки M , а P_m – ординатой точки M угловой характеристики (рис. 9).

Для синхронных гидрогенераторов $\theta_m = 70 \div 80^\circ$.

Синхронный генератор работает устойчиво в области $0 < \theta < \theta_m$.

Номинальный угол θ_n можно определить также двумя способами:

а) графическое определение угла θ_n производится по угловой характеристике при номинальной мощности. В относительных единицах

$$P_n = \cos \varphi_n;$$

б) аналитическое определение θ_n осуществляется из уравнения электромагнитной мощности:

$$\theta_{\text{н}} = \operatorname{arctg} \frac{x_{\text{q}} \cos \varphi_{\text{н}}}{1 + x_{\text{q}} \sin \varphi_{\text{н}}}. \quad (8)$$

Из (5) видно, что максимальная мощность возрастает с увеличением тока возбуждения и с уменьшением x_{d} . Поэтому размеры синхронной машины при проектировании всегда выбираются таким образом, чтобы максимальная мощность была больше номинальной и генератор в случае необходимости мог быть перегружен.

Статическая перегружаемость синхронного генератора (т.е. предельно возможная кратность перегрузки при весьма медленном увеличении внешнего момента) определяется как отношение максимальной мощности $P_{\text{м}}$ при $U = U_{\text{н}}$ и $I_{\text{f}} = I_{\text{фн}}$ к номинальной мощности $P_{\text{н}}$:

$$W_{\text{п}} = \frac{P_{\text{м}}}{P_{\text{н}}}. \quad (9)$$

Согласно ГОСТ 5616-81Е статическая перегружаемость для синхронных машин должна быть не менее 1,7.

Критерием статической устойчивости синхронного генератора является коэффициент синхронизирующей мощности – $P_{\text{с}}$. При $P_{\text{с}} > 0$ работа генератора статически устойчива. Коэффициент синхронизирующей мощности равен производной активной мощности P по углу θ :

$$P_{\text{с}} = \frac{m \cdot U_{\text{н}} \cdot E_{\text{f}}}{x_{\text{d}}} \cos \theta + m \cdot U_{\text{н}}^2 \left(\frac{1}{x_{\text{q}}} - \frac{1}{x_{\text{d}}} \right) \cos 2\theta. \quad (10)$$

На рис. 9 показана кривая $P_{\text{с}} = f(\theta)$ при $U_{\text{н}} = \text{const}$, $f_{\text{н}} = \text{const}$, $I_{\text{f}} = \text{const}$.

2. ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Данные для построения регулировочной, внешней и V -образных характеристик могут быть получены аналитически или с помощью векторных диаграмм. Излагаем порядок построения этих характеристик с помощью диаграммы Потье. Все построения и расчеты выполнены для гидрогенератора со следующими данными:

Номинальная кажущаяся мощность	$S_N = 85,5 \text{ мВА}$
Номинальное линейное напряжение	$U_{НЛ} = 13,8 \text{ кВ}$
Число фаз	$m = 3$
Сопряжение фаз	Y- (звезда)
Частота тока	$f = 50 \text{ Гц}$
Номинальная частота вращения	$n = 25 \text{ об/мин}$
Номинальный коэффициент мощности	$\cos\varphi = 0,8$
Индуктивное сопротивление по продольной оси	$X_d = 0,88 \text{ о.е.}$
Индуктивное сопротивление по поперечной оси	$X_q = 0,609 \text{ о.е.}$
Индуктивное сопротивление рассеяния	$X_\sigma = 0,149 \text{ о.е.}$
МДС реакции якоря при номинальной нагрузке	$F_a = 13014 \text{ А}$
МДС обмотки возбуждения	$F_{fx} = 18075 \text{ А}$
МДС воздушного зазора	$F_\delta = 15146 \text{ А}$
МДС реакции якоря при номинальной нагрузке в о.е.	$F_a/F_{fx} = 0,72$
Коэффициент реакции якоря по продольной оси	$K_{ad} = 0,845$

Характеристика холостого хода в относительных величинах представлена в табл. 1

Таблица 1

E	0,5	1	1,07	1,2	1,3
E _f	0,44	1	1,11	1,419	1,995

Расчет и построение диаграммы Потье и всех характеристик проводятся в относительных единицах. За базисные значения приняты: номинальное напряжение " U_N ", номинальный ток якоря " I_N ", МДС возбуждения " F_{fx} " и соответствующий ей ток возбуждения " I_{fx} ", обеспечивающие в режиме холостого хода номинальное напряжение на зажимах гидрогенератора.

Для построения диаграммы Потье необходимо иметь характеристику холостого хода, МДС якоря F_a , коэффициент реакции якоря по продольной оси k_{ad} и расчетное сопротивление обмотки якоря x_p :

$$x_p = x_\sigma + 0,053 \frac{\pi}{4} \cdot \frac{F_a}{F_\delta}, \quad (11)$$

где x_σ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря.

Влиянием активного сопротивления обмотки якоря пренебрегаем. Порядок построения (рис. 4).

1. Вектор напряжения U_n совмещаем с положительным направлением оси ординат \overline{OA} .
2. Под углом φ_n к вектору напряжения проводим вектор тока $\overset{\square}{I}_n$.
3. К вектору напряжения прибавляем вектор индуктивного падения напряжения $j \overset{\square}{I}_n \cdot x_p$ (\overline{BA}), который проводится из точки A перпендикулярно вектору тока $\overset{\square}{I}_n$. Вектор $j \overset{\square}{I}_n \cdot x_p$ опережает вектор $\overset{\square}{I}_n$ на 90° . Полученный вектор \overline{OB} есть вектор результирующей ЭДС $\overset{\square}{E}_s$, опережающий вектор напряжения на угол γ .
4. По характеристике холостого хода находим МДС возбуждения, необходимую для создания ЭДС $\overset{\square}{E}_s$. Для этого из начала координат радиусом OB проводим дугу до пересечения с осью ординат в точке b . Последняя сносится в точку C на характеристику холостого хода. Отрезок $OD = bC$ и есть $F_{f\delta}$.
5. Учет действия МДС якоря: под углом $\varphi' = \varphi_n + \gamma$ из точки D проводим вектор \overline{DN} , равный значению МДС якоря, приведенному к обмотке возбуждения.

$$\overline{DN} = F'_a = F_a \cdot k_{ad}. \quad (12)$$

На рис. 4 – 9 показано построение диаграммы Потье, регулировочной, внешней, V-образных и угловой характеристик для синхронного гидрогенератора с приведенными выше данными.

На рис. 4 диаграмма Потье, построенная для номинального режима работы, т.е. при $U = U_n$; $I = I_n$; $\cos \varphi = \cos \varphi_n$.

При построении диаграммы Потье принят масштаб:

для напряжения $U - 1 \text{ о.е.} = 100 \text{ мм}$

для МДС $F_f - 1 \text{ о.е.} = 50 \text{ мм}$

По (11):

$$x_p = 0,153 + 0,053 \frac{\pi}{4} \cdot \frac{13004}{15134} = 0,188 \text{ о.е.}$$

По (12):

$$\overline{DN} = F'_a = 0,72 \cdot 0,845 = 0,608 \text{ о.е.}$$

$$\overline{OD} = F_{f\delta} = 1,22 \text{ о.е.}$$

$$\overline{ON} = \overline{OM} = F_{fn} = 1,7 \text{ о.е.}$$

$$\overline{MK} = \overline{OK'} = E_f = 1,265 \text{ о.е.}$$

По (13):

$$\Delta U\% = \frac{1,265 - 1}{1} \cdot 100\% = 26,5\%$$

2.1. Построение регулировочной характеристики

На рис. 5 показано построение регулировочной характеристики с помощью диаграммы Потье при $U_n = const$, $n_n = const$, $\cos \varphi_n = const$.

При токе якоря $I = 0$ ток возбуждения I_{fX} , соответствующий МДС F_{fX} при холостом ходе, определяется отрезком $OX=1$ о.е.

При номинальной нагрузке, т.е. при о.е., I_{fn} определяется отрезком $Om' = 1,7$ о.е. Следует помнить, что в относительных единицах $I_f^{\square} = F_f^{\square}$, следовательно, $I_{fn}^{\square} = F_{fn}^{\square}$. Нахождение F_{fn} подробно описано при построении диаграммы Потье, т.е. $\overline{ON} = \overline{OM} = Om' = F_{fn}$.

Ток возбуждения, обеспечивающий номинальное напряжение при половинной нагрузке, определяется аналогичным образом. Перпендикулярно направлению тока якоря из точки А откладываем вектор падения напряжения на расчетном индуктивном сопротивлении обмотки

якоря при половинной нагрузке $0,5 j I_n x_p = \overline{AP}$. Радиусом OP сносим точку P на ось ординат, а затем на характеристику холостого хода. Полученную точку R проектируем на ось абсцисс в точку S . Из точки S под углом $\varphi'' = \varphi_n + \gamma'$ проводим вектор $SK = 0,5 \overline{F'_a}$, учитывающий действие реакции якоря при половинной нагрузке. Суммируя векторы \overline{OS} и \overline{SK} , определяем МДС возбуждения $F_{f(0,5)} = \overline{OK} = \overline{OL}$ при половинной нагрузке. Следовательно, при $I = 0,5$ ток возбуждения I_f определяется отрезком Ol' .

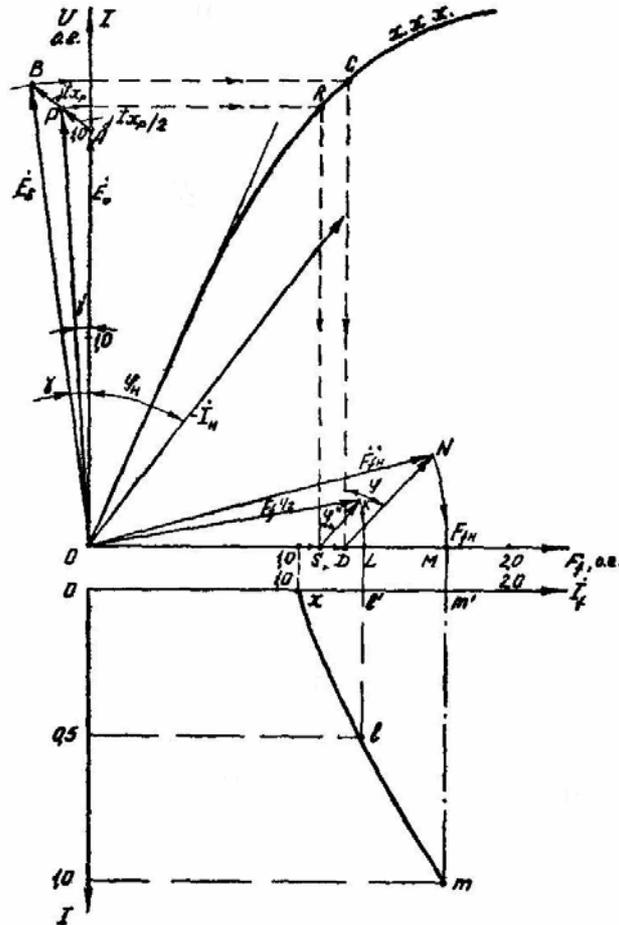


Рис. 5. Построение регулировочной характеристики по диаграмме Потье.

2.2. Построение внешней характеристики

Построение внешней характеристики представлено на рис. 6. Характеристика строится при $I_{fn} = 1,7 \text{ о.е.} = const$, $n = const$, $\cos \varphi_n = const$. При номинальной нагрузке, т.е. при $I_n = I \text{ о.е.}$, напряжение на зажимах генератора $U = 1 \text{ о.е.}$, чему соответствует ордината Om' . При холостом ходе, т.е. при $I = 0$ и $I_{fn} = const$, напряжение на зажимах генератора

(согласно построениям на диаграмме Потье) равно $E_f = 1,265$ о.е., чему соответствует на оси ординат отрезок ОК. Рассмотрим определение величины напряжения на зажимах синхронного генератора для промежуточного значения тока - например, для $I = 0,5$ о.е.

Из точки М под углом $\varphi'' = \varphi_n + \gamma'$ (см. рис. 6) откладываем вектор $0,5 \overline{F'_a} = 0,5 \overline{F_a} \cdot k_{ad}$, учитывающий действие реакции якоря при половинной нагрузке, а затем сдвигаем его параллельно самому себе до соприкосновения конца этого вектора с дугой NM. Полученную таким образом точку Рносим на характеристику холостого хода (точка R), затем на ось ординат (точка S). Радиусом OS проводим дугу. Вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении X_p при половинной нагрузке равен $0,5 j I_n X_p$, т.е. $0,5 \overline{BA} = \overline{P'A}$. Переносим вектор $\overline{P'A}$ параллельно самому себе до соприкосновения с дугой радиуса OS в точке Р'', а осью ординат в точке Т. Вектор \overline{OT} и определяет величину напряжения на зажимах синхронного генератора при половинной нагрузке. Следовательно, на внешней характеристике току якоря $I = 0,5$ о.е. соответствует напряжение, равное отрезку $OY' = OT$.

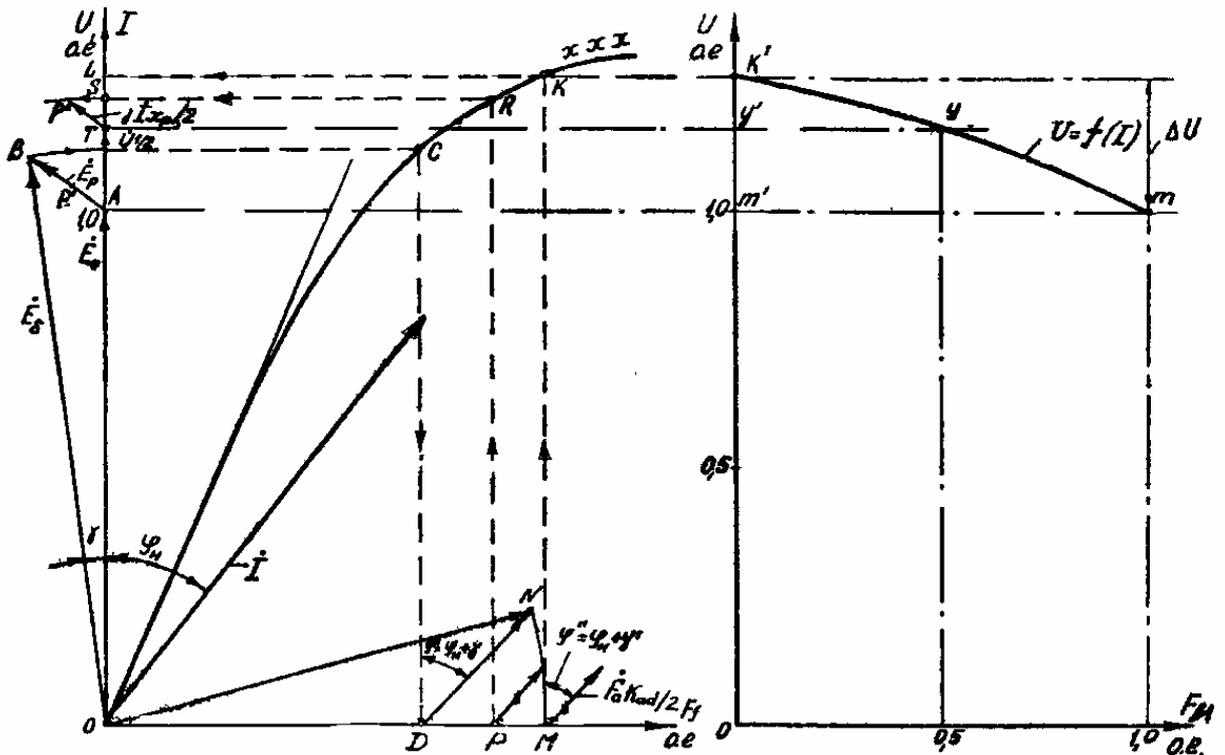


Рис 6. Построение внешней характеристики по диаграмме Потье

$$\cos \varphi = \frac{P_H}{U_H \cdot I} = \frac{0,8}{1 \cdot 1} \quad (14)$$

определяем значение $\cos \varphi$ и строим кривую $\cos \varphi = f(I)$. Величина минимального тока возбуждения $I_{f \min}$ (левая граница статической устойчивости) определена по (3):

$$E_{\min} = \frac{0,87}{\sin 54^\circ} \left[0,8 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{0,615} - \frac{1}{0,87} \right) \cdot \sin(2 \cdot 54^\circ) \right] = 0,62 \text{ о.е.}$$

$\theta_m = 54^\circ$ определен графически по рис. 9.

По характеристике холостого хода (рис. 7) находим для $E_{\min} = 0,62$ о.е.,

$I_{f \min} = 0,60$ о.е.

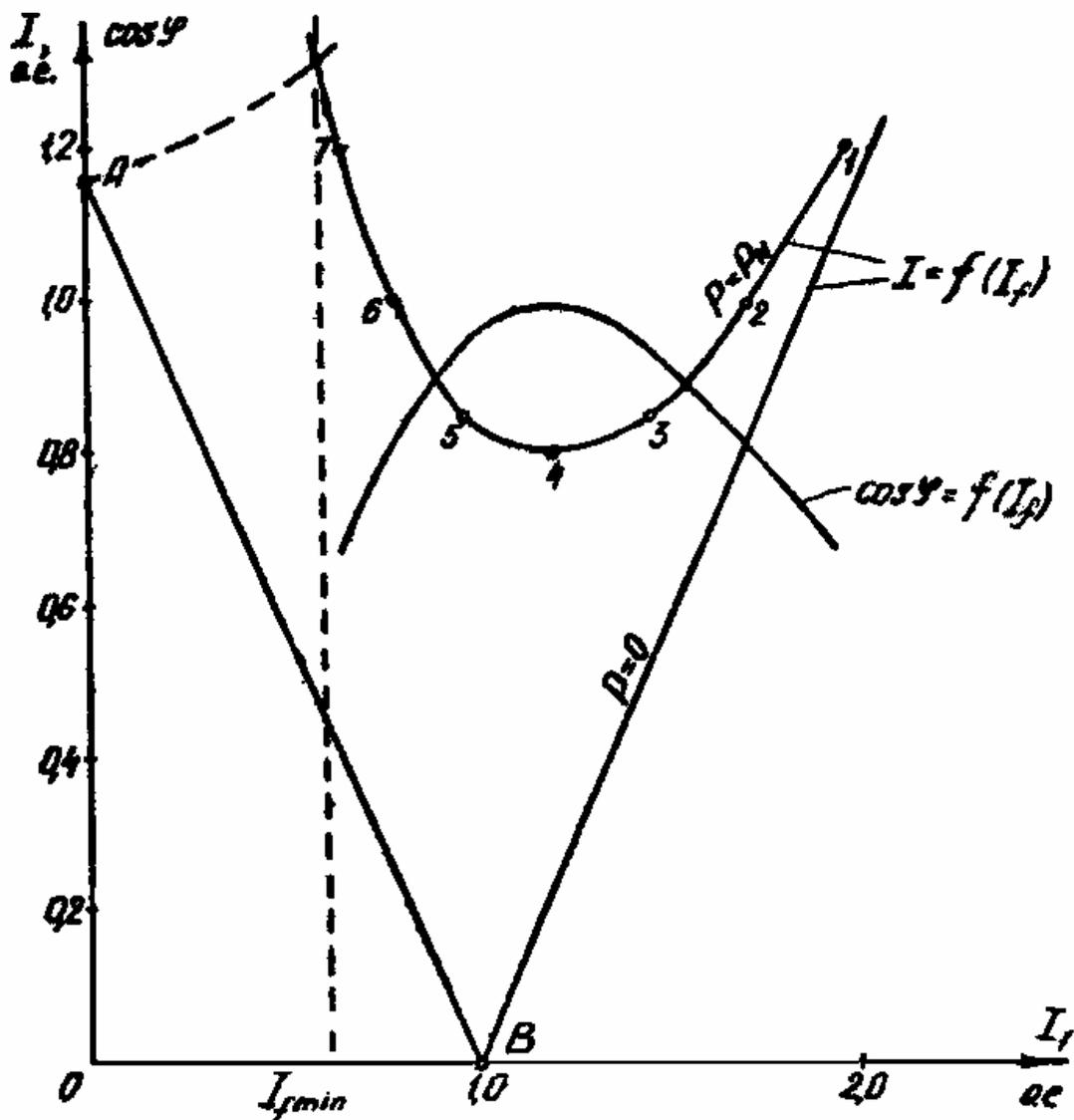


Рис. 8. U-образные характеристики.

2.4. Расчет и построение угловой характеристики и кривой коэффициента синхронизирующей мощности

Угловая характеристика и кривая коэффициента синхронизирующей мощности, рассчитанные при $U = U_n = const$, $f_n = const$, $I_{fn} = const$, изображены на рис. 9.

Расчет и построение проводится в относительных единицах. Согласно (5) активная мощность:

$$P = \frac{1 \cdot 1,7}{0,87} \sin \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,615} - \frac{1}{0,87} \right) \sin 2\theta = 1,954 \cdot \sin \theta + 0,238 \cdot \sin 2\theta.$$

Здесь, 1,7 – значение ЭДС E_f синхронной машины, определенное по спрямленной через номинальную точку характеристики холостого хода (см. рис. 4).

Расчет удобно свести в табл. 2 и, задаваясь значениями угла θ , определить значение $\sin \theta$ и $\sin 2\theta$, а затем рассчитать P и ее основную составляющую P_{oc} и реактивную P_d .

Таблица 2

№ п/п	θ , град	0	15	30	45	60	75	90
1.	$\sin \theta$	0	0,2588	0,5	0,707	0,866	0,966	1
2.	$\sin 2\theta$	0	0,5	0,866	1	0,866	0,5	0
3.	$P_{oc} = 1,954 \cdot \sin \theta$	0	0,509	0,977	1,38	1,69	1,89	1,954
4.	$P_d = 0,238 \cdot \sin 2\theta$	0	0,119	0,206	0,238	0,206	0,119	0
5.	$P = P_{oc} + P_d$	0	0,625	1,183	1,618	1,896	2,01	1,954

№ п/п	θ , град	105	120	135	150	165	180
1.	$\sin \theta$	0,966	0,866	0,707	0,5	0,2588	0
2.	$\sin 2\theta$	-0,5	-0,866	-1	-0,866	-0,5	0
3.	$P_{oc} = 1,954 \cdot \sin \theta$	1,89	1,69	1,38	1,977	0,506	0
4.	$P_d = 0,238 \cdot \sin 2\theta$	-0,119	-0,206	-0,238	-0,206	-0,119	0
5.	$P = P_{oc} + P_d$	1,77	1,484	1,142	0,771	0,387	0

Определение номинального угла θ_H проводится двумя способами:

а) графическое определение угла θ_H по угловой характеристике (см. рис. 9):

$$\text{при } P_H = \cos \varphi = 0,8 \text{ о.е.} \quad \theta_H = 19^\circ 30';$$

б) аналитическое определение по (8)

$$\theta_H = \arctg \frac{0,615 \cdot 0,8}{1 + 0,615 \cdot 0,6} = \arctg 0,3367 = 19^\circ 46'.$$

Максимальный угол θ_m при номинальном возбуждении определяется графически как абсцисса точки М угловой характеристики (рис. 9): $\theta_m = 75^\circ$.

Максимальная мощность при номинальном возбуждении и номинальном напряжении определяется как ордината точки М угловой характеристики (рис. 9): $P_m = 2,01$ о.е.

Кривая коэффициента синхронизирующей мощности $P_s = f(\theta)$ рассчитывается аналитически по (10) и наносится на один график с угловой характеристикой (рис. 9)

$$P_s = 1,954 \cdot \cos \theta + 0,119 \cdot \cos 2\theta.$$

Расчет сведен в табл. 3.

Таблица 3

№ п/п	θ , град	0	15	30	45	60	75	90
1.	$\cos \theta$	1	0,966	0,866	0,707	0,5	0,2588	0
2.	$\cos 2\theta$	1	0,866	0,5	0	-0,5	-0,866	-1
3.	$1,954 \cdot \cos \theta$	1,954	1,89	1,69	1,38	0,977	0,506	0
4.	$0,119 \cdot \cos 2\theta$	0,119	0,103	0,059	0	-0,059	-0,103	-0,119
5.	P_s	2,073	1,993	1,749	1,38	0,918	0,403	-0,119

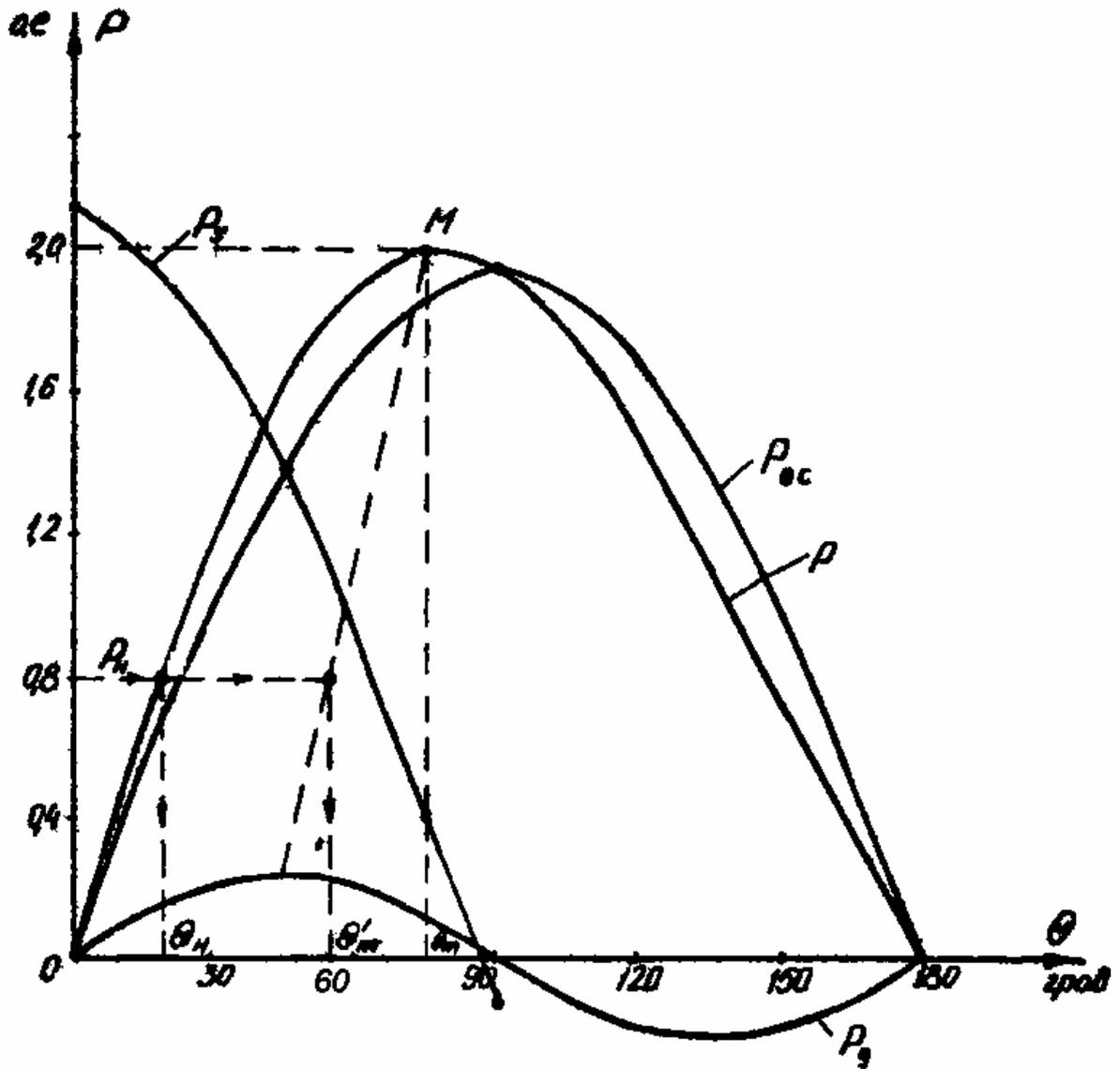


Рис. 9. Угловая характеристика.

Коэффициент статической перегружаемости W_{Π} определяется по формуле (9):

$$W_{\Pi} = \frac{P_m}{P_H} = \frac{2,01}{0,8} = 2,51.$$

На основании проведенных расчетов и графических построений определяем следующие режимные параметры гидрогенератора:

Номинальная МДС возбуждения

$$F_{\text{н}} = 1,7 \text{ о.е.}$$

Номинальное изменение напряжения в % - $\Delta U_H = 26,5\%$.

Минимальное значение тока возбуждения при номинальной нагрузке

$$I_{f \min} = 0.54 \text{ о.е.}$$

Номинальное значение угла нагрузки

$$\theta_n = 19^\circ 30'.$$

Максимальное /критическое/ значение угла нагрузки

$$Q_M = 75^\circ.$$

Коэффициент статической перегружаемости

$$W_n = 2,51.$$

Приведенные данные показывают, что рассчитанный гидрогенератор удовлетворяет требованиям ГОСТ 5616–8IE.

Литература.

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. - Ч.2 -Л.Энергия, 1973. -648 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины ю-Энергия,1980, -928 с.
3. Ахматов М.Г. Синхронные машины.Специальный курс:Учеб.пособие для вузов по спец. "Электрические машины". -М.:Высш.шк.,1984.-135 с.,ил.
4. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш.техн.учебн.заведений.Изд.2-е, перераб. и доп. Л.,Энергия, 1974.-840 с.,ил.
5. Абрамов А.И., Иванов-Смоленский А.В. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. - М.:Высш.шк.1978.-372 с.
6. Осин И.И., Шакарян Ю.Г. Электрические машины:Синхронные машины:Учеб.пособие для вузов по спец. "Электромеханика"/Под ред.И.П.Копылова. - Высш.шк.,1990.-304 с.
7. Копылов И.П. Электрические машины: Учеб.для вузов. - 2-е изд.,перераб.-М.:Высш.шк. Логос;2000. - 607 с.
8. Суханов Л.А., Мягкова Г.П. Основные параметры отечественных гидрогенераторов. //Электротехническая промышленность.Сер.01,Электрические машины. Обзор. информ.- 1986 г. - Вып.2 /12/. -52 с.
9. Серова Л.М., Серов А.Е. Проектирование синхронного гидрогенератора, Методическое руководство к курс. проект. Благовещенск, БТИ, 1992.-84 с.

По данным [8] приводятся основные параметры отечественных гидрогенераторов, установленных на 51 гидроэлектростанции.

В таблице приняты обозначения

для гидрогенераторов:

В – вертикальный.

Г – генератор.

С – синхронный.

Числитель дроби – диаметр сердечника статора, см.

Знаменатель – активная длина, см.

Последняя цифра – число полюсов машины.

Тип исполнения генератора:

З – зонтичный.

П – подвесной.

Для гидротурбин:

ПЛ – поворотно-лопастная.

РО – радиально-лопастная.

Д – диагональная.

По колонкам таблицы:

S – мощность на полюс, мВА.

S_n – номинальная мощность машины, мВА.

U_n – номинальное напряжение, кВ.

$\cos \varphi$ - коэффициент мощности.

n – частота вращения, об/мин.

K_u – коэффициент угонной частоты вращения.

τ - полюсное деление, м.

l_t – длина сердечника статор, м.

A – линейная нагрузка, А/см.

B_δ - магнитная индукция в зазоре, Тл.

q – число пазов на полюс и фазу.

H_j – инерционная постоянная ротора, с.

X_d – синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси, о.е.

X_d' - переходное синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси, о.е.

S_Σ – коэффициент использования активного объема машины, кВА*мин/куб.м.

g_0 – относительная масса машины, кг/кВА.

F_n – нагрузка на подпятник в номинальном режиме агрегата, т.

η – расчетный КПД гидрогенератора в номинальном режиме, %.

P_a – потери в стали спинки сердечника статора %

P_z – потери в стали зубцов сердечника статора %

P_{f_0} – добавочные потери на поверхности полюсных наконечников от зубчатости статора %

P_T – добавочные потери в торцевых нажимных от зубчатости статора %

$p_{ст}$ – потери в стали при холостом ходе %

p_{m1} – омические потери в обмотке статора %

p_f – добавочные потери в обмотке статора от вихревых токов %

p_t – добавочные потери в зубцах статора от третьей гармоники индукции распределения в воздушном зазоре машины %

p_{pz} – добавочные потери на поверхности наконечника от зубцовых намагничивающих сил %

p_{ph} – добавочные потери на поверхности наконечника от высших гармоник намагничивающих сил обмотки статора %

$p_{ед}$ – добавочные потери в нажимных плитах статора и щитах %

p_d – добавочные потери статора %

$p_{кз}$ – потери короткого замыкания %

p_e – потери на возбуждение %

p_v – потери на вентиляцию %

p_R – потери на трение в подшипниках и подпятниках %

p_{v+R} – суммарные потери на трение и вентиляцию %

Σp – суммарные потери %

η – коэффициент полезного действия %