

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН.

Ташкентский Государственный Технический Университет  
им. Абу Райхана Беруни

Методические указания  
к практическим занятиям по дисциплине  
«Вопросы эксплуатации электрических  
станций и подстанций»

для бакалавров специальности  
5520200 - «Электроэнергетика»

Ташкент - 2007.

Методические указания составил *Григорьев Ю. А.*

Данные методические указания позволяют более глубоко изучить работу генератора в различных режимах в зависимости от параметров  $P$ ,  $Q$ ,  $I_f$ , а также получить практические навыки в построении круговой диаграммы.

Методические указания утверждены

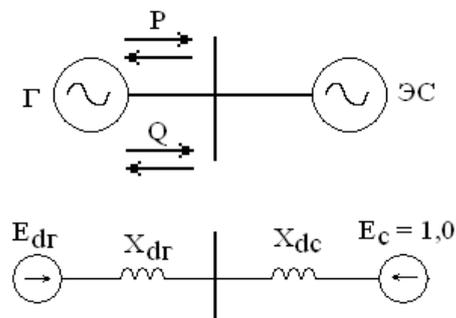
Методическим советом ЭФ ТашГТУ

.....200.....

## Программа выполнения работ.

1. Особенности работы ТГ в режиме СК.
2. Особенности работы ГГ в режиме СК.
3. Ограничение режимов работы генератора в режиме СК.
4. Составляющие потерь активной мощности, обусловленные реактивной нагрузкой генератора.

Схема выдачи (потребления) активной и реактивной мощности:



Примечание: 1)  $X_{d\Sigma} = X_{dr} + X_{dc}$ ;

2)  $X_{dc}$  состоит из суммы сопротивлений от ЭС до Г.

Отчет должен содержать:

1. Построение круговой диаграммы генератора согласно заданному варианту.
2. Построение векторных диаграмм:
  - а)  $Q = \text{var}$ ,  $P = \text{var}$ ,  $I_f = \text{const}$ ;
  - б)  $Q = \text{var}$ ,  $P = \text{const}$ ,  $I_f = \text{var}$ ;
  - в)  $Q = \text{const}$ ,  $P = \text{var}$ ,  $I_f = \text{var}$ ;

## **1. Работа турбогенератора в режиме синхронного компенсатора с присоединенной турбиной.**

Работа генератора в режиме синхронного компенсатора с присоединенной турбиной возможна в том случае, если турбина допускает длительный беспаровой режим (без повышения температуры отдельных элементов до недопустимых значений).

При работе турбогенератора в режиме синхронного компенсатора, с присоединенной турбиной, турбина мощностью более 50 МВт не может работать длительное время при открытии направляющего аппарата близком к холостому ходу. При полностью закрытом направляющем аппарате, вращение паровой турбины со стороны генератора, перешедшего в двигательный режим, может вызвать перегрев хвостовой части турбины. До 3-х минут турбогенератор может работать электродвигателем с присоединенным валом паровой турбины без пропуска пара для охлаждения. При длительной работе турбогенератора в качестве синхронного компенсатора турбина должна быть отсоединена от генератора.

В настоящее время широко практикуется перевод турбогенераторов в режим синхронного компенсатора без отсоединения турбин. Турбогенераторы мощностью 50 МВт и выше используются в режиме синхронного компенсатора с отсоединением генераторов от турбин. Турбогенераторы мощностью до 6 МВт переводятся в режим синхронного компенсатора без расцепления с турбиной. Опыт перевода более мощных турбогенераторов в режим синхронного компенсатора без отсоединения их от турбины еще мал.

Для обратного перевода агрегата в генераторный режим требуется восстановить жесткое соединение валов, на что затрачивается много времени. Поэтому на станциях, где часто турбогенератор работает в режиме синхронного компенсатора однажды собранную схему оставляют. В покрытии максимума активной нагрузки такой генератор не участвует.

## **2. Перевод гидрогенератора в режим синхронного компенсатора.**

Генераторы по своей конструкции могут работать в режиме синхронных компенсаторов только с присоединенной гидротурбиной. Перевод гидрогенераторов в режим синхронных компенсаторов может производиться без остановки агрегатов и не требует никаких переключений в электрической схеме. При наличии воды, для покрытия дефицита реактивной мощности энергосистем, свободные гидрогенераторы используются в качестве синхронных компенсаторов. Если воды недостаточно, то работа гидрогенератора в компенсаторном режиме производится при непосредственном соединении с турбиной, но с обязательным освобождением рабочего колеса турбины от воды. Если в рабочем колесе остается вода, то рабочее колесо будет перемалывать воду, на что потребуется большая активная мощность, получаемая генератором от системы.

При переводе гидрогенератора в режим синхронного компенсатора в тех случаях, когда рабочее колесо турбины расположено выше уровня нижнего бьефа, необходимо осуществить срыв вакуума впуском воздуха из атмосферы в область рабочего колеса через клапан срыва вакуума.

Процесс срыва вакуума производится в следующей последовательности:

1. Агрегат, работающий в сети, разгружается от активной нагрузки до полного закрытия направляющего аппарата без отключения от сети. Генератор начинает работать двигателем потребляя активную мощность из сети.

2. В камеру рабочего колеса турбины впускается атмосферный воздух через реконструированный клапан срыва вакуума. Контроль за состоянием турбины и ее обслуживанием при работе агрегата в режиме синхронного компенсатора остаются теми же, что и при работе в генераторном режиме. После срыва вакуума увеличением возбуждения генератор загружается реактивной нагрузкой.

Когда рабочее колесо гидротурбины расположено ниже уровня воды в нижнем бьефе, следует отжать воду впуском в область рабочего колеса воздуха под давлением от специальных ресиверов.

Освобождение рабочего колеса от воды путем отжатия ее производится в следующей последовательности:

а) после разгрузки агрегата от активной нагрузки и закрытия направляющего аппарата, в камеру рабочего колеса впускается сжатый воздух от ресивера. Величина создаваемого в камере избыточного давления должна обеспечить снижение уровня воды до отметки нижнего торца рабочего колеса турбины;

б) после освобождения рабочего колеса от воды, что определяется по уменьшению потребляемой активной мощности из сети, впуск воздуха прекращается.

Утечки воздуха из камеры рабочего колеса необходимо восполнять с помощью компрессоров, которые включаются в работу периодически при падении давления в камере. Наблюдение за давлением ведется по манометру.

В конструкции турбины должны быть выполнены уплотнения для поддержания давления воздуха.

### **3. Ограничение режимов работы генератора в режиме компенсатора.**

Как и любая синхронная машина, синхронный генератор может работать в режиме генератора или электродвигателя как с перевозбуждением, так и с недовозбуждением. Известно, что при работе машины в генераторном режиме активная мощность всегда выдается в сеть (положительное направление мощности), а при работе в качестве двигателя

машина получает активную мощность из сети (отрицательное направление мощности). Реактивная мощность выдается в сеть при перевозбуждении машины (положительный знак мощности) и потребляется из сети при недовозбуждении (отрицательный знак мощности). При графическом изображении мощности на диаграмме синхронной машины вектор полной мощности  $S$  может проходить в любом из четырех квадрантов тригонометрического круга.

На рисунке 1 изображена диаграмма допустимых мощностей синхронного генератора с учетом ограничений режимов работы генератора и турбины.

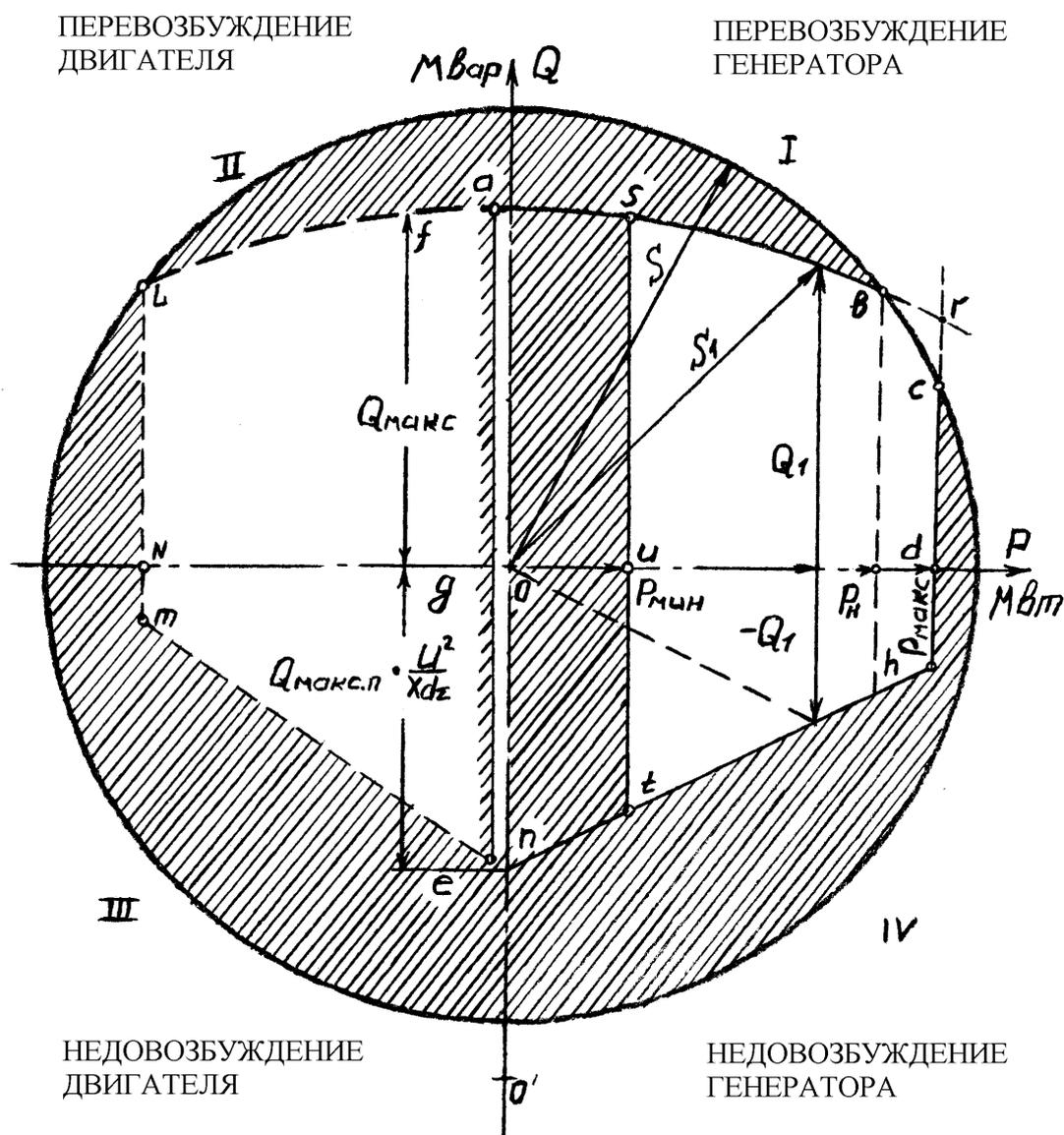


Рис.1 Круговая диаграмма допустимых мощностей синхронного генератора.

Внешней границей диаграммы является окружность радиусом  $S_n$ , учитывающая ограничение нагрузки статора генератора по полной мощности. Внутри этой окружности построены границы допустимых нагрузок с учетом ограничений мощности турбины (ак-

тивная мощность  $P$ ) и тока ротора генератора (реактивная мощность  $Q$ ). По условиям работы паротурбины ограничиваются величины максимально и минимально допустимых активных нагрузок  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$ . Для гидротурбины не всегда ограничивается минимальная нагрузка, но имеют место ограничения при средних нагрузках, связанные с кавитацией турбины (на диаграмме эти ограничения не показаны). Таким образом, зона допустимых режимов работы агрегата по активной мощности с учетом ограничений нагрузок паротурбины находится в пределах от  $P_{\min}$  до  $P_{\max}$ . Если генератор имеет необходимые устройства для перевода в режим синхронного компенсатора, то появляется еще одна зона допустимых режимов: между линией нулевой нагрузки  $Q=0$  (при  $P=0$ ) и линией  $f-g-e$ . Ширина этой зоны определяется величиной потерь активной мощности в агрегате при компенсаторном режиме зависящей от реактивной нагрузки генератора. Поэтому линия  $f-g-e$  – кривая. Мощность, покрывающая эти потери, поступает из сети в генератор. На насосно-аккумулирующих ГЭС, в период зарядки гидроаккумуляторов, турбины могут работать в качестве насосов, а генераторы - в качестве их синхронного электропривода. Зона режимов работы таких гидрогенераторов на рисунке 1 обозначена пунктирными линиями (a-l-k-m-n).

По условиям нагрева ротора синхронного генератора ограничивается максимально допустимая величина реактивной мощности, выдаваемая в сеть при работе генератора с перевозбуждением.

Ограничение реактивной мощности генератора в зависимости от его активной нагрузки может быть определено графически. Ниже приводится способ графического построения кривой  $ab$  ограничения реактивной мощности генератора.

На рисунке 2 построена кривая  $ab$  для генератора:  $S_H=90$  МВА,  $\cos\varphi_H=0.8$ ,  $X_d=0.9$ .

**Порядок построения:**

- 1) из начала координат  $O$  проводим дугу окружности радиусом  $S_H$ ;
- 2) по оси абсцисс откладываем  $P_H=S_H \cdot \cos\varphi_H$  ;
- 3) определяем точку  $b$  на дуге  $S_H$ .

Эта точка соответствует номинальному режиму работы генератора, то есть номинальным токам статора и ротора при номинальном напряжении на выводах генератора.

4. по оси ординат вниз откладывают отрезок  $OO' = OK_3 \cdot S_H = \frac{S_H}{X_{d0}} = \frac{90}{0.9} = 100 \text{ МВА} .$

5. Из точки  $O'$ , как из центра, проводят окружность радиусом  $O'b$  и получаем искомую кривую  $ab$ .

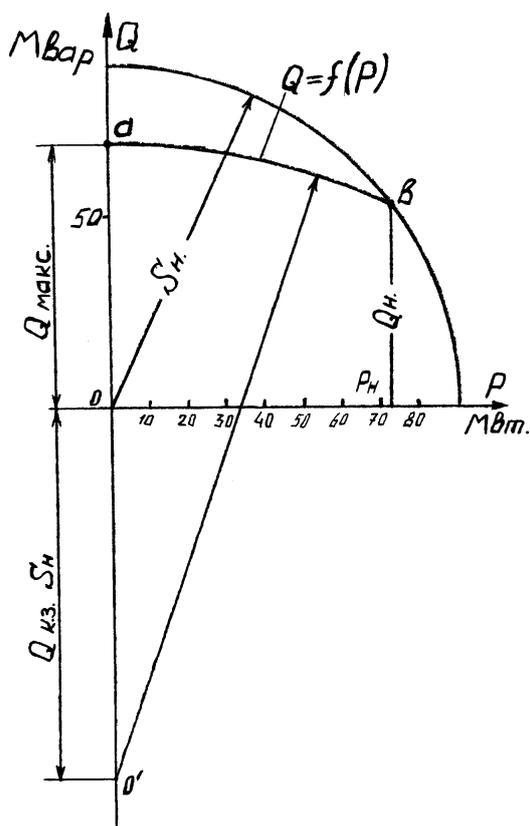


Рис. 2 Графический расчет ограничения реактивной мощности генератора в зависимости от активной мощности.

Таким же путем строится кривая максимально допустимой реактивной мощности и во втором квадранте диаграммы.

Величина максимально допустимой реактивной мощности, потребляемой генератором из сети при работе его с недовозбуждением ограничивается по условиям устойчивой параллельной работы недовозбужденного генератора в системе. Поэтому граничные значения реактивной мощности, потребляемой генератором из сети в режиме недовозбуждения определяются устойчивостью электрических систем. Пределы устойчивой работы зависят от параметров данного генератора и электрической системы, а также от способа регулирования возбуждения. При работе станции на шины бесконечной мощности определение предела передаваемой мощности генератора в режиме недовозбуждения производится по формуле идеального предела мощности при постоянной синхронной ЭДС, то есть при отсутствии автоматического регулирования возбуждения генераторов системы:

$$P_0 = \frac{E_d \cdot U}{X_d} \quad (1),$$

где  $X_{d\Sigma}$ -синхронной индуктивное сопротивление генераторов станции совместно с внешним сопротивлением  $X_c$  от шин генераторного напряжения до шин системы бесконечной мощности, на которой поддерживается напряжение  $U$ .

Синхронная ЭДС с учетом отрицательного знака реактивной мощности в режиме недовозбуждения генератора определяется из выражения:

$$E_d = \sqrt{\left(U - \frac{Q \cdot X_{d\Sigma}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P \cdot X_{d\Sigma}}{U}\right)^2} \quad (2).$$

Значение этой ЭДС, получаемое из выражения (1) идеального предела мощности, равно  $E_d = \frac{P_0 \cdot X_{d\Sigma}}{U}$ , и при запасе устойчивости 15% равно  $E_d = \frac{1,15 \cdot P_0}{U} \cdot X_{d\Sigma}$  (3).

Решая совместно уравнения (2) и (3) получим следующее выражение для реактивной мощности генератора (или станции) включенного на шины неизменного напряжения  $U$

энергосистемы за сопротивлением  $X_{d\Sigma}$ :  $Q = \frac{U^2}{X_{d\Sigma}} - 0,566 \cdot P_0$  (4), где  $Q$  – предельная величина реактивной мощности генераторов в режиме недовозбуждения при заданной величине активной нагрузки станции  $P_0$ . При  $P_0=0$  получается максимальное значение реактивной мощности, потребляемой генератором в режиме холостого хода или в режиме компенсатора (точка n на рисунке 1):  $Q_{\max} = \frac{U^2}{X_{d\Sigma}}$  (5).

Подставив в выражение (4) значение  $Q=0$ , находим (за пределами рисунка) точку пересечения прямой линии  $Q=f(P_0)$ , определяемой выражением (4), с осью абсцисс:

$$P_0 = \frac{U^2}{0,566 \cdot X_{d\Sigma}} \quad (6).$$

Отрезок  $ch$  прямой, проведенной через полученные две точки  $g$  и  $d$ , является линией ограничения реактивной мощности генератора в режиме недовозбуждения по условиям устойчивости (с коэффициентом запаса 1,15). Построение линии ограничения реактивной мощности генератора насосно-аккумулирующей ГЭС, работающего в режиме недовозбуждения синхронного двигателя, производится по этим же формулам. Приведенные формулы справедливы для генераторов, работающих в различных режимах без АРВ. Если же генератор снабжен АРВ пропорционального действия, приспособленным для регулирования недовозбужденных синхронных машин, то в этих формулах вместо значения  $X_d$  подставляется значение переходного сопротивления  $X'd$ .

#### 4. Потери активной мощности, обусловленные реактивной нагрузкой генераторов.

В энергосистемах основным источником реактивной мощности являются генераторы.

Если в зарубежных энергосистемах электростанции производят 30-50% всей потребляемой реактивной мощности, то в энергосистемах стран СНГ доля электростанций в балансе реактивной мощности составляет 70-90%. Поэтому часть генераторов пиковых станций не останавливается в резерв, а работает специально для покрытия реактивной нагрузки потребителей. На пиковой станции различают два вида источников реактивной мощности: совмещенные и специальные. Совмещенными источниками являются те генераторы, которые вырабатывая активную мощность производят также реактивную как попутный продукт.

Потери активной мощности на производство реактивной в совмещенных источниках невелики: они равны 0,003-0,01 кВт/кВАр. В технико-экономических расчетах ими обычно пренебрегают.

Специальные источники реактивной мощности – это конденсаторы, асинхронные компенсаторы и генераторы, работающие в данный момент только для выработки реактивной мощности. Потери в этих генераторах, механические потери в турбинах и расходы энергии на собственные нужды обусловлены производством недостающей реактивной мощности.

В этом случае удельные потери составляют 0,03÷0,06 кВт/кВАр, то есть в 6÷10 раз больше, чем в совмещенных источниках. Потери мощности в генераторе при любой его нагрузке состоят из трех основных слагающих:

- 1) постоянные потери  $\Delta P_{\text{пост}}$  (на трение, на перемагничивание, на вентиляцию);
- 2) переменные потери в статоре  $\Delta P_{\text{С}}$ , пропорциональные квадрату тока в обмотке статора;
- 3) переменные потери в роторе  $\Delta P_{\text{В}}$ , пропорциональные квадрату тока в роторе (возбуждение).

Таким образом, суммарные потери в номинальном режиме равны:

$$\Delta P_{\text{ГН}} = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{СН}} + \Delta P_{\text{ВН}}.$$

При нагрузке генератора  $S$  отличной от номинальной  $S_{\text{н}}$  потери равны:

$$\Delta D_{\bar{A}} = \Delta D_{i \bar{N} \bar{D}} + \Delta D_{\bar{N} i} \cdot \left(\frac{S}{S_f}\right)^2 + \Delta D_{\bar{A} i} \cdot \left(\frac{i_a}{i_{ai}}\right)^2;$$

Часть этих потерь связана с активной мощностью генератора, часть с реактивной.

### Варианты задания.

Вариант	Тип генератора	Sном, МВА	Pном, МВт	Uном, кВ	cosφ	Сопротивление генератора, *			ОКЗ, *	Запас устойчивости генератора	Система		
						X''d	X'd	Xd			Uс, кВ	L, кМ	Xс, Ом
1	T-12-2У3	15	12	10,5	0,8	0,114	0,174	1,85	0,658	1,22	35	10	5
2	T-20-2У3	25	20	10,5	0,8	0,131	0,2	2,07	0,6	1,18	35	20	8
3	TBC-32У3	40	32	10,5	0,8	0,143	0,238	2,458	0,488	1,15	110	40	4
4	ТВФ-63-2У3	78,75	63	10,5	0,8	0,136	0,202	1,513	0,756	1,1	110	60	4
5	ТВФ-120-2У3	125	100	10,5	0,8	0,192	0,278	1,907	0,499	1,25	110	50	0
6	ТВВ-160-2ЕУ3	188	160	18	0,85	0,213	0,304	1,713	0,615	1,17	220	80	0
7	ТВВ-200-2АУ3	235,3	200	15,75	0,85	0,18	0,272	2,1	0,572	1,16	220	100	2
8	СВ-420/60-24	10	8	6,6	0,8	0,27	0,27	1,02	1,32	1,15	110	50	8
9	СВ-546/80-36	15	12	6,6	0,8	0,38	0,38	1,09	1,82	1,19	35	17	6
10	СВ-800/76-60	18	14,5	10,5	0,8	0,27	0,28	0,998	1,52	1,21	35	22	10
11	СВ-600/110-40	25	20	10,5	0,8	0,24	0,22	0,95	1,24	1,24	110	35	12
12	СВ-800/105-60	30	24	10,5	0,8	0,2	0,3	1	1,1	1,2	220	110	0
13	СВ-850/120-60	40	32	10,5	0,8	0,23	0,31	0,82	1,42	1,23	110	55	0
14	СВ-840/130-52	50	40	15,75	0,8	0,23	0,31	0,64	1,78	1,19	220	85	0
15	СВ-850/190-40	100	90	13,8	0,9	0,22	0,34	1	1	1,2	220	90	1

### Список литературы:

1. Баркан Я. Д. «Эксплуатация электрических систем», Москва 1990г.
2. ПТЭ Электрических сетей России, Москва 2003г.
3. Мандрыкин С. А., Филатов А. А. «Эксплуатация и ремонт электрооборудования станций и систем», Москва 1990г.
4. Филатов А. А. «Оперативное обслуживание электрических ПС», Москва 1990г.
5. Учебная литература по ЭЧС.  
Авторы: Васильев А. А., Неклепаев Б. Н., Усов С. В.
6. Дорошев К. И. «Эксплуатация КРУ 6-220 кВ», Москва 1987г.