

**УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

**ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ  
ЭНЕРГОСИСТЕМ**

# ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ

- Если статическая устойчивость характеризует установившийся режим работы системы, то при анализе динамической устойчивости выявляется способность системы сохранять синхронный режим работы при больших его возмущениях. Большие возмущения возникают при различных коротких замыканиях, отключениях линий электропередачи, генераторов, трансформаторов и т.п. К большим возмущениям относятся также изменения мощности крупной нагрузки, потеря возбуждения какого-либо генератора, включение крупных двигателей. Одним из последствий возникшего возмущения является отклонение скоростей вращения роторов генераторов от синхронной – качания роторов генераторов.

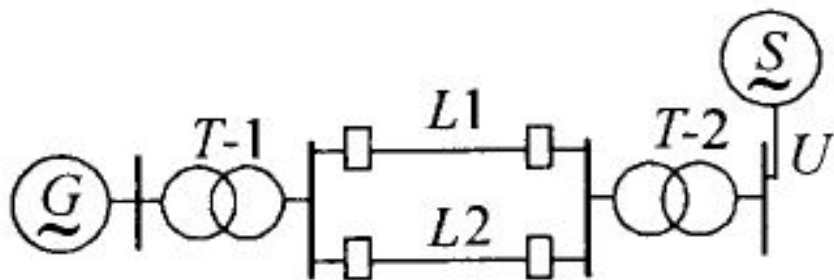
# ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ

- Если после какого-либо возмущения взаимные углы векторов примут определённые значения (их колебания затухнут около каких-либо новых значений), то считается, что динамическая устойчивость сохраняется. Если хотя бы у одного генератора ротор начинает проворачиваться относительно поля статора, то это признак нарушения динамической устойчивости. В общем случае о динамической устойчивости системы можно судить по зависимостям  $\delta = f(t)$ , полученным в результате совместного решения системы уравнений движения роторов генераторов. Но существует более простой и наглядный метод, основанный на энергетическом подходе к анализу динамической устойчивости, который называется графическим методом или методом площадей.

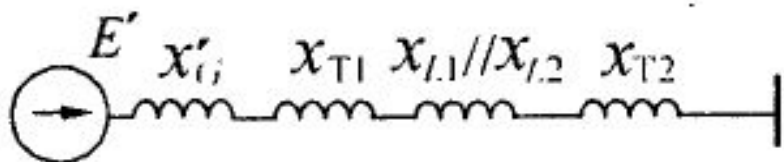
## Анализ динамической устойчивости простейшей системы графическим методом

- Рассмотрим случай, когда электростанция работает через двухцепную линию на шины бесконечной мощности (рис.14.1, а). Условие постоянства напряжения на шинах системы ( $U = const$ ) исключает качания роторов генераторов приёмной системы и значительно упрощает анализ динамической устойчивости. Схема замещения системы показана на рис.14.1, б. Генератор входит в схему замещения переходными сопротивлением  $X'_d$  и ЭДС  $E'_q$  .

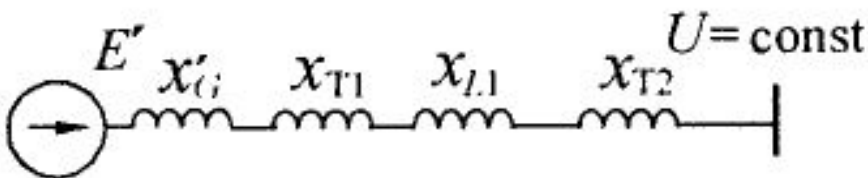
# Анализ динамической устойчивости простейшей системы графическим методом



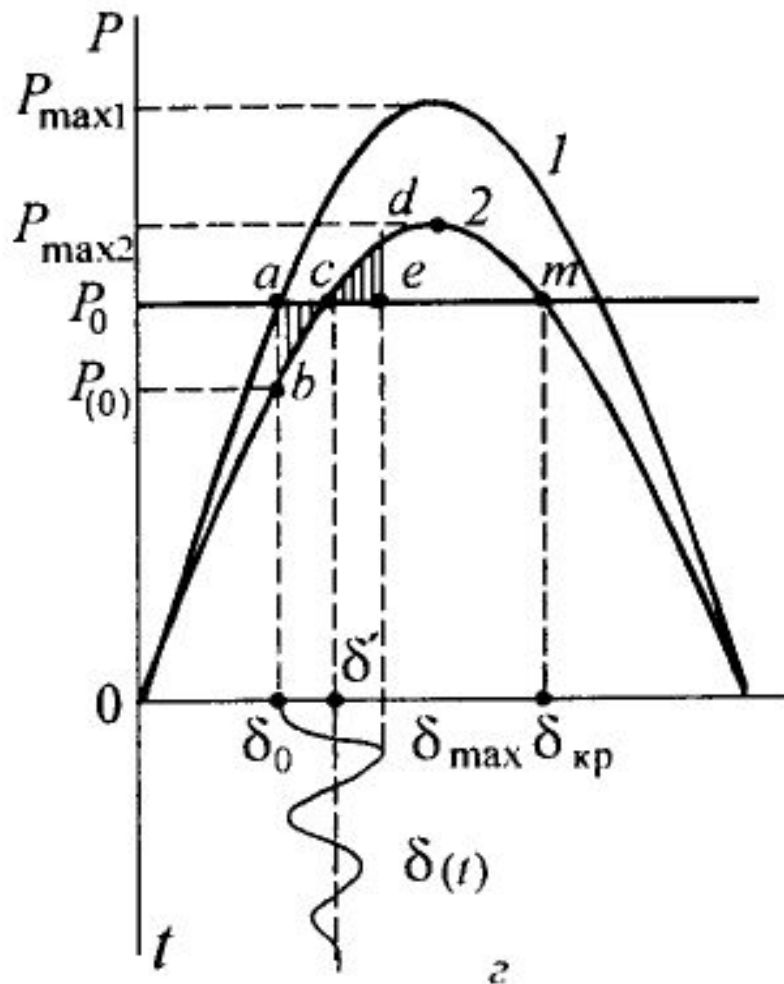
a



b



c



## Анализ динамической устойчивости простейшей системы графическим методом

- Мощность, выдаваемая генератором в систему, равна мощности турбины и обозначена  $P$ , угол ротора генератора –  $\delta_0$ . Характеристику мощности, соответствующую нормальному (доаварийному) режиму, запишем без учёта второй гармоники, что вполне допустимо в практических расчётах. Принимая  $E'_q = E'$ , получим выражение характеристики мощности в следующем виде:

$$P = \frac{E'U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta, \quad (14.1)$$

где  $X'_{d\Sigma} = X'_d + X_{T1} + X_{L1} // X_{L2} + X_{T2}$ .

Зависимость для нормального режима приведена на рис.14.1, г (кривая 1).

## Анализ динамической устойчивости простейшей системы графическим методом

- Предположим, что линия  $L2$  внезапно отключается. Рассмотрим работу генератора после её отключения. Схема замещения системы после её отключения показана на рис.14,1, в. Суммарное сопротивление послеаварийного режима  $X'_{d\Sigma(n.a)} = X'_d + X_{T1} + X_{L1} + X_{T2}$
- увеличится по сравнению с  $X'_{d\Sigma}$  (суммарное сопротивление нормального режима). Это вызовет уменьшение максимума характеристики мощности послеаварийного режима (кривая 2, рис.14.1, г). После внезапного отключения линии происходит переход с характеристики мощности 1 на характеристику 2. Из-за инерции ротора угол  $\delta$  не может измениться мгновенно, поэтому рабочая точка перемещается из точки  $a$  в точку  $b$ .

## Анализ динамической устойчивости простейшей системы графическим методом

- На валу, соединяющем турбину и генератор, возникает избыточный момент, равный разности мощности турбины, которая не изменилась после отключения линии, и новой мощности генератора ( $\Delta P = P_0 - P_{(0)}$ ). Под влиянием этой разности ротор машины начинает ускоряться, перемещаясь в сторону больших углов. Это движение накладывается на вращение ротора с синхронной скоростью, и результирующая скорость вращения ротора будет равна  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ , где  $\omega_0$  – синхронная скорость вращения;  $\Delta\omega$  – относительная скорость.



## Анализ динамической устойчивости простейшей системы графическим методом

- В результате ускорения ротора рабочая точка перемещается по характеристике 2. Мощность генератора возрастает, а избыточный (ускоряющий) момент (пропорциональный разности  $\Delta P = P_0 - P_{(0)}$ ) – убывает. Относительная скорость  $\Delta\omega$  возрастает до точки с. В точке с избыточный момент становится равным нулю, а скорость  $\Delta\omega$  – максимальной. Вращение ротора со скоростью  $\omega$  не прекращается в точке с, ротор по инерции проходит эту точку и продолжает движение. Но избыточный момент при этом меняет знак и начинает тормозить ротор.

## Анализ динамической устойчивости простейшей системы графическим методом

- Относительная скорость уменьшается и в точке  $d$  становится равной нулю.
- Угол  $\delta$  в этой точке достигает своего максимального значения. Но в точке  $d$  относительное движение ротора не прекращается, так как на валу ротора генератора действует тормозной избыточный момент, поэтому ротор начинает движение в противоположную сторону, т.е. в сторону точки  $c$ . Точку  $c$  ротор проходит по инерции, около точки  $b$  угол становится минимальным, и начинается новый цикл относительного движения ротора. Затухание колебаний ротора обусловлено потерями энергии при относительном движении ротора.

## Анализ динамической устойчивости простейшей системы графическим методом

- Избыточный момент связан с избытком мощности выражением

$$\Delta M = \frac{\Delta P}{\omega},$$

где  $\omega$  – результирующая скорость вращения ротора.

- Изменение скорости  $\Delta\omega$  при качаниях пренебрежимо мало по сравнению со скоростью  $\omega_0$ , поэтому с достаточной для практики погрешностью можно принять  $\omega \cong \omega_0$ , и тогда получаем (выражая  $\Delta M$ ,  $\Delta P$  и  $\omega_0$
- в относительных единицах)  $\Delta M_* = \frac{\Delta P}{\omega_0}$ , поскольку

$$\omega_0 = 1$$

## Анализ динамической устойчивости простейшей системы графическим методом

- Рассматривая только относительное движение ротора и работу, совершаемую при этом движении, при перемещении ротора на бесконечно малый угол  $d\delta$  избыточный момент выполняет элементарную работу  $\Delta M \cdot d\delta$ . При отсутствии потерь вся работа идёт на изменение кинетической энергии ротора в его относительном движении.

## Анализ динамической устойчивости простейшей системы графическим методом

- В тот период движения, когда избыточный момент ускоряет вращение ротора, кинетическая энергия, запасённая ротором в период его ускорения, будет определяться по формуле

$$F_{\text{уск}} = \int_{\delta_0}^{\delta'_0} \Delta P d\delta = f_{abc} \quad ,$$

- где  $f_{abc}$  – заштрихованная площадь  $abc$  на рис.11.1, г.

## Анализ динамической устойчивости простейшей системы графическим методом

- Изменение кинетической энергии ротора в его торможения вычисляется как

$$F_{\text{торм}} = \int_{\delta'_0}^{\delta_m} \Delta P d\delta = f_{cde} .$$

- Площади  $f_{abc}$  и  $f_{cde}$ , пропорциональные кинетической энергии ускорения и торможения, называются площадями ускорения и торможения.
- В период торможения кинетическая энергия ротора переходит в потенциальную энергию, которая возрастает с уменьшением скорости  $\Delta\omega$ .

## Анализ динамической устойчивости простейшей системы графическим методом

- В точке  $d$  кинетическая энергия равна нулю, и для определения максимального угла отклонения ротора  $\delta_{\max}$  достаточно выполнить условие

$$F_{\text{уск}} = F_{\text{торм}},$$

- таким образом, при максимальном угле отклонения площадь ускорения равна площади торможения. Максимальная возможная площадь торможения определяется углом  $\delta_{кр}$ . Если максимальный угол превысит значение  $\delta_{кр}$ , то на валу ротора генератора появится ускоряющий избыточный момент ( $P_0 > P_G$ ) и генератор выпадет из синхронизма.

## Анализ динамической устойчивости простейшей системы графическим методом

- На рис.14.1,  $g$  площадь  $cdm$  – максимальная возможная площадь ускорения. Определив её, можно оценить запас динамической устойчивости. Коэффициент запаса определяется по формуле

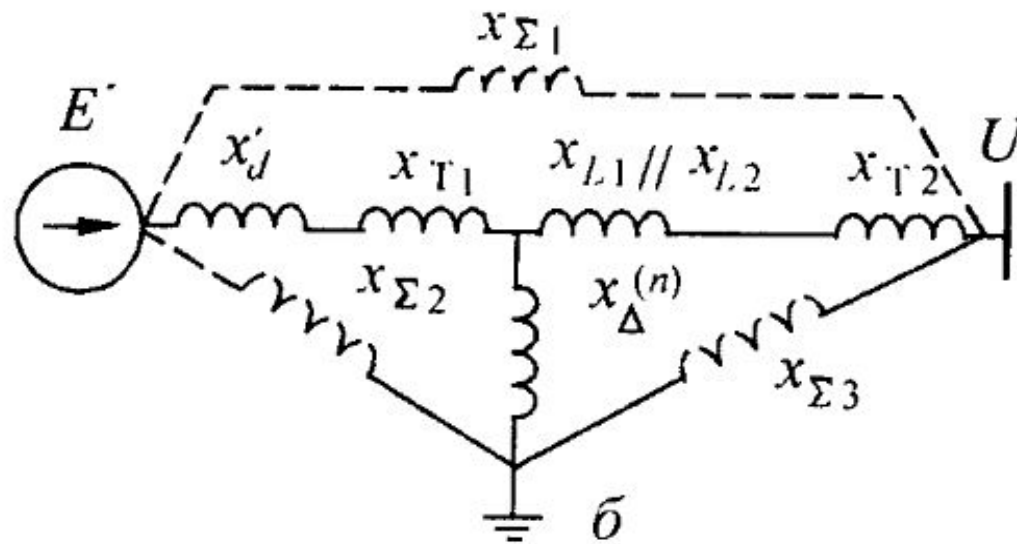
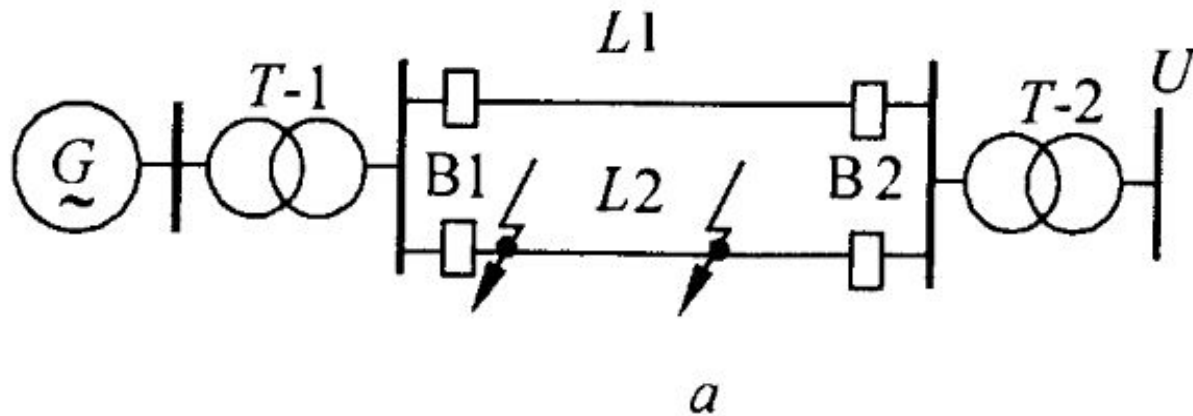
$$K_3 = \frac{F_{cdm} - F_{abc}}{F_{abc}} 100\%$$



## Динамическая устойчивость при коротких замыканиях в системе

- Наиболее распространённым видом возмущений, при которых необходим анализ динамической устойчивости в системе, является короткое замыкание. Рассмотрим общий случай несимметричного короткого замыкания в начале линии на рис.14.2, а. Схема замещения системы для режима КЗ показана на рис.14.2, б. Дополнительный реактанс  $X_{\Delta}^{(n)}$ , включаемый в точку КЗ, зависит от вида короткого замыкания, и определяется так же, как и п.2.:  $X_{\Delta}^{(2)} = X_{2\Sigma}$   $X_{\Delta}^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$   $X_{\Delta}^{(1,1)} = X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma}$ , где  $X_{2\Sigma}$
- и  $X_{0\Sigma}$  – суммарные сопротивления обратной и нулевой последовательности соответственно. После возникновения КЗ мощность, передаваемая от генератора в систему, изменится, как и суммарное сопротивление прямой последовательности, связывающее генератор с системой.

# Динамическая устойчивость при коротких замыканиях в системе



## Динамическая устойчивость при коротких замыканиях в системе

- В момент КЗ из-за изменения параметров схемы происходит переход с одной характеристики мощности на другую (рис.14.3). Так как ротор обладает механической инерцией, то угол мгновенно измениться не может и отдаваемая генератором мощность уменьшается до значения  $P_{(0)}$ . Мощность турбины при этом не изменяется в виду запаздывания её регуляторов. На роторе генератора появляется некоторый избыточный момент, определяемый избытком мощности ( $\Delta P = P_0 - P_{(0)}$ ). Под действием этого момента ротор генератора начинает ускоряться, угол  $\delta$  увеличивается.

## Динамическая устойчивость при коротких замыканиях в системе

- Качественно процесс протекает так же, как и в предыдущем случае внезапного отключения линии. Поскольку линия  $L2$ , как и любой другой элемент энергосистемы, имеет защиту, через определённое время она отключится выключателями В1 и В2. Это время рассчитывается как

$$t_{откл} = t_{сз} + t_{выкл} \quad ,$$

- где  $t_{сз}$  – собственно время срабатывания защиты;  
 $t_{выкл}$  – время срабатывания выключателей В1 и В2.

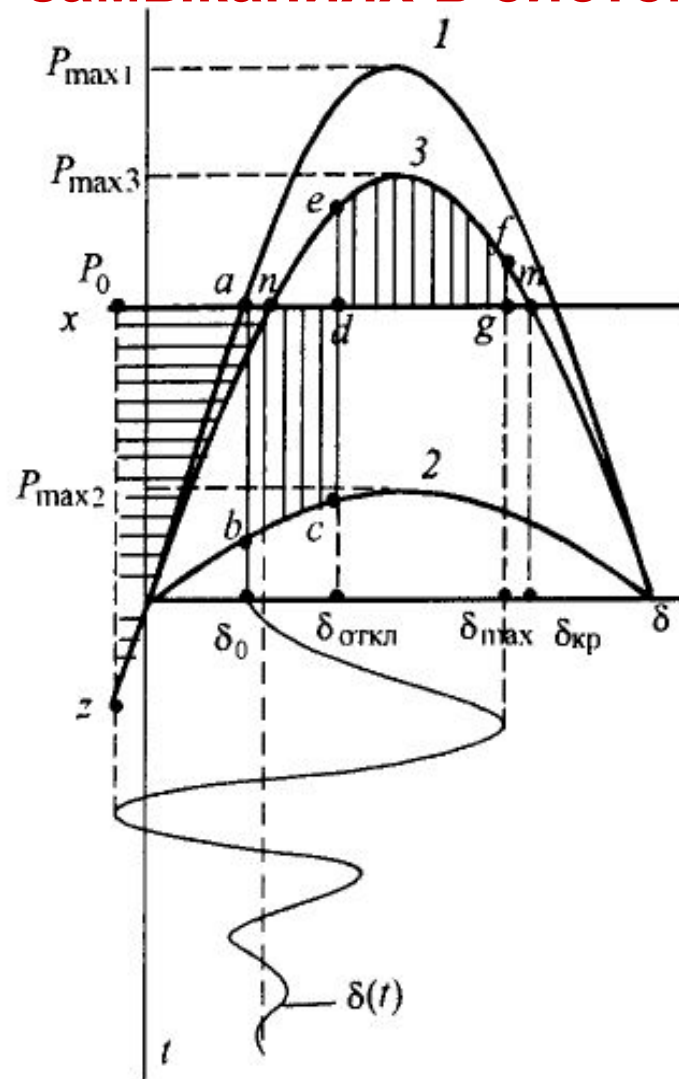
## Динамическая устойчивость при коротких замыканиях в системе

- Времени  $t_{откл}$  соответствует угол отключения КЗ  $\delta_{откл}$ . Отключение КЗ вызывает переход с характеристики мощности аварийного режима 2 на характеристику послеаварийного режима 3. При этом меняется знак избыточного момента; он превращается из ускоряющего в тормозящий. Ротор, затормаживаясь, продолжает движение в сторону увеличения угла из-за накопленной в процессе ускорения кинетической энергии. Это движение будет продолжаться до тех пор, пока площадь торможения  $f_{dcfg}$  не сравняется с площадью ускорения  $f_{abcd}$ .

## Динамическая устойчивость при коротких замыканиях в системе

- Но движение ротора не прекращается, так как на него действует тормозной избыточный момент, определяемый избытком мощности  $\Delta P_{\text{торм}} = P_f - P_0$ . Ротор, ускоряясь, начинает движение в обратную сторону. Его скорость максимальна в точке  $n$ . После точки  $n$  относительная скорость начинает уменьшаться и становится равной нулю в точке  $z$ . Эта точка определяется из равенства площадей  $f_{nefgd}$  и  $f_{xnz}$ . Вследствие потерь энергии колебания ротора будут затухать около нового положения равновесия послеаварийного режима – точки  $n$ .

# Динамическая устойчивость при коротких замыканиях в системе



## Анализ трёхфазного КЗ графическим методом

При трёхфазном коротком замыкании в начале линии взаимное сопротивление схемы становится бесконечно большим, так как сопротивление реактанса  $X_{\Delta}^{(3)} = 0$ . При этом характеристика мощности аварийного режима совпадает с осью абсцисс (рис.14.4). Ротор генератора начинает своё относительное движение под действием избыточного момента, равного механическому моменту турбины. Дифференциальное уравнение движения ротора при этом имеет вид

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 \quad . \quad (14.4)$$



## Анализ трёхфазного КЗ графическим методом

- Это уравнение является линейным и имеет аналитическое решение. Перепишем уравнение (14.4) в следующем виде

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_0}{T_j} ,$$

- откуда взяв интеграл от левой и правой частей, получим

$$\omega = \frac{P_0}{T_j} t + c_1 . \quad (14.5)$$

## Анализ трёхфазного КЗ графическим методом

- При  $t = 0$  относительная скорость ротора  $\omega = 0$  и, следовательно,  $c_1 = 0$ . Проинтегрировав ещё раз (14.5), получим

$$\delta = \frac{P_0}{T_j} \frac{t^2}{2} + c_2 \quad .$$

- Постоянная интегрирования  $c_2$  определяется из условий:  $\delta = \delta_0, c_2 = \delta_0$  при  $t = 0$ . Окончательно зависимость угла от времени имеет вид

$$\delta = \frac{P_0}{T_j} \frac{t^2}{2} + \delta_0 \quad .(14.6)$$

## Анализ трёхфазного КЗ графическим методом

- Предельный угол отключения трёхфазного КЗ может быть определён из выражения (14.3), упрощённого условием  $P_{\max 2} = 0$  :

$$\cos \delta_{\text{откл.пр}} = \frac{P_0 (\delta_{\text{кр}} - \delta_0) + P_{\max 3} \cos \delta_{\text{кр}}}{P_{\max 3}} .$$

## Анализ трёхфазного КЗ графическим методом

- Предельное время отключения при трёхфазном КЗ определится из выражения (14.7):

$$t_{откл.пр} = \sqrt{\frac{2T_j(\delta_{откл.пр} - \delta_0)}{P_0}} .$$

## Решение уравнения движения ротора методом последовательных интервалов

- Уравнение движения ротора нелинейно и не может быть решено аналитически. Исключением является полный сброс мощности в аварийном режиме, т.е.  $P_{ав. max} = 0$ , рассмотренный выше. Уравнение (14.4) решается методами численного интегрирования. Одним из них является метод последовательных интервалов, иллюстрирующий физическую картину протекания процесса.
- В соответствии с этим методом весь процесс качания ротора генератора разбивается на ряд интервалов времени  $\Delta t$  и для каждого из них последовательно вычисляются приращение угла  $\Delta \delta$ .

## Решение уравнения движения ротора методом последовательных интервалов

- В момент КЗ, отдаваемая генератором мощность падает и возникает некоторый избыток мощности  $\Delta P_{(0)}$ . Для малого интервала времени  $\Delta t$  можно допустить, что избыток мощности в течение этого интервала остаётся неизменным. Интегрируя выражение (14.4), в конце получим в конце первого интервала

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta V_{(1)} = \alpha_{(0)} \Delta t + c_1, \quad \delta_{(1)} = \alpha_{(0)} \frac{\Delta t^2}{2} + c_2 \quad .$$

## Решение уравнения движения ротора методом последовательных интервалов

- Относительная скорость ротора в момент КЗ равна нулю ( $c_1 \neq 0$ ) и поэтому относительная скорость ротора в конце первого интервала равна  $\dot{\delta}_1$ . При  $\Delta t$  угол  $\delta_1$  поэтому  $\delta = \delta_0$ . Ускорение  $\ddot{\delta} = \alpha_0$  может быть вычислено из (9.1):

$$\alpha_0 = \frac{\Delta P_{(0)}}{T_j} ,$$

отсюда следует

$$\Delta \delta_{(1)} = \frac{\Delta P_{(0)}}{T_j} \frac{\Delta t^2}{2} .$$

## Решение уравнения движения ротора методом последовательных интервалов

- Здесь угол и время выражены в радианах. В практических расчётах угол выражается в градусах, а время – в секундах:

- $$\delta_{(град)} = \frac{360 f}{\omega_0} \delta_{(рад)} \quad , (14.8)$$

- $$t_{(с)} = \frac{t_{(рад)}}{\omega_{(0)}} \quad . (14.9)$$



## Решение уравнения движения ротора методом последовательных интервалов

- Используя (14.8) и (14.9) и учитывая, что

- $$T_{j(c)} = \frac{T_{j(pad)}}{\omega_0},$$

- получаем

- $$\delta_{(1)} = \delta_0 + \frac{360 f \Delta t^2}{T_j} \frac{\Delta P_{(0)}}{2} = \delta_0 + K \frac{\Delta P_{(0)}}{2},$$

- где

$$K = \frac{360 f \Delta t^2}{T_j} \quad . \quad (14.10)$$

## Решение уравнения движения ротора методом последовательных интервалов

- Ускорение, создаваемое во втором интервале, пропорционально избытку мощности в конце первого интервала  $\Delta P_{(1)}$ . При вычислении приращения угла в течение второго интервала необходимо учесть то, что кроме действующего в этом интервале ускорения ротор уже имеет в начале интервала скорость  $V_{(1)}$

- $$\Delta\delta_{(2)} = V_{(1)}\Delta t + \frac{\alpha_{(1)}\Delta t^2}{2} = V_{(1)}\Delta t + K \frac{\Delta P_{(1)}}{2}, \quad (14.11)$$

- где

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_{\max} \sin(\delta_1) .$$

- Ускорение  $\alpha_{(0)}$  изменяется в течение первого интервала времени, поэтому для снижения погрешности вычисления значения скорости необходимо предположить, что на первом интервале действует среднее ускорение

$$\alpha_{(0)cp} = \frac{(\alpha_{(0)} + \alpha_{(1)})}{2}$$

- Тогда относительная скорость будет выражена формулой

$$V_{(1)} = \alpha_{(0)cp} \Delta t = \frac{\alpha_{(0)} + \alpha_{(1)}}{2} \Delta t .$$

Подставляя это выражение в (14.11), получаем

$$\Delta\delta_{(2)} = \frac{\alpha_{(0)} + \alpha_{(1)}}{2} \Delta t + \frac{2\alpha_{(1)}\Delta t^2}{2} = \frac{\alpha_{(0)}\Delta t^2}{2} + \alpha_{(1)}\Delta t^2 ,$$

или

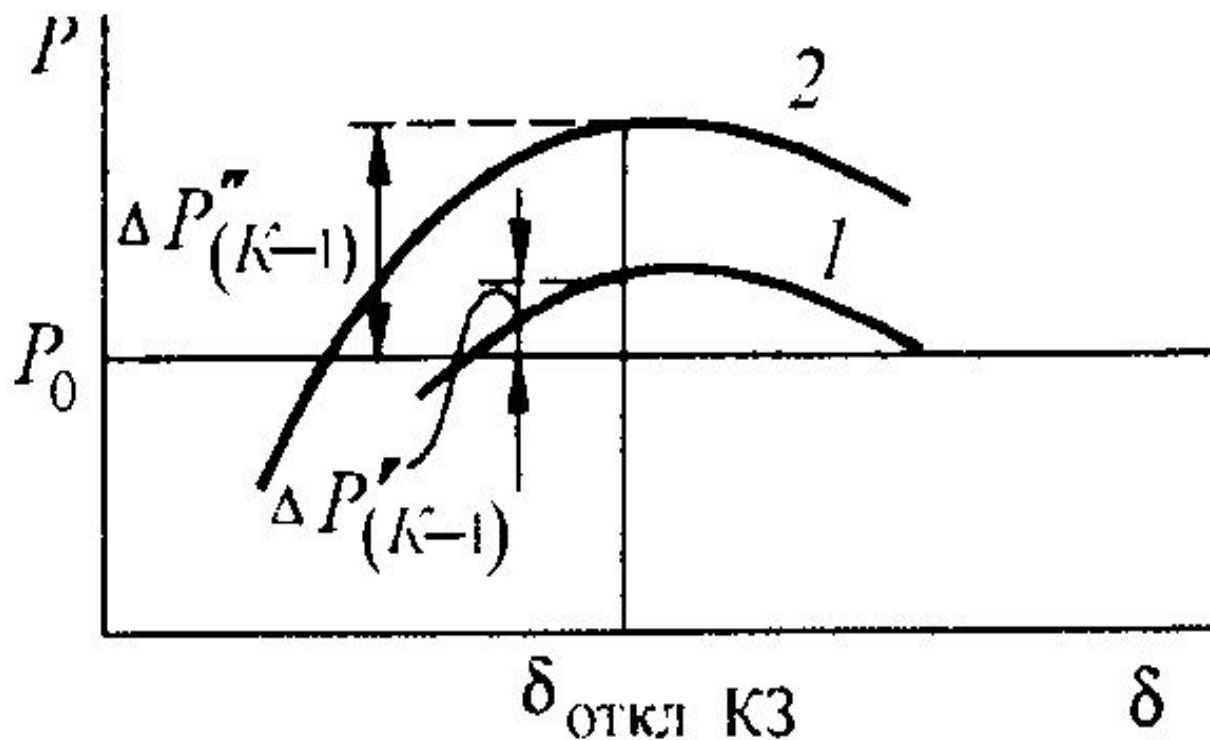
$$\Delta\delta_{(2)} = \Delta\delta_{(1)} + K\Delta P_{(1)} .$$

- Приращение угла на последующих интервалах рассчитываются аналогично:

$$\Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} + K\Delta P_{(n-1)} .$$

- Если в начале некоторого  $K$  – интервала происходит отключение КЗ, то избыток мощности внезапно изменяется от некоторой величины  $\Delta P'_{(K-1)}$  (рис.14.6) до  $\Delta P_{(K-1)}$ , что соответствует переходу с характеристики 1 на 2.

К определению избытка мощности при переходе от одного режима (1)  
к другому (2)



К определению избытка мощности при переходе от одного режима (1)  
к другому (2)

- Приращение угла на первом интервале после отключения КЗ определится как

$$\Delta\delta_{(K)} = \Delta\delta_{(K-1)} + K \frac{\Delta P'_{(K-1)} + \Delta P''_{(K-1)}}{2} . (14.12)$$

- Расчёт методом последовательных интервалов ведётся до тех пор, пока угол не начнёт уменьшаться, либо станет видно, что угол неограниченно растёт, т.е. устойчивость машины нарушается.

# Динамическая устойчивость сложных систем

- Расчёт динамической устойчивости сложных систем выполняется в следующей последовательности.
- 1. Расчёт нормального режима работы электрической системы до возникновения КЗ. Результатом расчёта являются значения ЭДС электростанций ( $E'_i$ ) и углы между ними.
- 2. Составление схем замещения обратной и нулевой последовательностей и определение их результирующих сопротивлений относительно точки КЗ и точки нулевого потенциала схемы. Вычисление дополнительных реактансов  $X_{\Delta}^{(0)}$  соответствующих рассматриваемым КЗ.
- 3. Расчёт собственных и взаимных проводимостей для всех электростанций системы в аварийном и послеаварийном режимах.



## Динамическая устойчивость сложных систем

- 4. Расчёт угловых перемещений роторов машин с помощью метода последовательных интервалов. Определение значений отдаваемых машинами мощностей в начале первого интервала:

$$P_1 = E_1^2 Y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 Y_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) + \dots$$

- .....  
 $P_2 = E_2 E_1 Y_{21} \sin(\delta_{21} - \alpha_{21}) + E_2^2 Y_{22} \sin \alpha_{22} + \dots$

- 5. Определение избытков мощности в начале первого интервала:

- $\Delta P_{1(0)} = P_{10} - P_1$  ,

- $\Delta P_{2(0)} = P_{20} - P_2$  ,

- где  $P_{10}$  ,  $P_{20}$  и т.д. – мощности, вырабатываемые машинами в момент, предшествующий КЗ.

## Динамическая устойчивость сложных систем

- 6. Вычисление угловых перемещений роторов генераторов в течение первого интервала  $\Delta t$  :

$$\Delta\delta_{1(1)} = K_1 \frac{\Delta P_{1(0)}}{2} ,$$

$$\Delta\delta_{2(1)} = K_2 \frac{\Delta P_{2(0)}}{2} ,$$

.....

Во втором и последующих интервалах выражения для угловых перемещений имеют вид:

$$\Delta\delta_{1(n)} = \Delta\delta_{1(n-1)} + K_1 \Delta P_{1(n-1)} ,$$

$$\Delta\delta_{2(n)} = \Delta\delta_{2(n-1)} + K_2 \Delta P_{2(n-1)} ,$$

.....

Коэффициенты  $K$  рассчитываются в соответствии с выражением (14.10).

## Динамическая устойчивость сложных систем

7. Определение значений углов в конце первого – начале второго интервалов

$$\Delta\delta_{1(n)} = \delta_{1(n-1)} + \Delta\delta_{1(n)} \quad ,$$

$$\Delta\delta_{2(n)} = \delta_{2(n-1)} + \Delta\delta_{2(n)} \quad ,$$

.....

где  $\delta_{1(n-1)}$  ,  $\delta_{2(n-1)}$  и т.д. – значения углов в конце предшествующего интервала.

## Динамическая устойчивость сложных систем

- 8. Нахождение новых значений взаимных углов расхождения роторов:

$$\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2 \quad ,$$

$$\delta_{13} = \delta_1 - \delta_3 \quad ,$$

.....

- Определив эти значения, переходят к расчёту следующего интервала, т.е. вычисляется мощность в начале этого интервала, а затем повторяется расчёт, начиная с п.5.

## Динамическая устойчивость сложных систем

- В момент отключения повреждения все собственные и взаимные проводимости ветвей меняются. Угловые перемещения роторов в первом интервале времени после отключения подсчитываются для каждой машины по выражению (14.12).
- Расчёт динамической устойчивости сложных систем выполняется для определённого времени отключения КЗ и продолжается не только до момента отключения КЗ, а до тех пор, пока не будет установлен факт нарушения устойчивости или её сохранения. Об этом судят по характеру изменения относительных углов.

## Динамическая устойчивость сложных систем

- Если хотя бы один угол неограниченно растёт (например, угол  $\delta_{12}$  на рис.14.7), то система считается динамически неустойчивой. Если все взаимные углы имеют тенденцию к затуханию около каких-либо новых значений, то система устойчива.
- Если по характеру изменения относительных углов установлено нарушение устойчивости системы при принятом в начале расчёта времени отключения КЗ, то для определения предельного времени КЗ следует повторить расчёт, уменьшая время отключения КЗ до тех пор, пока не будет обеспечена устойчивая работа энергосистемы.

# Динамическая устойчивость сложных систем

