

УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЭС

ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем»

О.В. Захаркин, Е.Ю. Ивахненко

В статье получено аналитическое описание угловой характеристики мощности генератора простейшей ЭЭС при фиксированном значении реактивной мощности генератора, выполнен анализ предельных режимов работы генератора при закреплении различных значений его реактивной мощности, рассмотрены особенности процесса поиска предельного режима при смене статуса генераторного узла

Предельные режимы работы электроэнергетических систем (ЭЭС) принято подразделять на предельные по мощности и предельные по устойчивости режимы. Под предельными по мощности понимают режимы, в которых выдача мощности электростанций, передача мощности по линиям электропередачи и сечениям, прием мощности в узлы нагрузки ограничены пропускной способностью сетевых элементов ЭЭС. Под предельными по устойчивости понимают режимы, в которых выдача мощности электростанций ограничена условиями устойчивости параллельной работы синхронных машин, работающих на общую нагрузку. Определение параметров предельных режимов работы ЭЭС необходимо для диспетчерского ведения режимов, для настройки систем противоаварийного управления.

При определении предельных по мощности режимов используются более простые математические модели элементов системы, чем при определении предельных по устойчивости режимов. В частности, упрощенно учитываются синхронные машины, представляемые в виде узлов с постоянной активной мощностью и постоянным напряжением (так называемые, узлы $P-U$ типа) при нахождении реактивной мощности генераторов в пределах заданного диапазона регулирования. При соблюдении ряда условий [1] предельные по мощности режимы ЭЭС, определенные при такой математической модели, совпадают с предельными по апериодической устойчивости режимами.

С математической точки зрения предельные по мощности режимы соответствуют границе области существования решения системы нелинейных уравнений, описывающих установившиеся режимы ЭЭС. Граница области существования решения системы уравнений соответствует нулевому значению определителя матрицы Якоби (якобиана) этой системы уравнений.

На практике определение предельных режимов работы ЭЭС обычно осуществляется путем выполнения серии расчетов последовательно

утяжеляемых установившихся режимов с проверкой после каждого шага утяжеления определенных критериев, характеризующих существование и устойчивость полученного режима. В качестве критерия существования режима используется факт сходимости итерационного процесса расчёта режима, основанного на методе Ньютона, в качестве критерия устойчивости – сохранение положительного знака якобиана в процессе утяжеления режима.

В процессе утяжеления режима реактивные мощности генераторов выходят на ограничения, и узлы $P-U$ типа переходят в разряд узлов $P-Q$ типа, имеющих существенно другие характеристики. При оценке устойчивости нового установившегося режима после очередного шага утяжеления вычисление якобиана уравнений установившегося режима предлагается осуществлять при представлении генераторных узлов с реактивными мощностями, вышедшими на ограничения, как узлов $P-U$ типа, но с модулями напряжений, полученными в результате расчёта при их представлении как узлов $P-Q$ типа [2].

Рассмотрим подробнее вычислительные особенности определения координат предельного режима при указанном способе представления генераторных узлов.

Угловая характеристика мощности генераторного узла при закреплении реактивной мощности. Режим работы генераторного узла сложной ЭЭС описывается уравнением вида:

$$U_i^2 \cdot \underline{Y}_{ii} - U_i \cdot \sum_{j \in m_i} U_j \cdot \underline{Y}_{ij} = \underline{S}_{zi}, \quad (*)$$

где \underline{S}_{zi} – мощность генератора, U_i – напряжение на шинах генератора, U_j – напряжения в смежных узлах.

Выделив в уравнении (*) действительные и мнимые составляющие, получим уравнения относительно задающей активной и реактивной мощности узла:

$$\begin{cases} P_{zi} = U_i^2 \cdot Y'_{ii} + \sum_{j \in m_i} U_i \cdot U_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \\ Q_{zi} = -U_i^2 \cdot Y''_{ii} - \sum_{j \in m_i} U_i \cdot U_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \end{cases}$$

Здесь обозначено:

$$|Y_{ij}| = \sqrt{(Y'_{ij})^2 + (Y''_{ij})^2}, \quad Y'_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}, \quad Y''_{ij} = -\frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2},$$

$$Y'_{ii} = Y'_{i0} + \sum_{j \in m_i} Y'_{ij}, \quad Y''_{ii} = Y''_{i0} + \sum_{j \in m_i} Y''_{ij},$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{Y''_{ij}}{Y'_{ij}}.$$

При изменении впуска энергоносителя в турбину изменяется угол вектора напряжения узла по отношению к векторам напряжения узлов

примыкания. При изменении угла поведение активной и реактивной мощности генератора описывается с помощью выражений:

$$\begin{cases} P_{zi} = U_i^2 \cdot Y_{ii}' + U_i \cdot R_i \cdot \sin(\Delta\delta_i + \theta_i) \\ Q_{zi} = -U_i^2 \cdot Y_{ii}'' - U_i \cdot R_i \cdot \cos(\Delta\delta_i + \theta_i) \end{cases} \quad (**)$$

где:

$$R_i = \sqrt{\left(\sum_{j \in m_i} U_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\delta_i^0 - \delta_j^0 - \alpha_{ij}) \right)^2 + \left(\sum_{j \in m_i} U_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\delta_i^0 - \delta_j^0 - \alpha_{ij}) \right)^2},$$

$$\theta_i = \arctg \frac{\sum_{j \in m_i} U_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\delta_i^0 - \delta_j^0 - \alpha_{ij})}{\sum_{j \in m_i} U_j \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\delta_i^0 - \delta_j^0 - \alpha_{ij})}.$$

Выражения (**) описывают угловые характеристики активной и реактивной мощности генераторного узла сложной ЭЭС. По своей структуре они подобны уравнениям установившихся режимов простейшей ЭЭС «генератор – ШБМ», но содержат переменные параметры R_i , θ_i , зависящие от режима работы смежных узлов. Для изучения общих закономерностей решений уравнений установившихся режимов генераторного узла сложной ЭЭС при утяжелении режима в первом приближении можно считать эти параметры постоянными, то есть свести анализ к случаю «генератор – ШБМ».

Для упрощения записи формул рассмотрим уравнения установившегося режима простейшей ЭЭС вида:

$$\begin{cases} P_z = \frac{U_z \cdot U_c}{x} \cdot \sin \delta_z \\ Q_z = \frac{U_z^2}{x} - \frac{U_z \cdot U_c}{x} \cdot \cos \delta_z \end{cases} \quad (1)$$

Постоянство реактивной мощности генераторного узла соответствует ситуациям, когда в процессе утяжеления режима реактивная мощность генератора выходит на границы диапазона:

$$Q_z^{\min} \leq Q_z \leq Q_z^{\max}. \quad (2.)$$

При постоянстве реактивной мощности $Q_z = Q_z^{zp}$ напряжение на шинах генератора зависит от величины угла генератора, то есть от мощности турбины. Эту зависимость можно получить из второго уравнения системы (1), приведя его к виду:

$$U_z^2 - U_z \cdot U_c \cdot \cos \delta_z - Q_z^{zp} \cdot x = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) имеет два корня:

$$U_z^{(1)} = \frac{1}{2} \left[U_c \cdot \cos \delta_z + \sqrt{(U_c \cdot \cos \delta_z)^2 + 4Q_z^{zp} \cdot x} \right], \quad (4)$$

$$U_z^{(2)} = \frac{1}{2} \left[U_c \cdot \cos \delta_z - \sqrt{(U_c \cdot \cos \delta_z)^2 + 4Q_z^{zp} \cdot x} \right]. \quad (5)$$

При отрицательных значениях Q_z^{\min} имеет смысл рассматривать оба корня (4), (5). При положительных значениях Q_z^{\min} второй корень (5)

всегда даёт отрицательные значения модуля напряжения и его следует отбросить.

После подстановки значения первого корня (4) в выражение для активной мощности генератора (1), получим:

$$P_2 = \frac{U_c}{2x} \cdot \left[U_c \cdot \cos \delta_2 + \sqrt{(U_c \cdot \cos \delta_2)^2 + 4Q_2^{ep} \cdot x} \right] \cdot \sin \delta_2. \quad (6)$$

Уравнение (6) есть *угловая характеристика активной мощности генератора при постоянстве значения реактивной мощности.*

Привести это уравнение к более простому виду не удастся, однако можно провести его анализ на наличие особых точек. С этой целью продифференцируем выражение (6) по углу генератора:

$$\frac{dP_2}{d\delta_2} = \frac{U_c}{2x} \left\{ \left[U_c \cos \delta_2 + \sqrt{(U_c \cos \delta_2)^2 + 4Q_2^{ep} x} \right] \cos \delta_2 - \left[U_c \sin \delta_2 + \frac{U_c^2 \cos \delta_2 \sin \delta_2}{\sqrt{(U_c \cos \delta_2)^2 + 4Q_2^{ep} x}} \right] \sin \delta_2 \right\}$$

После приведения подобных членов получим:

$$\frac{dP_2}{d\delta_2} = \frac{U_c}{2x} \cdot \left[U_c \cos 2\delta_2 + \frac{(U_c^2 \cdot \cos 2\delta_2 + 4Q_2^{ep} \cdot x) \cdot \cos \delta_2}{\sqrt{(U_c \cdot \cos \delta_2)^2 + 4Q_2^{ep} \cdot x}} \right]. \quad (7)$$

Максимум характеристики мощности наступает при равенстве нулю производной (7). Приравняв нулю выражение (7) и преобразуя тригонометрические функции, находим, что максимум характеристики мощности наступает при значении угла, определяемому из соотношения:

$$\delta_2^{kp} = \arctg \frac{\sqrt{U_c^2 + 4Q_2^{ep} \cdot x}}{U_c}. \quad (8)$$

Определим параметры предельного режима работы системы при постоянстве реактивной мощности генератора. Значение угла, при котором наступает максимум угловой характеристики мощности, определяется по выражению (8). Используя это выражение можно найти, что:

$$\sin \delta_2^{kp} = \frac{\sqrt{U_c^2 + 4Q_2^{ep} \cdot x}}{\sqrt{2U_c^2 + 4Q_2^{ep} \cdot x}}; \quad \cos \delta_2^{kp} = \frac{U_c}{\sqrt{2U_c^2 + 4Q_2^{ep} \cdot x}};$$

Подставляя полученные соотношения в (6), находим, что максимальное значение активной мощности генератора равно:

$$P_2^{kp} = \frac{U_c}{2x} \cdot \sqrt{U_c^2 + 4Q_2^{ep} \cdot x}. \quad (9)$$

Таким же путем, подставляя значение $\sin \delta_2^{kp}$ и P_2^{kp} в первое уравнение системы (1), находим значение напряжения генератора в максимальном режиме:

$$U_2^{kp} = \frac{1}{2} \sqrt{2U_c^2 + 4Q_2^{ep} \cdot x}. \quad (10)$$

Несложно проверить, что выражение (7) описывает изменение синхронизирующей мощности генератора:

$$\frac{dP_2}{d\delta_2} = \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} + \frac{\partial P_2}{\partial U_2} \cdot \frac{dU_2}{d\delta_2}. \quad (11)$$

Связь между напряжением и углом генератора устанавливается неявной функцией в виде второго уравнения системы (1).

Дифференцируя это уравнение по углу, получим:

$$\frac{dQ_2}{d\delta_2} = \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} + \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} \cdot \frac{dU_2}{d\delta_2} = 0,$$

или иначе:

$$\frac{dU_2}{d\delta_2} = -\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} / \frac{\partial Q_2}{\partial U_2}.$$

Подставляя это значение производной в (11), получим общий вид выражения для синхронизирующей мощности вида:

$$\frac{dP_2}{d\delta_2} = \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \cdot \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} - \frac{\partial P_2}{\partial U_2} \cdot \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \right) / \frac{\partial Q_2}{\partial U_2},$$

где согласно (1):

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = \frac{U_c \cdot U_2}{x} \cdot \cos \delta_2, \quad \frac{\partial P_2}{\partial U_2} = \frac{U_c}{x} \cdot \sin \delta_2, \quad \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = \frac{U_c \cdot U_2}{x} \cdot \sin \delta_2,$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial U_2} = \frac{2U_2}{x} - \frac{U_c}{x} \cdot \cos \delta_2.$$

С учетом последних соотношений выражение для синхронизирующей мощности принимает вид:

$$\frac{dP_2}{d\delta_2} = \frac{U_2 \cdot U_c \cdot (2U_2 \cdot \cos \delta_2 - U_c)}{x \cdot (2U_2 - U_c \cdot \cos \delta_2)}. \quad (12)$$

Если подставить в (12) значение первого корня напряжения генератора (4), то получим выражение (7) для производной от характеристики мощности (6) по углу генератора. Таким образом, синхронизирующая мощность генератора соответствует производной от характеристики мощности генератора по углу, что и следовало ожидать. С учётом изложенного восходящие ветви характеристики мощности генератора при постоянстве его реактивной мощности соответствуют устойчивым режимам, а нисходящие ветви – неустойчивым режимам.

Угловую характеристику мощности генератора (6) можно построить расчётным путём, задаваясь различными значениями угла генератора.

Для изучения особенностей поведения генераторного узла P-Q типа построим линии уровня $Q = const$ при изменении угла генератора от -140 ... до +140 градусов на плоскостях P-δ и U-δ, и приняв в о.е. $U_c = 1,0$; $x = 1,0$ (рис. 1, 2).

При положительных значениях граничной реактивной мощности напряжение на шинах генератора определяется однозначно по формуле (4). Поэтому при изменении угла генератора во всём

выбранном диапазоне характеристики $P(\delta)$ и $U(\delta)$ представляют собой непрерывные кривые.

При отрицательных значениях граничной реактивной мощности для одного значения угла генератора существуют два решения для модуля напряжения на шинах генератора, которые на плоскости $U-\delta$ описывают овалы, а на плоскости $P-\delta$ – петли. Первому решению для модуля напряжения (4) соответствует тонкая часть кривой, второму решению (5) – толстая часть кривой.

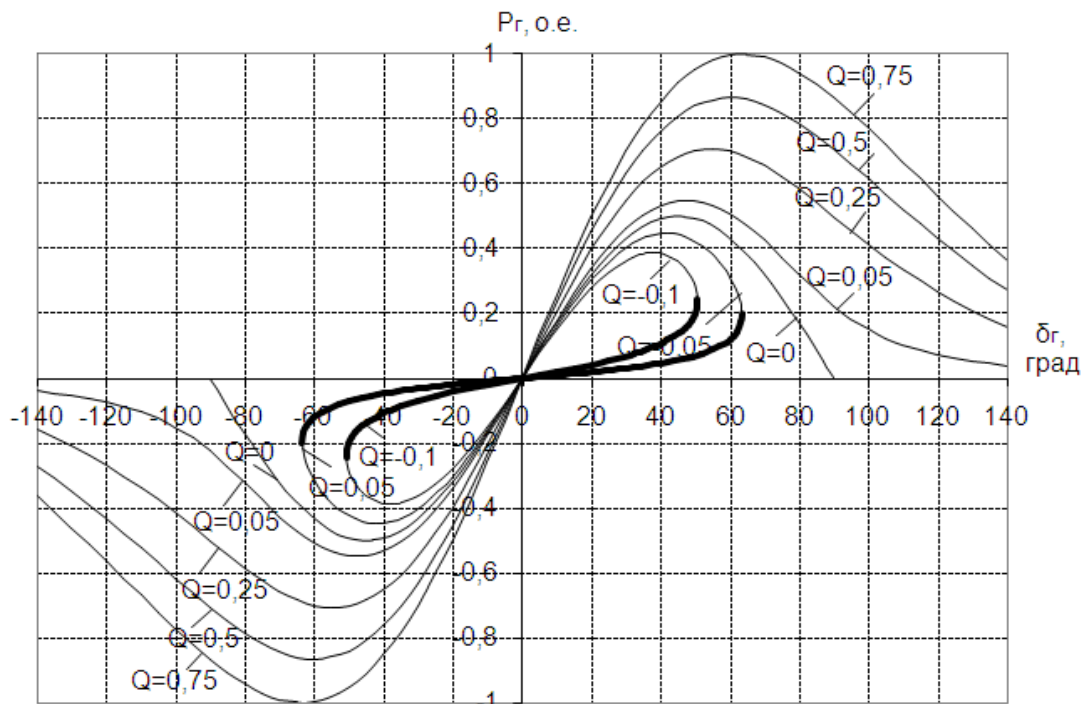


Рис.1 Угловые характеристики генератора P - Q типа

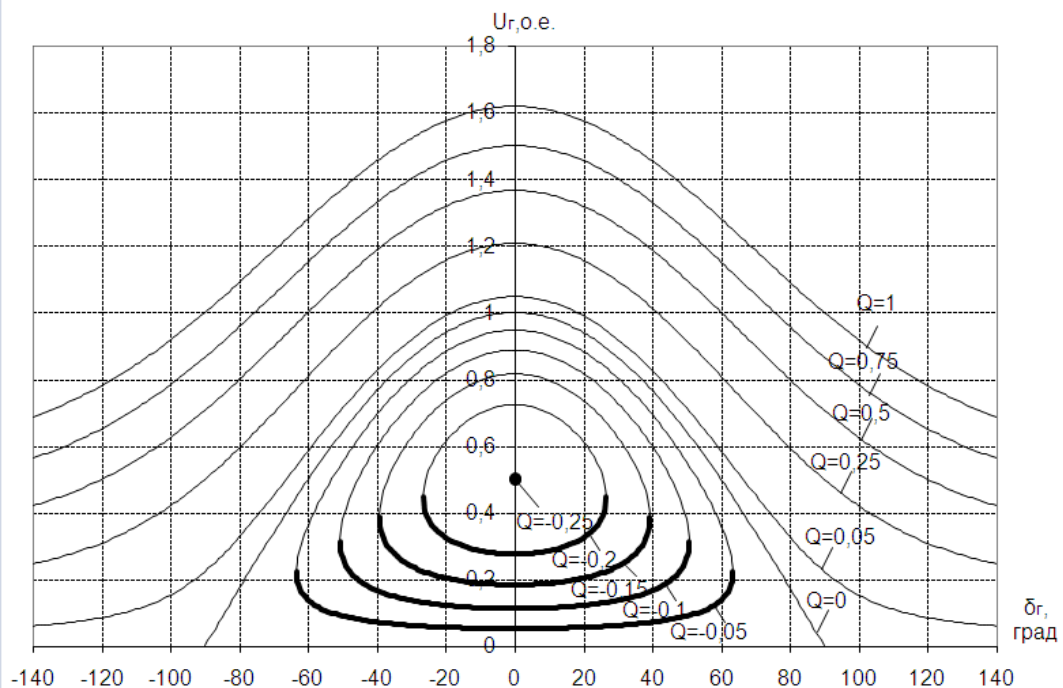


Рис. 2 Напряжение на шинах генератора P - Q типа

Восходящие и нисходящие ветви угловой характеристики мощности узла $P-Q$ типа соответствуют разным решениям уравнений установившегося режима относительно модуля и угла напряжения на шинах генератора (для узла $P-U$ типа восходящие и нисходящие ветви характеристик мощности соответствуют разным значениям только угла генератора). Возведем в квадрат правые и левые части уравнений системы (1) и результат просуммируем. В итоге получим:

$$U_2^4 - U_2^2 \cdot Y \cdot (2Q_2 \cdot x + U_c^2) + (P_2^2 + Q_2^2) \cdot x^2 = 0. \quad (13)$$

Выражение (13) является биквадратным уравнением относительно модуля напряжения генератора, имеющим две ветви решений (отрицательные значения модуля напряжения не рассматриваются):

$$U_2' = \sqrt{\frac{(2Q_2 \cdot x + U_c^2) + \sqrt{(2Q_2 \cdot x + U_c^2)^2 - 4(P_2^2 + Q_2^2) \cdot x^2}}{2}}, \quad (14)$$

$$U_2'' = \sqrt{\frac{(2Q_2 \cdot x + U_c^2) - \sqrt{(2Q_2 \cdot x + U_c^2)^2 - 4(P_2^2 + Q_2^2) \cdot x^2}}{2}}. \quad (15)$$

Следует отметить, что выражения (4), (5) и (14), (15) задают одну и ту же зависимость напряжения на шинах генератора от его активной мощности в разных системах координат. При использовании в качестве независимой переменной угла генератора δ_2 функции $U_2(\delta_2)$ при различных Q_2 являются непрерывными и имеют вид, показанный на рис. 2.

В соответствии с системой уравнений (1) значениям модуля напряжения (14), (15) соответствует два значения угла генератора:

$$\delta_2' = \arctg \frac{P_2}{(U_2')^2 - Q_2 \cdot x}, \quad (16)$$

$$\delta_2'' = \arctg \frac{P_2}{(U_2'')^2 - Q_2 \cdot x}. \quad (17)$$

Решения (14), (15) существуют, если подкоренное выражение:

$$(2Q_2 \cdot x + U_c^2)^2 - 4(P_2^2 + Q_2^2) \cdot x^2 \geq 0. \quad (18)$$

положительно. В критической точке при $(2Q_2 \cdot x + U_c^2)^2 - 4(P_2^2 + Q_2^2) \cdot x^2 = 0$ два решения (14), (15) сливаются в одно. Таким образом, точка максимума угловой характеристики соответствует также границе области существования решений уравнения для модуля напряжения на шинах генератора и является точкой слияния двух ветвей решений этого уравнения. *Исходя из этого, решение на восходящей ветви угловой характеристики активной мощности генератора является устойчивым, а на нисходящей – неустойчивым.*

Особенности угловых характеристик мощности генератора при $Q_2^{zp} > 0$. Рассмотрим подробнее характеристики мощности генератора (6) для фиксированных положительных значений реактивной мощности $Q_2^{zp} = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$.

На рисунке 3 приведены угловые характеристики генератора при постоянных значениях реактивной мощности и угловая характеристика генератора при постоянном значении модуля напряжения на его шинах (изображена толстой линией), на рис. 4 приведены зависимости напряжения на шинах генератора от угла генератора.

Значения углов, при которых наступает максимум угловой характеристики, величина этого максимума, а также значения напряжения на шинах генератора в точке максимума определяются по выражениям (8) – (10) и для рассматриваемого примера приведены в табл. 1.

Первое, на что следует обратить внимание при рассмотрении угловых характеристик мощности, это смещение максимума угловой характеристики при $Q_2 = const$ в сторону углов, меньших $\pi/2$. При $Q_2 = 0,75$ максимум угловой характеристики мощности равен единице и совпадает с максимумом угловой характеристики генератора при задании $U_2=1,0=const$.

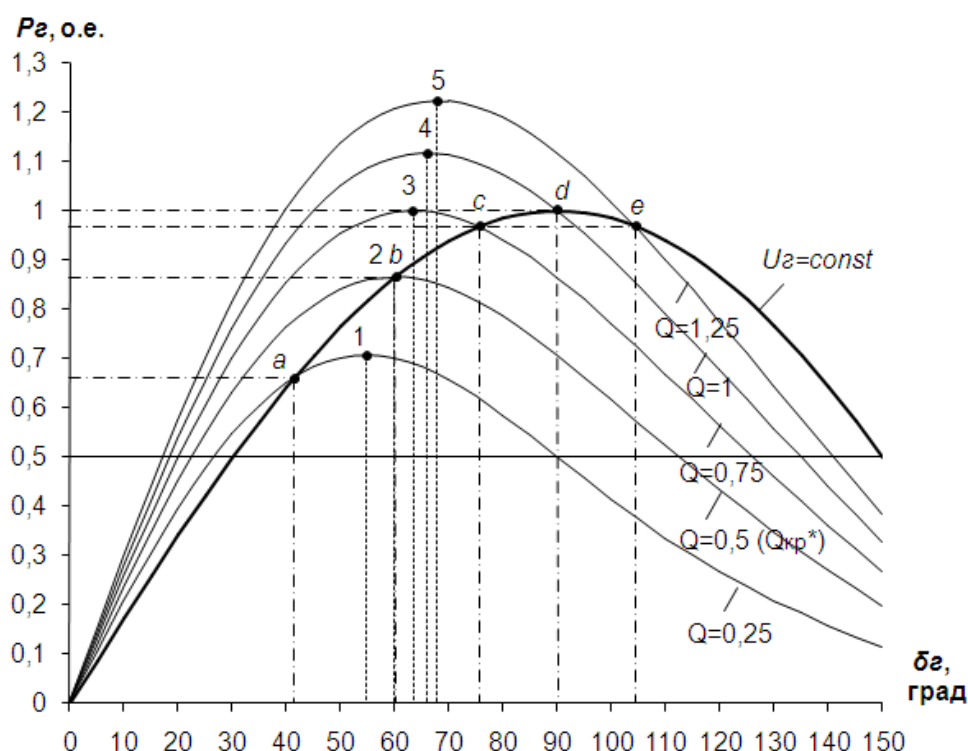


Рис. 3. Угловые характеристики мощности генератора

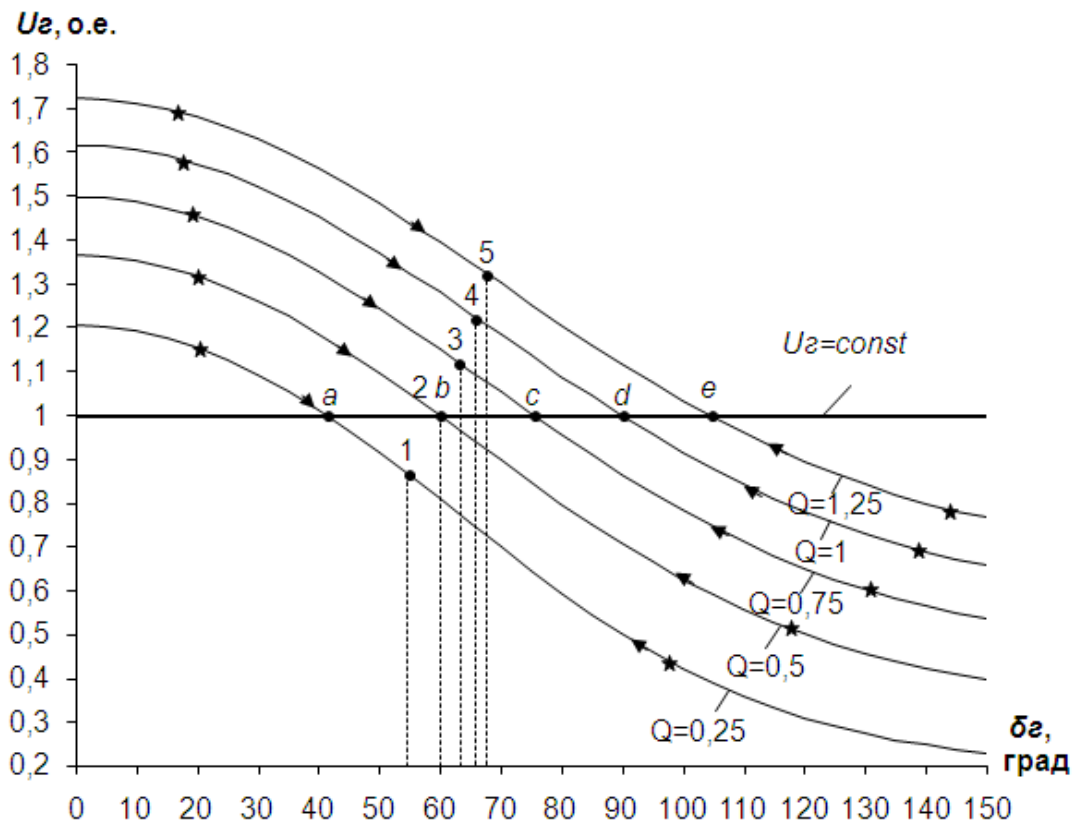


Рис. 4. Напряжение на шинах генератора

Таблица 1

Параметры предельных режимов

Q_z^{cp} (о.е.)	P_z^{kp} (о.е.)	δ_z^{kp} (град.)	U_z^{kp} (о.е.)	Точка на рис. 3
0,25	0,707	54,74	0,866	1
0,5	0,866	60,0	1,0	2
0,75	1,0	63,44	1,118	3
1,0	1,118	65,91	1,225	4
1,25	1,225	67,79	1,323	5

При утяжелении режима по активной мощности изображающие точки режима, соответствующие разным корням уравнения (13), двигаются вдоль приведенных кривых в разных направлениях и сливаются в точках максимума угловых характеристик (точки 1-5 на рис. 3, 4). Участки кривых, лежащие слева от точек максимума, соответствуют первому корню уравнения (13). Участки кривых, лежащие справа от точек максимума, – второму корню уравнения (13). Каждому значению активной мощности генератора соответствуют два значения напряжения на шинах. Одно характеризуется большим

модулем и меньшим углом (левые участки кривых), второе – меньшим модулем напряжения и большим углом (правые участки кривых). В качестве примера на рис. 4 звездочками показаны решения уравнений установившегося режима, соответствующие одним и тем же значениям активной мощности $P_2 = 0,5$. На рис. 3 эти решения соответствуют точкам пересечения угловых характеристик мощности с прямой, показанной красным цветом.

Согласно общепринятой методике определения предельных по апериодической устойчивости режимов ЭЭС с использованием программ расчета установившихся режимов [1,2] после каждого шага утяжеления должен вычисляться якобиан уравнений установившегося режима при представлении генераторов в виде узлов $P-U$ типа. Если в процессе утяжеления режима реактивная мощность генератора выходит на ограничение, то есть генераторный узел переходит в разряд узлов $P-Q$ типа и напряжение на шинах генератора уже не равно заданному значению, то при вычислении якобиана необходимо искусственно перевести этот узел в разряд узлов $P-U$ типа со значением напряжения на шинах, полученном после расчета режима на шаге утяжеления. Такой прием трактуется в [2] как смена уставки АРВ генератора по напряжению.

Подобная корректировка математической модели генераторного узла соответствует замене характеристики мощности $P_2 = f(Q_2^{sp})$ на синусоидальную характеристику $P_2 = f(U_2^{const})$, проходящую через ту же изображающую точку режима. В процессе дальнейшего утяжеления режима амплитуда синусоиды будет изменяться вследствие изменения напряжения на шинах генератора. Для рассматриваемой простейшей ЭЭС предел по устойчивости генератора всегда будет иметь место при угле $\delta_2^{np} = \pi/2$.

Так как реальная характеристика генераторного узла $P_2 = f(Q_2^{sp})$ имеет две ветви решения, то при их замене возможно появление двух синусоидальных характеристик, отвечающих разным значениям напряжения на шинах генератора и характеризующихся разной величиной максимума. На каждой из этих синусоидальных характеристик изображающая точка режима находится на восходящей ветви синусоиды и по критерию $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$ каждое из полученных решений должно быть признано устойчивым. Такой вывод сделан, например, в [2]. Также в [2] утверждается, что эти близкие два режима имеют разные коэффициенты запаса устойчивости из-за разной величины амплитуд синусоидальных характеристик мощности.

Однако эти выводы следует считать ошибочными по следующим причинам.

Во-первых, построение синусоидальных характеристик с постоянными амплитудами соответствует закреплению

определенной величины модуля напряжения на шинах генератора и раскреплению значения реактивной мощности генератора, что уже не соответствует условию $Q_2 = Q_2^{ep} = const$.

Во-вторых, при достижении предельного режима две ветви решения уравнений установившегося режима сливаются, то есть существует только один предельный режим.

В-третьих, знаки синхронизирующей мощности генератора в точках на разных ветвях характеристики мощности $P_2 = f(Q_2^{ep})$ противоположны, что свидетельствует о неустойчивости одного из решений.

Особенности поиска предельных режимов работы генераторов с ограниченным диапазоном регулирования реактивной мощности. В определенных точках (точки a, b, c, d, e на рис. 3, 4) угловые характеристики $Q_2=const$ пересекаются с угловой характеристикой $U_2=1,0=const$. В этих точках активные и реактивные мощности генератора для математических моделей $Q_2=const$ и $U_2=const$ равны между собой. Координаты таких точек для модели $Q_2=const$ определяются по выражениям:

$$\delta_2^* = \arccos\left(\frac{U_2^{const}}{U_c} - \frac{Q_2^{ep} \cdot x}{U_2^{const} \cdot U_c}\right), \quad P_2^* = \frac{U_2^{const} \cdot U_c}{x} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{U_2^{const}}{U_c} - \frac{Q_2^{ep} \cdot x}{U_2^{const} \cdot U_c}\right)^2}$$

и для рассматриваемого примера приведены в табл. 2. Напряжение на шинах генератора во всех случаях одинаково и равно единице.

Таблица .2

Параметры точек пересечения характеристик

Q_2^{ep} (о.е.)	U_2^* (о.е.)	δ_2^* (град.)	P_2^* (о.е.)	Точка на рис. 3, 4
0,25	1,0	41,41	0,661	<i>a</i>
0,5	1,0	60,0	0,866	<i>b</i>
0,75	1,0	75,52	0,968	<i>c</i>
1,0	1,0	90	1,0	<i>d</i>
1,25	1,0	104,48	0,968	<i>e</i>

Указанные точки характерны тем, что для модели генераторного узла P - U типа с ограничением на реактивную мощность генератора (2) в этих точках при утяжелении режима происходит переход с угловой характеристики мощности при $U_2=const$ на угловую характеристику мощности при $Q_2=const$.

При выходе реактивной мощности генератора на ограничение возможно три варианта дальнейшего перемещения изображающей точки режима при увеличении активной мощности генератора.

Вариант 1 – при заданном граничном значении реактивной мощности генератора $Q_2^{zp} < Q_2^{zps}$. На рис. 3, 4 этому случаю соответствует перемещение изображающей точки по участку кривой а – 1 при $Q_2^{zp} = 0,25$. На указанном участке кривой возможно утяжеление режима по активной мощности, характеризуемое увеличением угла и понижением модуля напряжения на шинах генератора.

Вариант 2 – при заданном граничном значении реактивной мощности генератора $Q_2^{zp} = Q_2^{zps}$. На рис. 3, 4 этому случаю соответствует совпадение точек b и 2 при $Q_2^{zp} = 0,5$. В момент перехода с одной угловой характеристики на другую сразу наступает максимум угловой характеристики мощности $P_2 = f(Q_2^{zp})$ и дальнейшее утяжеление режима невозможно.

Вариант 3 – при заданном граничном значении реактивной мощности генератора $Q_2^{zp} > Q_2^{zps}$. На рис. П.2.3, П.2.4 этому случаю соответствует перемещение изображающей точки по участку кривой с – 3 при $Q_2^{zp} = 0,75$ и участку кривой d – 4 при $Q_2^{zp} = 1,0$. На указанных участках кривых возможно утяжеление режима по активной мощности, сопровождающееся уменьшением угла и повышением модуля напряжения на шинах генератора.

В вариантах 1, 3 при утяжелении режима по угловой характеристике $P_2 = f(Q_2^{zp})$ возможно существование двух решений уравнений установившегося режима, значительно отличающихся по модулю и углу напряжения на шинах генератора. При этом одно решение является как бы непрерывным продолжением процесса утяжеления режима по характеристике $P_2 = f(U_2)$, а второе решение характеризуется скачкообразным изменением вектора напряжения на шинах генератора. На рисунке 5 показаны траектории движения изображающей точки режима при разных соотношениях между значениями углов δ_2^* и δ_2^{np} .

При $\delta_2^* < \delta_2^{np}$ ($Q_2^{zp} = 0,25$) первое решение соответствует перемещению по устойчивой ветви угловой характеристики на участке а – 1, а второе решение – скачкообразному перемещению в точку а' и передвижению по неустойчивой ветви угловой характеристики на участке а' – 1. При $\delta_2^* > \delta_2^{np}$ ($Q_2^{zp} = 0,75$) первое решение соответствует перемещению по неустойчивой ветви угловой с характеристики на участке с – 3, а второе решение – скачкообразному перемещению в точку с' и передвижению по устойчивой ветви угловой характеристики на участке с' – 3. Очевидно, что при $\delta_2^* < \delta_2^{np}$ процесс поиска предельного режима может быть продолжен по угловой характеристике $P_2 = f(Q_2^{zp})$ по траектории а – 1 вплоть до точки 1. При $\delta_2^* > \delta_2^{np}$ процесс поиска предельного режима искусственно должен быть перемещен из точки с в точку с' на устойчивую ветвь угловой характеристики $P_2 = f(Q_2^{zp})$.

Такой переход соответствует скачкообразному изменению уставки АРВ генератора.

Исследование сходимости метода Ньютона при утяжелении режима по программам *RASTR*, *MUSTANG* показало следующее.

При $Q_2^{zp} = 0,25$ утяжеление режима происходит по траектории 0 – а – 1. Синхронизирующая мощность генератора на обеих угловых характеристиках положительна и метод Ньютона сходится.

При $Q_2^{zp} = 0,75$ утяжеление режима возможно по траектории 0 – с до точки с. Дальнейшее утяжеление режима до точки 3 по траектории с – 3 обеспечивается только при принудительном закреплении статуса генераторного узла как узла *P-Q* типа. При обычном алгоритме расчёта с контролем значения требуемой реактивной мощности на каждой итерации происходит постоянная смена статуса генераторного узла с одного типа на другой и метод Ньютона не сходится (зависает!).

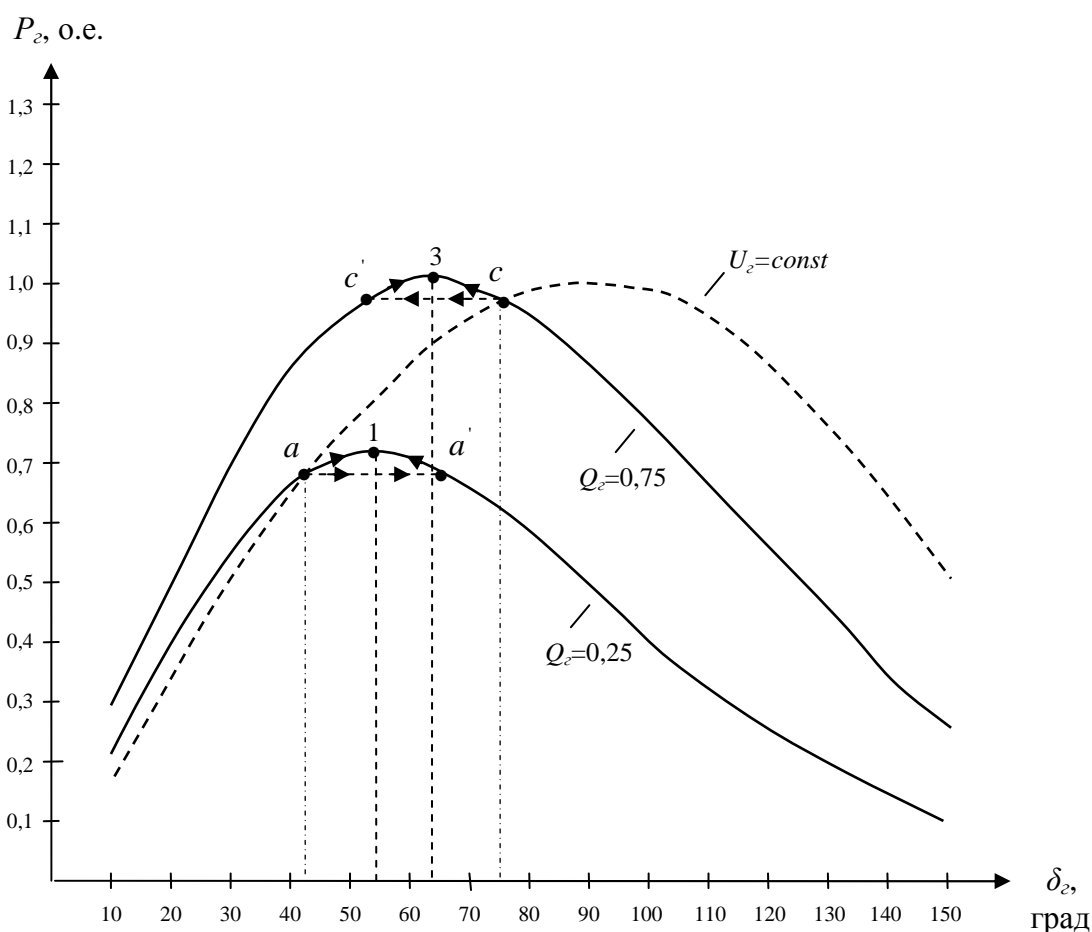


Рис. 5. Траектории перемещения изображающей точки режима

Зависание объясняется разными знаками производной $\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}$ на характеристиках $P_2 = f(Q_2^{zp})$ и $P_2 = f(U_2^{const})$. Искусственное изменение координат режима с точки c на точку c' позволяет найти предельный режим (точка 3). Однако в условиях сложной ЭЭС такой прием

выполнить невозможно, так как необходимо знать координаты вторых решений на угловых характеристиках мощности генераторных узлов.

Выводы:

1. Получено аналитическое описание угловой характеристики мощности генератора простейшей ЭЭС при фиксированном значении реактивной мощности генератора.
2. Выполнен анализ предельных режимов работы генератора при закреплении различных значений его реактивной мощности.
3. Рассмотрены особенности процесса поиска предельного режима при смене статуса генераторного узла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К определению предельных по апериодической устойчивости режимов электрических систем по якобиану уравнений установившихся режимов / Веников В.А., Строев В.А., Идельчик В.И., Тарасов В.И. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1973. - № 1. - С. 46 - 53.
2. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчёты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.: ил.

Контактная информация

Захаркин Олег Владимирович, к.т.н., заведующий научно-исследовательской лаборатории ЗАО «ИАЭС»
630132, Новосибирск, ул. Железнодорожная, 12/1.
Тел. (383)-363-02-65

Ивахненко Елена Юрьевна, н.с. научно-исследовательской лаборатории ЗАО «ИАЭС»
630132, Новосибирск, ул. Железнодорожная, 12/1.
Тел. (383)-363-02-65, сот. 214-01-91
eyi@iaes.ru