

## ОСОБЕННОСТИ УЧЁТА ГЕНЕРАТОРНЫХ УЗЛОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

к.т.н., с.н.с. Захаркин О.В. (ЗАО ИАЭС)

инженер Ивахненко Е.Ю. (ЗАО ИАЭС)

**Постановка задачи.** Предельные режимы работы электроэнергетических систем принято подразделять на предельные по мощности и предельные по устойчивости режимы. 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.

На практике определение предельных режимов работы ЭЭС обычно осуществляется путем выполнения серии расчётов 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 предельного режима при указанном способе представления генераторных узлов.

### Угловая характеристика мощности генераторного узла при закреплении реактивной мощности.

Рассмотрим уравнения установившегося режима простейшей ЭЭС вида «генератор – ШБМ»:

$$\begin{cases} P_2 = \frac{U_2 \cdot U_c}{x} \cdot \sin \delta_2 \\ Q_2 = \frac{U_2^2}{x} - \frac{U_2 \cdot U_c}{x} \cdot \cos \delta_2 \end{cases} \quad (7)$$

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

$$Q_2^{\min} \leq Q_2 \leq Q_2^{\max} \quad (8)$$

При постоянстве реактивной мощности  $Q_2 = Q_2^{sp}$  напряжение на шинах генератора зависит от величины угла генератора, то есть от мощности турбины. Эту зависимость можно получить из второго уравнения системы (7), приведя его к виду:

$$U_2^2 - U_c \cdot U_2 \cdot \cos \delta_2 - Q_2^{sp} \cdot x = 0. \quad (9)$$

Уравнение (9) имеет два корня:

$$U_2^{(1)} = \frac{1}{2} \left[ U_c \cdot \cos \delta_2 + \sqrt{(U_c \cdot \cos \delta_2)^2 + 4Q_2^{sp} \cdot x} \right], \quad (10)$$

$$U_2^{(2)} = \frac{1}{2} \left[ U_c \cdot \cos \delta_2 - \sqrt{(U_c \cdot \cos \delta_2)^2 + 4Q_2^{sp} \cdot x} \right]. \quad (11)$$

При отрицательных значениях  $Q_2^{\min}$  имеет смысл рассматривать оба корня (10), (11). При положительных значениях  $Q_2^{\min}$  второй корень (11) всегда даёт отрицательные значения модуля напряжения и его следует отбросить.

После подстановки значения первого корня (10) в выражение для активной мощности генератора (7), получим:

$$P_2 = \frac{U_c}{2x} \cdot \left[ U_c \cdot \cos \delta_2 + \sqrt{(U_c \cdot \cos \delta_2)^2 + 4Q_2^{sp} \cdot x} \right] \cdot \sin \delta_2. \quad (12)$$

Уравнение (12) есть *угловая характеристика активной мощности генератора при постоянстве значения реактивной мощности*.

Продифференцировав выражение (12) по углу генератора, получим выражение:

$$\frac{dP_2}{d\delta_2} = \frac{U_c}{2x} \cdot \left[ U_c \cos 2\delta_2 + \frac{(U_c^2 \cdot \cos 2\delta_2 + 4Q_2^{sp} \cdot x) \cdot \cos \delta_2}{\sqrt{(U_c \cdot \cos \delta_2)^2 + 4Q_2^{sp} \cdot x}} \right]. \quad (13)$$

Максимум характеристики мощности наступает при равенстве нулю производной (13).

С учётом изложенного восходящие ветви характеристики мощности генератора при постоянстве его реактивной мощности соответствуют устойчивым режимам, а нисходящие ветви – неустойчивым режимам.

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).

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  $Q_2^{sp} > 0$ .** Рассмотрим подробнее характеристики мощности генератора (12) для фиксированных положительных значений реактивной мощности  $Q_2^{sp} = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$ .

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 жирно), на рис. 4 приведены зависимости напряжения на шинах генератора от угла генератора.

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  $U_2=1,0=const$ .

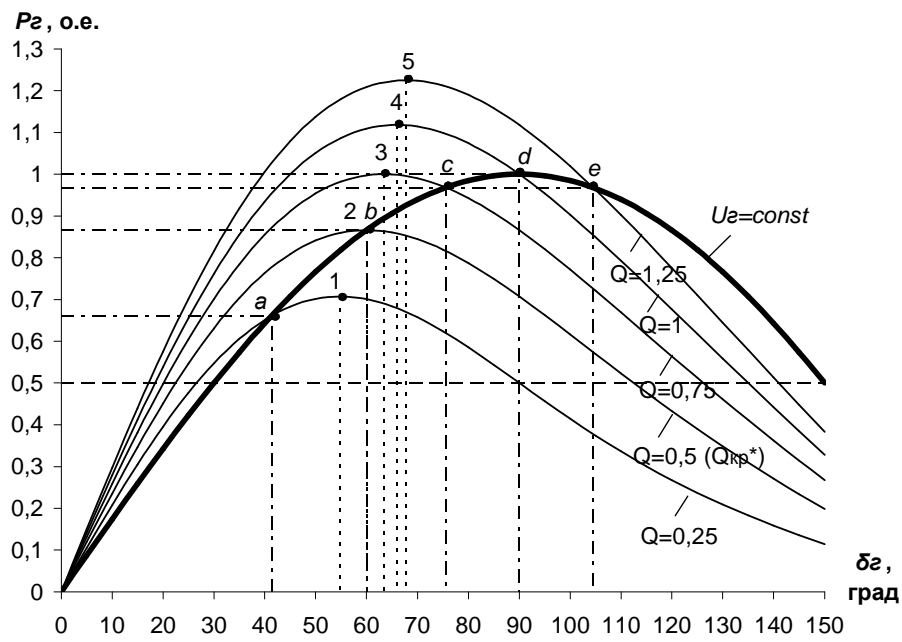


Рис. 3. Угловые характеристики мощности генератора

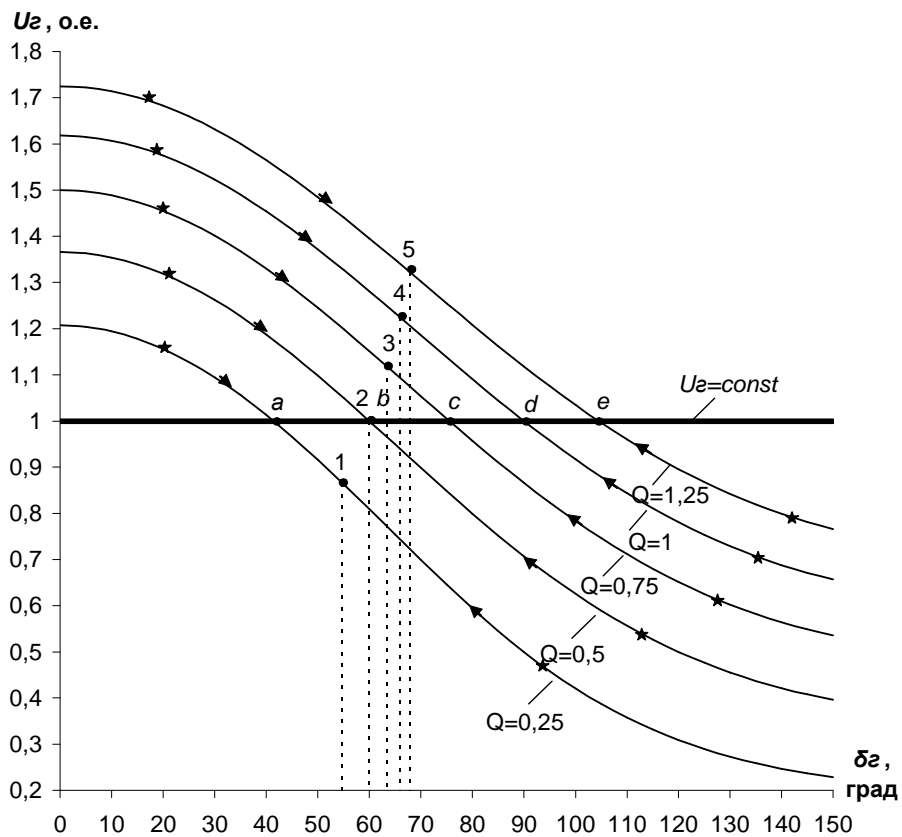


Рис. 4. Напряжение на шинах генератора

При утяжелении режима по активной мощности изображающие точки режима, соответствующие разным корням уравнения (20), 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 (20). Участки кривых, лежащие справа от точек максимума, – второму корню уравнения (20). 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 штрихпунктиром.

**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:

$$\delta_2^* = \arccos\left(\frac{U_2^{const}}{U_c} - \frac{Q_2^{zp} \cdot x}{U_2^{const} \cdot U_c}\right), \quad P_2^* = \frac{U_2^{const} \cdot U_c}{x} \cdot \sqrt{\left[1 - \left(\frac{U_2^{const}}{U_c} - \frac{Q_2^{zp} \cdot x}{U_2^{const} \cdot U_c}\right)^2\right]}. \quad (26)$$

Напряжение на шинах генератора во всех случаях одинаково и равно единице.

Указанные точки характерны тем, что для модели генераторного узла  $P-U$  типа с ограничением на реактивную мощность генератора 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  $Q_2^{zp} < Q_2^{zp*}$ . На рис. 3, 4 этому случаю соответствует перемещение изображающей точки по участку кривой  $a - 1$  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  $Q_2^{zp} = Q_2^{zp*}$ . 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  $Q_2^{zp} > Q_2^{zp*}$ . На рис. 3, 4 этому случаю соответствует перемещение изображающей точки по участку кривой  $c - 3$  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  $\delta_2^*$  и  $\delta_2^{np}$ .

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

Исследование сходимости метода Ньютона при утяжелении режима по программам *RASTR*, *MUSTANG*, *BARS* (ЗАО ИАЭС) показало следующее.

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

При  $Q_2^{cp} = 0,75$  утяжеление режима возможно по траектории  $0 - c$  до точки  $c$ . Дальнейшее утяжеление режима до точки 3 по траектории  $c - 3$  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!).

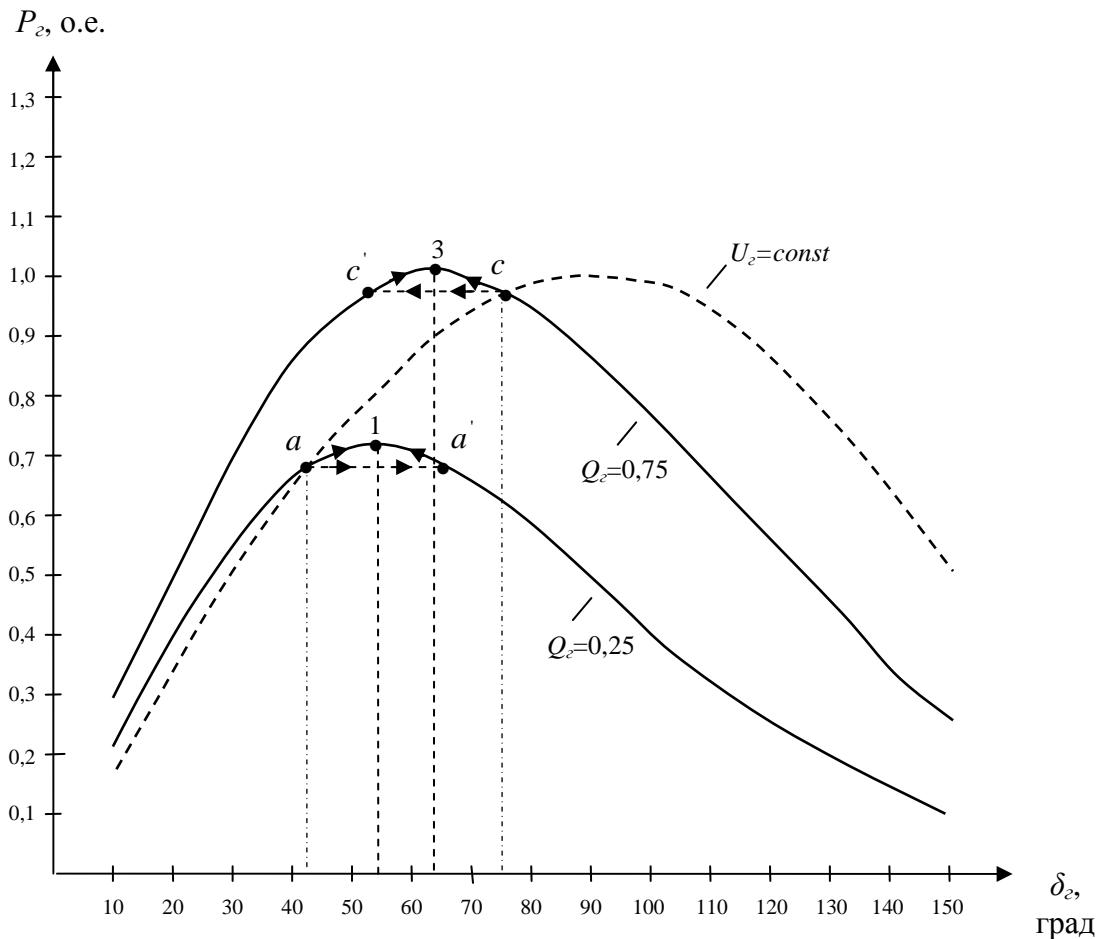


Рис. 5. Траектории перемещения изображающей точки режима

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.

Согласно общепринятой методике определения предельных по апериодической устойчивости режимов ЭЭС с использованием программ расчета установившихся режимов [2,3] 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  $P_2 = f(Q_2^{zp})$  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  $\delta_s^{np} = \pi/2$ .

Так как реальная характеристика генераторного узла  $P_s = f(Q_s^{sp})$  имеет две ветви решения, то при их замене возможно появление двух синусоидальных характеристик, отвечающих разным значениям напряжения на шинах генератора и характеризуемых 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  $Q_s = Q_s^{sp} = const$ .*

*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  $P_s = f(Q_s^{sp})$  противоположны, что свидетельствует о неустойчивости одного из решений.*

## Литература

1. К определению предельных по аperiodической 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. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990.- 390 с.: ил.
3. Идельчик В.И. Расчеты установившихся режимов электрических систем. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.: ил.