

Порядок построения диаграммы мощности синхронного генератора

Под **нормальным режимом работы** синхронных генераторов (СГ) подразумевается такой режим, при котором СГ может **длительно работать без ограничений**. Это, например, режим работы при номинальной нагрузке, при этом все параметры номинальные, и температуры обмоток ротора, статора, стали статора не выходят за допустимые нормированные пределы.

Изменение активной нагрузки производят за счёт изменения мощности первичного двигателя (дизеля, паровой или гидравлической турбины и т.п.), а изменение реактивной нагрузки – путём изменения тока возбуждения СГ.

В процессе эксплуатации СГ часто работают с коэффициентом мощности $\cos\varphi$, отличным от номинального значения. Поэтому правильное представление о допустимых нагрузках и определяющих их факторах при отклонении коэффициента мощности от номинального имеет большое значение.

При длительной работе СГ с $\cos\varphi$, отличающемся от номинального, нагрев обмоток ротора и статора не должен превышать температуры нагрева обмоток СГ при работе с номинальными параметрами.

Наиболее наглядное представление о возможных режимах работы СГ, с коэффициентом мощности отличающемся от номинального, даёт диаграмма мощности, представляющая собой зависимость длительно допустимой активной мощности от реактивной при различных значениях $\cos\varphi$.

В общем случае диаграмма мощности СГ строится для ненасыщенной машины и состоит из пяти зон:

- 1** – зона ограничения по нагреву обмоток статора;
- 2** – зона ограничения по нагреву обмоток ротора;
- 3** – зона ограничения по максимальной мощности первичного двигателя;
- 4** – зона ограничения по нагреву торцевых частей и крайних пакетов стали статора;
- 5** – зона ограничения по устойчивости генератора при параллельной работе с энергосистемой.

Одновременно могут изменяться несколько параметров СГ. Для начального анализа условно принимается, что температура охлаждающего агента $T_{охл} = const$, напряжение генератора $U_G = const$ и частота генератора $f = const$, а рассматривается только изменение *активной* и *реактивной* нагрузки и коэффициента мощности $\cos\varphi$.

Для этого строится диаграмма мощностей *ненасыщенного* генератора (т.е. когда магнитное сопротивление по продольной оси машины: $X_d = const$).

При построении диаграммы мощностей требуются следующие паспортные данные СГ:

- Полная мощность генератора $S_{ном}$
- Номинальное напряжение генератора $U_{ном}$
- Номинальная активная мощность генератора $P_{ном}$
- Номинальная реактивная мощность генератора $Q_{ном}$
- Номинальный коэффициент мощности генератора $\cos\varphi_{ном}$.

Ниже пошагово объясняется процесс построения диаграммы мощностей СГ.

Шаг 1. Чертим прямую горизонтальную линию и ставим на ней точку H . Из этой точки вправо по горизонтали откладываем в относительных единицах вектор напряжения генератора U (см. рис. 1).

Шаг 2. Из точки H вниз под углом $\varphi_{ном}$ к вектору напряжения генератора U чертим первую вспомогательную линию (показана на рис. 1 пунктирной линией зелёного цвета), на которой строим вектор тока генератора I . Угол φ между вектором напряжения U и вектором тока I генератора зависит от характера нагрузки. Номинальный угол $\varphi_{ном}$ определяется по значению номинального $\cos\varphi_{ном}$.

При чисто активной нагрузке: $\varphi = 0^\circ$. При чисто индуктивной нагрузке: $\varphi = -90^\circ$ (ток отстаёт от напряжения). При чисто ёмкостной нагрузке: $\varphi = +90^\circ$ (ток опережает напряжение). При смешанной нагрузке этот угол имеет промежуточное значение: $-90^\circ < \varphi < +90^\circ$

Шаг 3. Под прямым углом к первой вспомогательной линии чертим вторую вспомогательную линию (показана на рис. 1 пунктирной линией красного цвета), которая должна проходить через конец вектора напряжения генератора U .

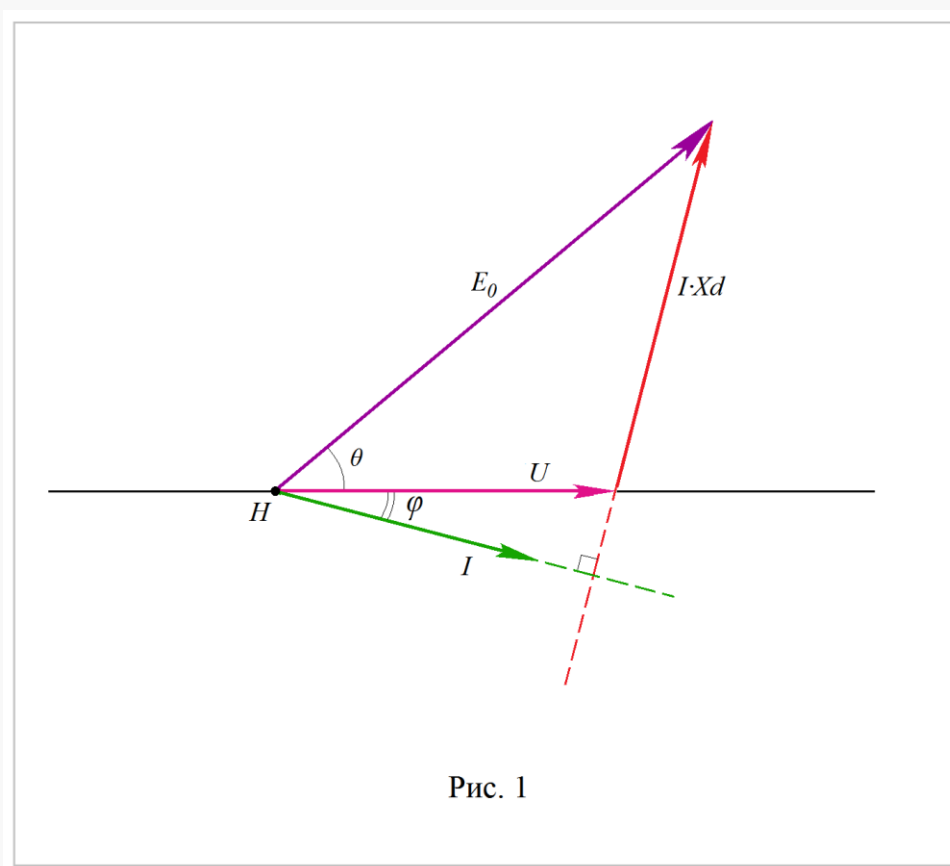
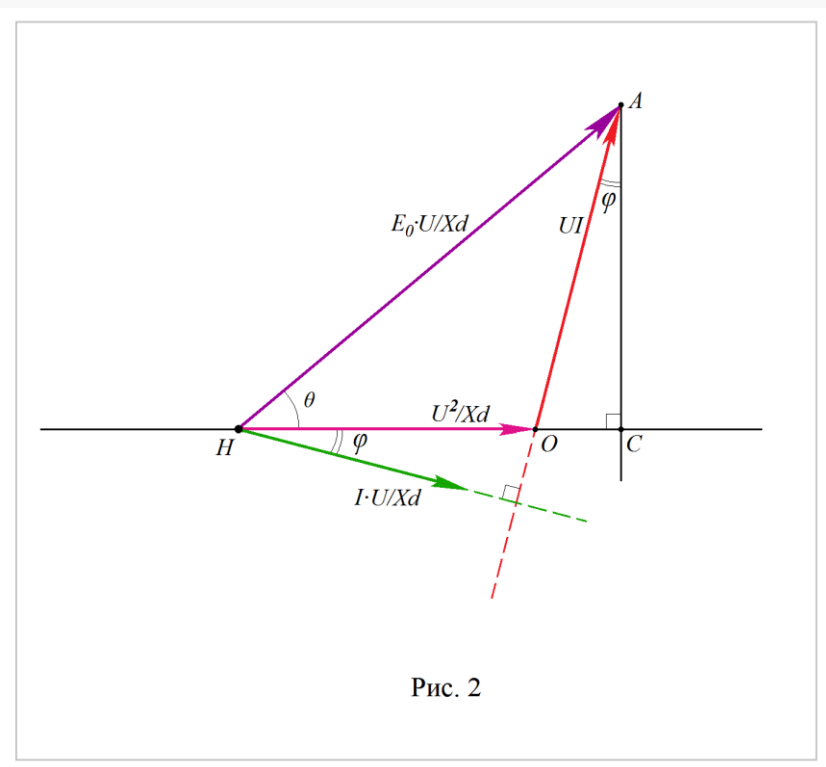


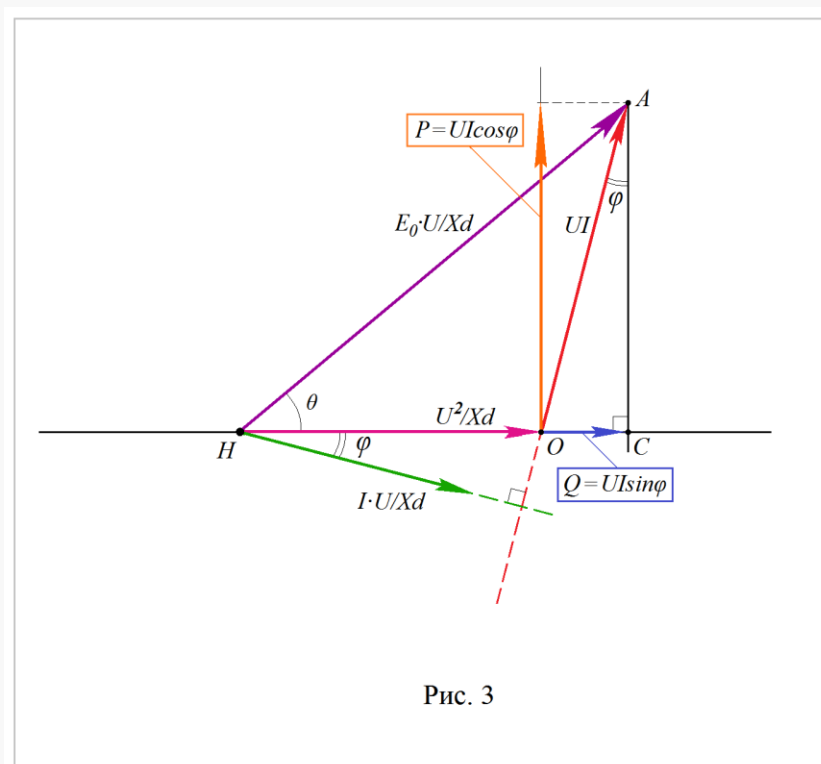
Рис. 1

Шаг 4. Под углом θ к вектору напряжения проводим прямую линию до пересечения со второй вспомогательной линией и получаем вектор э.д.с. генератора E_0 и вектор падения напряжения, который равен произведению тока на магнитное сопротивление $I \cdot X_d$ (рис. 1). Угол θ (угол сдвига между вектором напряжения U и вектором э.д.с. генератора E_0) определяется пространственным сдвигом между положением оси полюсов генератора и результирующим магнитным потоком. Этот угол называется **внутренним углом** синхронной машины. В режиме холостого хода синхронного генератора, а также при чисто реактивной нагрузке этот угол равен нулю: $\theta = 0^\circ$.

Шаг 5. Так как $U = const$ и $Xd = const$, то можно умножить все векторы диаграммы, показанной на рис. 1, на величину отношения: U/Xd . При этом все углы между векторами останутся прежними, а изменится только масштаб диаграммы (см. рис.2).



Шаг 6. Из точки A опускаем перпендикуляр к горизонтальной линии и в месте их пересечения наносим точку C . В результате мы получили прямоугольный треугольник OAC , в котором катет $AC = UI \cos \varphi$, а это есть не что иное, как **активная мощность** генератора $P = UI \cos \varphi$. Следовательно, второй катет OC – это **реактивная мощность** генератора, которая равна: $Q = UI \sin \varphi$ (см. рис. 3). Чертим через точку O вертикальную линию и строим на ней вектор активной мощности генератора P , а на горизонтальной оси строим вектор реактивной мощности генератора Q :

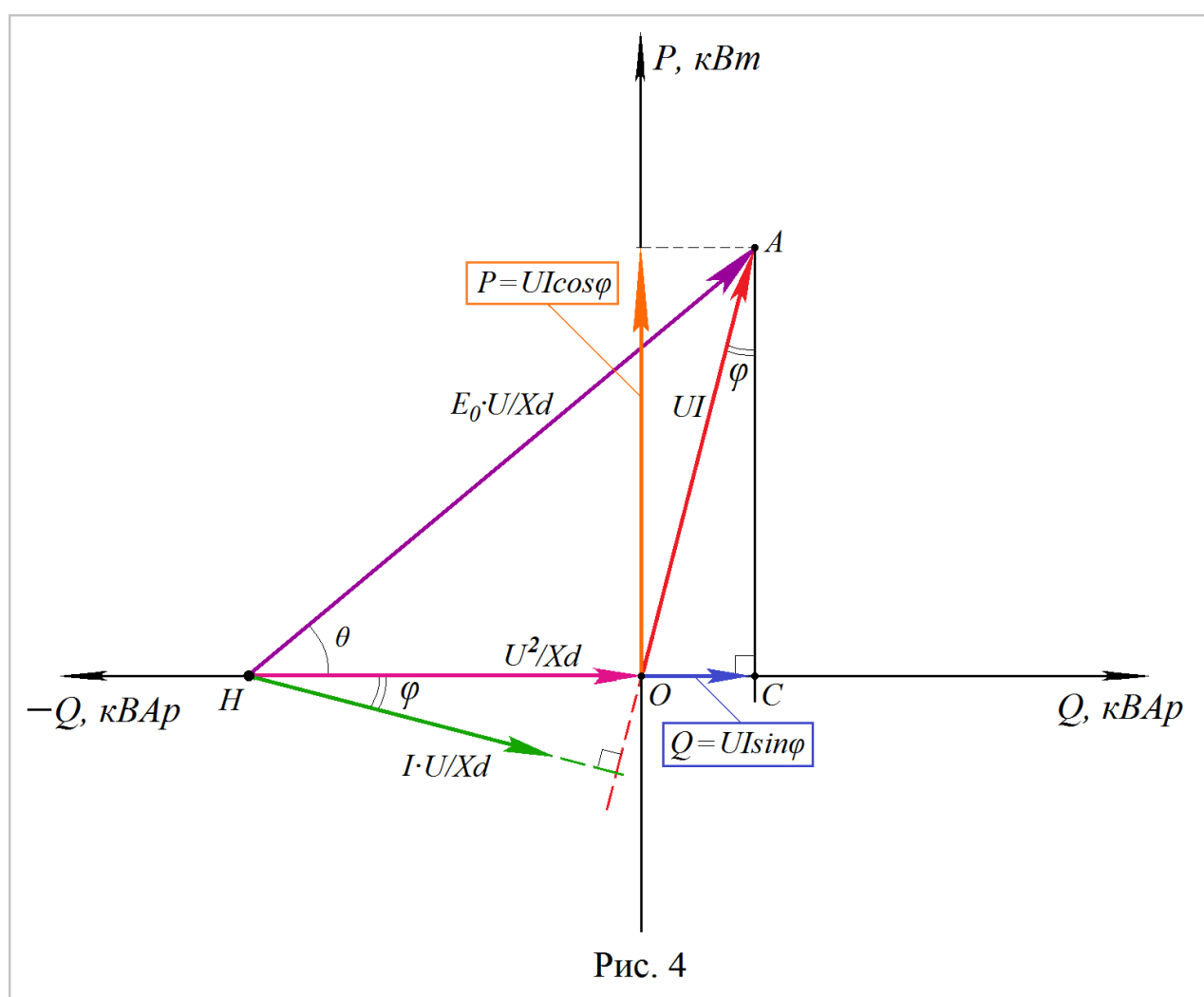


Шаг 7. Обозначим вертикальную ось, проведённую через точку O , как $P, \text{кВт}$. На этой оси строится активная составляющая вектора полной мощности генератора.

Шаг 8. Обозначим горизонтальную ось как $Q, \text{кВАр}$. На этой оси строится реактивная составляющая вектора полной мощности генератора.

Примечание: по ГОСТ 8.417-2002 «Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин», единица измерения «вольт-ампер реактивных» обозначается строчными буквами *вар*. Однако из уважения к великим учёным Вольту и Амперу мы будем обозначать эту единицу измерения с заглавными буквами: **ВАр**, а тысяча Вольт-Ампер реактивных, соответственно **кВАр**.

В результате этих незамысловатых построений мы получили графическую основу диаграммы мощностей синхронного генератора, которая показана на рис. 4:



Шаг 9. Для построения зоны ограничения по нагреву обмоток статора синхронного генератора (зона №1) чертим окружность с центром в точке O и радиусом OA :

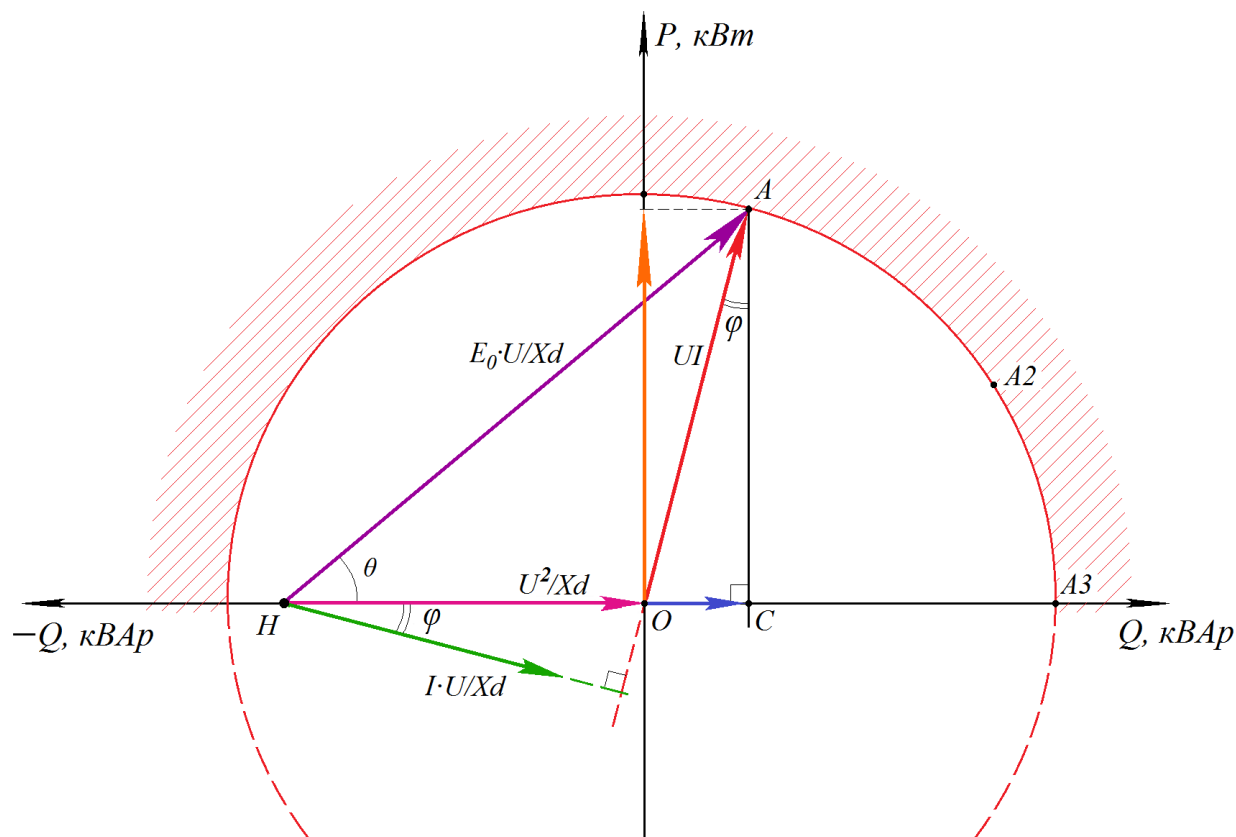


Рис. 5

Это зона означает, что полная мощность генератора $S = UI$ ни при каких обстоятельствах не должна выходить за пределы построенного круга!

Какой физический смысл имеет это ограничение? Для пояснения предположим, что наш генератор должен работать с нагрузкой, имеющей очень низкий коэффициент мощности, гораздо ниже номинального: $\cos\varphi \ll \cos\varphi_{\text{ном.}}$, т.е. работать где-то в точке **A2** на активно-индуктивную нагрузку с низким $\cos\varphi$. При этом активная мощность генератора должна быть **P2**, а реактивная мощность соответственно **Q2** (см. рис. 7).

Таким образом, режим работы синхронного генератора при $\cos\varphi < \cos\varphi_{ном}$ возможен, однако при этом его полная мощность будет ограничена нагревом обмоток ротора, поэтому при таких режимах необходимо соблюдение условия $I_{возб.} < I_{возб. ном.}$, т.е. чтобы ток возбуждения $I_{возб.}$ генератора ни в коем случае не превышал номинального значения! А это приводит к тому, что полная мощность генератора должна быть гораздо меньше номинальной: $S_2 < S_{ном}$, следовательно, и к.п.д. генератора при таких режимах будет очень низким.

Шаг 11. Следующее ограничение обусловлено мощностью первичного двигателя (зона № 3). При кажущейся простоте решения данного вопроса, здесь тоже возникает множество проблем как технического, так и экономического характера. От правильно выбранной мощности первичного двигателя зависит надёжная, устойчивая и экономичная работа всего агрегата в целом.

Для построения границы зоны № 3 необходимо определить отношение максимальной мощности первичного двигателя к полной мощности генератора. Вполне очевидно, что мощность первичного двигателя не должна быть меньше номинальной мощности генератора. Однако, она не должна быть слишком большой по экономическим соображениям. Желательно, чтобы мощность первичного двигателя соответствовала номинальной активной мощности генератора или была немного больше.

Поэтому, зная номинальную активную мощность генератора строим точку **B** на вертикальной оси (**P, кВт**), и перпендикулярно к ней проводим через эту точку горизонтальную прямую **F-B-A**, которая является граничной линией третьей зоны (см. рис. 8).

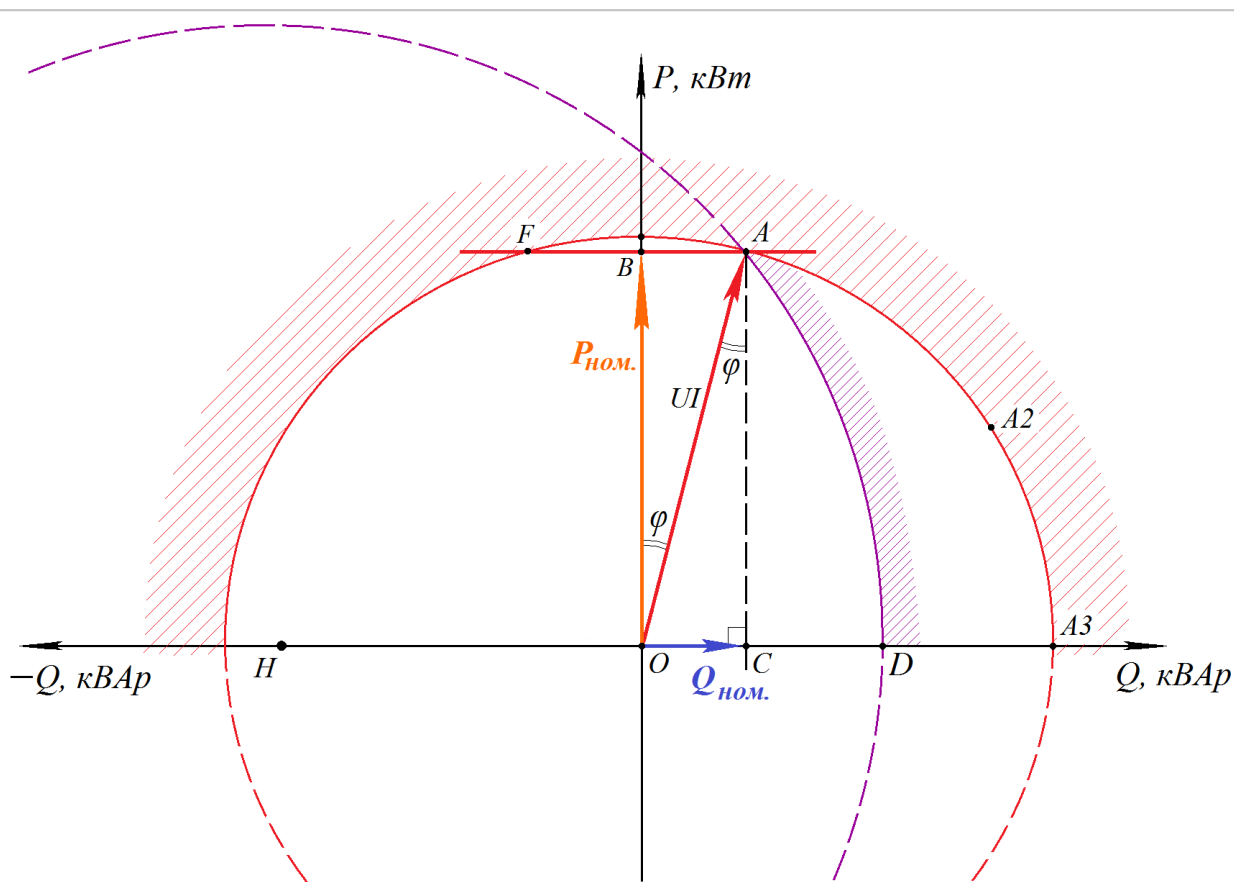


Рис. 8

Шаг 12. Следующее ограничение обусловлено нагревом торцевых частей ротора и крайних пакетов стали статора (зона № 4). Для построения границы этой зоны необходимо знать паспортные значения реактивной мощности, потребляемой генератором в режиме недовозбуждения, при соответствующих значениях выдаваемой активной мощности. Эти значения пересчитываются в относительные единицы и наносятся на диаграмму в виде точек. Соединив эти точки, получают кривую, которая является границей зоны № 4 (см. рис. 9).

В качестве примера возьмём значения реактивной мощности, потребляемой турбогенератором ТВВ-320-2 в режиме недовозбуждения, при соответствующих значениях выдаваемой активной мощности:

Таблица 1. Допустимая потребляемая реактивная мощность генератора в режиме недовозбуждения

| Тип генератора | Допустимая потребляемая мощность МВАр, при активной нагрузке, % $P_{ном}$ | | | | | |
|------------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 100 | 95 | 90 | 80 | 60 | 40 |
| ТВВ-320-2 | 80 | 88 | 95 | 108 | 125 | 135 |
| Отн. ед. | 0,226 | 0,249 | 0,269 | 0,306 | 0,354 | 0,382 |

На основании данных этой таблицы наносим на диаграмму точку № 1 при $P = 100\%$ от $P_{ном}$. При этом значение реактивной мощности составляет: $Q = 0,226$ отн. ед.

Затем наносим на диаграмму точку № 2 при $P = 95\%$ от $P_{ном}$. При этом значение реактивной мощности составляет: $Q = 0,249$ отн. ед.

Далее наносим на диаграмму точку № 3 при $P = 90\%$ от $P_{ном}$. При этом значение реактивной мощности генератора составляет: $Q = 0,269$ отн. ед.

Аналогично наносим на диаграмму точки № 4, № 5, № 6, № 7.

В результате соединения точек **1, 2, 3, 4, 5...** получаем кривую (на рисунке 9 показана синим цветом), которая является границей зоны № 4.

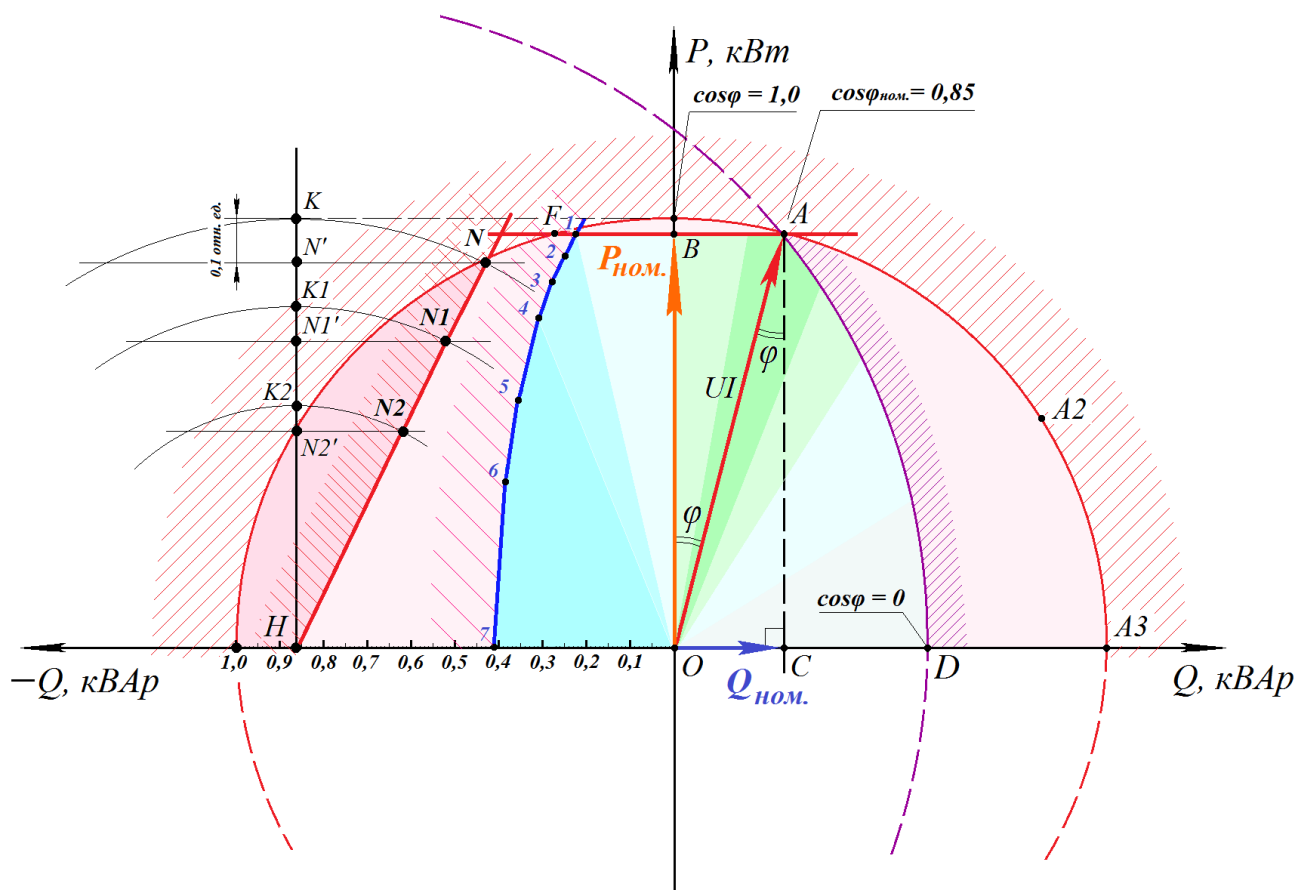


Рис. 10

В заключение убираем все лишние вспомогательные линии и получаем окончательный вариант диаграммы мощностей синхронного генератора, который представлен на рис. 11.

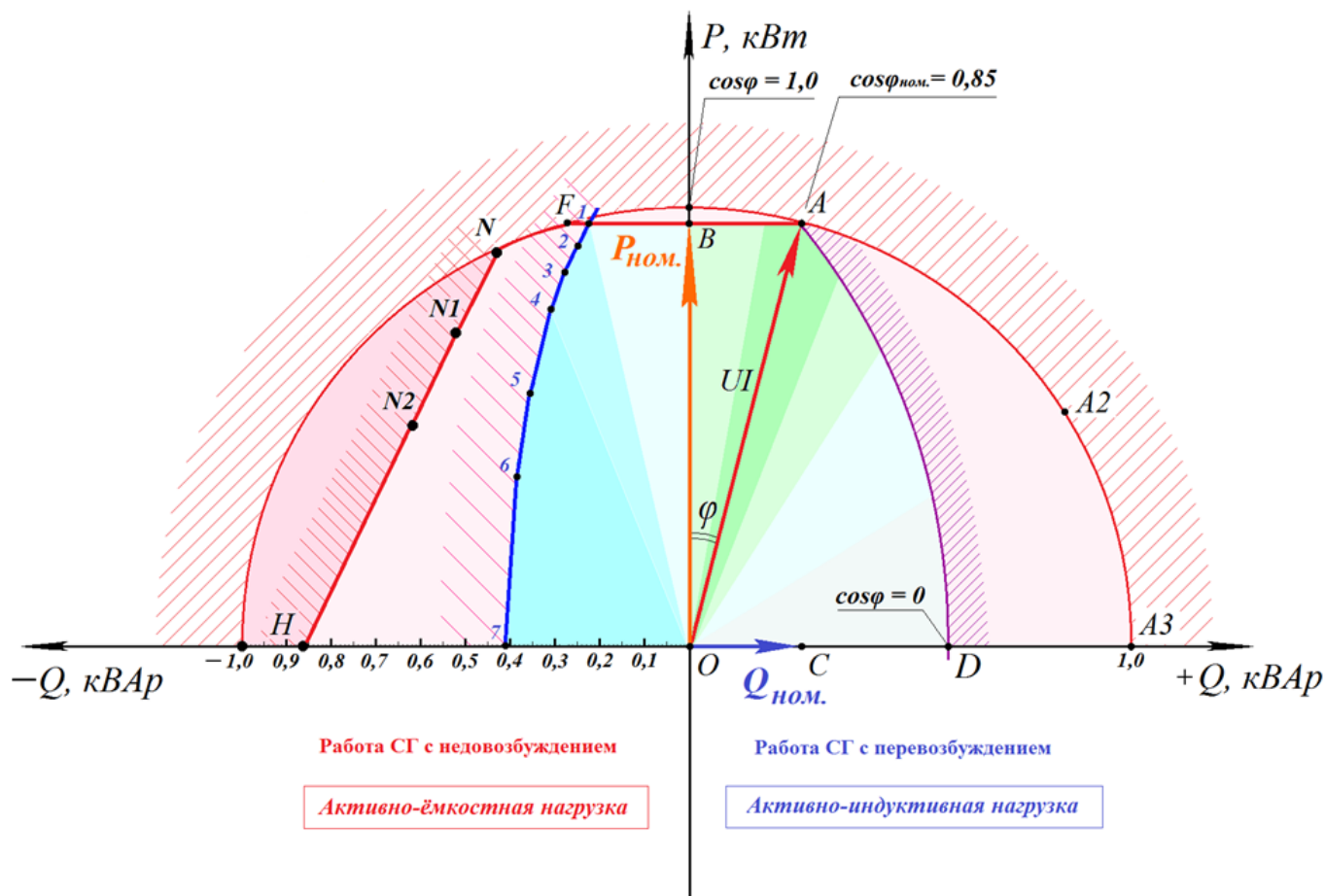


Рис. 11

На данной диаграмме:

- дуга **N-F-A-A1-A2-A3** – **Зона № 1** (ограничение по нагреву обмотки статора);
- дуга **A-D** – **Зона № 2** (ограничение по нагреву обмотки ротора);
- горизонталь **F-A** – **Зона № 3** (ограничение по мощности первичного двигателя);
- кривая синего цвета – **Зона № 4** (ограничение по нагреву торцевых частей и крайних пакетов стали статора при активно-ёмкостной нагрузке);
- линия **N-N1-N2-H** – **Зона № 5** (ограничение по устойчивости генератора при параллельной работе с энергосистемой).

Зона оптимальной работы синхронного генератора показана заливкой зелёного цвета.

Зоны, в которых длительная работа генератора не допускается, показаны заливкой розовых тонов.

Таким образом, на построенной диаграмме мощностей наглядно видно, что работа синхронных генераторов, оптимальная по всем параметрам, возможна лишь в небольшом секторе, ограниченном значениями $\cos \varphi$ близкими к номинальному значению $\cos \varphi_{ном.}$, т.е. при активно-индуктивном характере нагрузки в диапазоне $\cos \varphi = 0,8...0,9$, который выделен на диаграмме заливкой зелёного цвета.

Многие читатели могут задать вопрос, почему нежелательно, чтобы синхронный генератор работал в самом экономичном режиме при $\cos\varphi = 1,0$?

Ответ на этот провокационный вопрос можно найти в учебной литературе по устройству, принципу действия и эксплуатации синхронных генераторов. Не всё так просто, как может показаться на первый взгляд!

Литература:

1. Г.Н. Петров. **Электрические машины.** ч. II, Асинхронные и синхронные машины. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с., с черт.
2. Ю.А.Кулик. **Электрические машины.** – М.: Высшая школа, 1966. – 362 с., ил.
3. В.Е.Китаев, Ю.М.Корхов, В.К.Свирин. **Электрические машины. Часть II. Машины переменного тока.** – М.: Высшая школа, 1978. – 187 с., ил.
4. С.В.Усов, Б.Н.Михалев, А.К.Черновец и др. **Электрическая часть электростанций.** Учебник для вузов, – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 616 с., ил.
5. Д.Э.Брускин, А.Е.Зорохович, В.С.Хвостов. **Электрические машины и микромашины.** – М.: Высшая школа, 1990. – 528 с., ил.
6. А.В.Иванов-Смоленский. **Электрические машины.** Учебник для вузов в 2-х томах, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 532 с., ил.
7. Е.П.Брандина. **Электрические машины.** Письменные лекции. Примеры решения задач. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 152 с.
8. Ю.А.Макаричев, В.Н.Овсянников. **Синхронные машины.** (Учебное пособие) – Самара. Самарский государственный технический университет, 2010. – 156с., ил.