

ВЛИЯНИЕ МЕСТНОЙ НАГРУЗКИ СТАНЦИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ ПРИ ТРЕХФАЗНОМ АВТОМАТИЧЕСКОМ ПОВТОРНОМ ВКЛЮЧЕНИИ ОДНОЦЕПНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Г. Ф. ПУХОВА

В нашей статье [2] было показано, что при работе станции, не имеющей значительной местной нагрузки, через одноцепную линию электропередачи на шины мощного объединения, существует определенная область допустимого, с точки зрения сохранения устойчивости системы, времени раздельной работы. Это время зависит от типа станций (гидрогенераторная, турбогенераторная), от реактанса электропередачи, от длительности и тяжести аварии и т. д. Проведенные расчеты показали, что предел допустимого времени раздельной работы для станций с большими инерционными постоянными (16 сек.), работающими до A/B с номинальной нагрузкой, даже при предельно-легких авариях (однополюсное к. з. в сетях с изолированной нейтралью), составляет 0,55 сек. Во всех же случаях, имеющих практическое значение, оно значительно меньше.

В действительности, однако, станция, работающая на шины мощного объединения, почти всегда обладает какой-то местной нагрузкой. Можно ожидать, что эта нагрузка, изменяя избыток мощности на валу станции в периоде раздельной работы, должна оказать существенное влияние на ус-

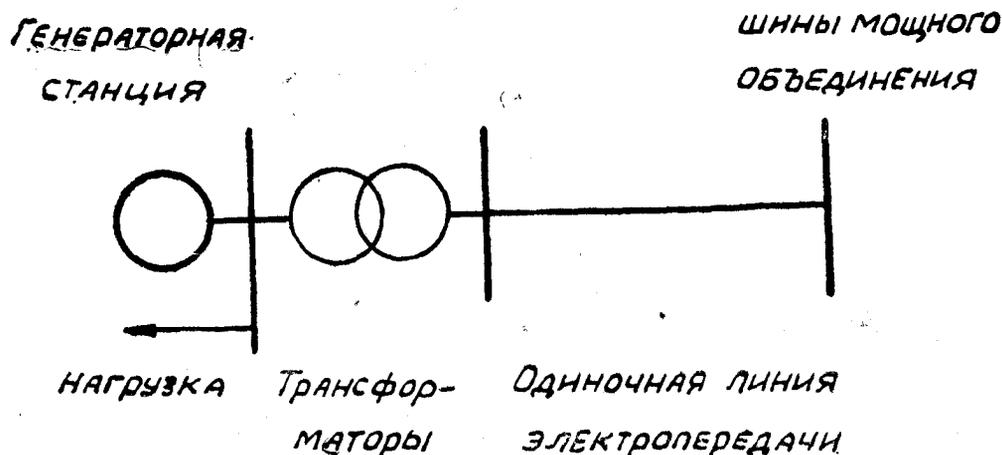


Рис. 1. Схема рассматриваемого участка системы

тойчивость всей системы и, следовательно, изменить допустимое время разрыва синхронной связи. Выяснение характера этого влияния в первом приближении и является целью настоящей работы.

Схема интересующего нас участка системы в этом случае будет иметь вид, изображенный на рис. 1. Пусть $P_{нагр}$ — мощность нагрузки, присоединенной к шинам станции при нормальном режиме, предшествующем аварии. При ориентировочных расчетах полагаем возможным заменить нагрузку

эквивалентным шунтом с сопротивлением $Z_{нагр}$. После подобной замены схема замещения данного участка системы легко может быть приведена к виду, представленному на рис. 2.

Пользуясь принципом наложения, получим, что активная мощность, отдаваемая станцией, определяется формулой

$$P_{эл} = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin (\delta - \alpha_{12}). \quad (1)$$

Обозначения даны в приложении.

Очевидно, что уравнения подобного вида будут соответствовать мощности, отдаваемой станцией в периодах нормальной работы и аварийном. В фазе же раздельной работы, вследствие полного прекращения связи с

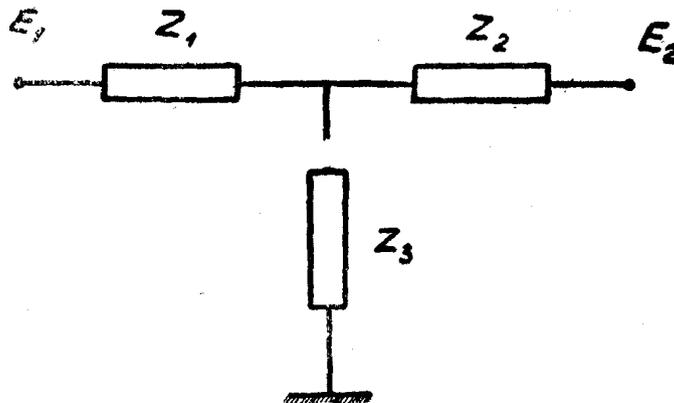


Рис. 2. Схема замещения участка системы

системой, вся нагрузка будет ложиться только на данную станцию. Вводя весь расчет в первом приближении, полагаем возможным мощность нагрузки, присоединенной к шинам станции, считать неизменной и равной $P_{нагр}$ на протяжении всего интервала раздельной работы. Таким образом, уравнения движения ротора в различных фазах цикла автоматического повторного включения будут иметь вид:

Фаза 1. Авария

$$K \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{мех I} - \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11 I} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12 I}} \sin (\delta - \alpha_{12 I}). \quad (2)$$

Фаза 2. Раздельная работа

$$K \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{мех II} - P_{нагр}. \quad (3)$$

Фаза 3. Параллельная работа после АПВ

$$K \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{мех III} - \frac{E_1^2}{Z_{11 III}} \sin \alpha_{11 III} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12 III}} \sin (\delta - \alpha_{12 III}). \quad (4)$$

Здесь индексы I, II, III показывают принадлежность к соответствующей фазе операции.

Для того чтобы операция АПВ не вызывала нарушения устойчивости, требуется выполнение условия

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} \left[P_{мех I} - \frac{E_1^2}{Z_{11 I}} \sin \alpha_{11 I} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12 I}} \sin (\delta - \alpha_{12 I}) \right] d\delta + \int_{\delta_I}^{\delta_{II}} (P_{мех II} - P_{нагр}) d\delta + \\ + \int_{\delta_{II}}^{\delta_I} \left[P_{мех III} - \frac{E_1^2}{Z_{11 III}} \sin \alpha_{11 III} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12 III}} \sin (\delta - \alpha_{12 III}) \right] d\delta \leq 0. \quad (5)$$

Обозначая

$$P_{мех I} - \frac{E_1^2}{Z_{11 I}} \sin \alpha_{11 I} \text{ через } P_I, \quad P_{мех III} - \frac{E_1^2}{Z_{11 III}} \sin \alpha_{11 III} \text{ через } P_{III}, \\ \frac{E_1 E_2}{Z_{12 I}} \text{ через } q_I, \quad \frac{E_1 E_2}{Z_{12 III}} \text{ через } q_{III}$$

и производя интегрирование неравенства (5), получим условие устойчивости рассматриваемого перехода в виде:

$$P_I (\delta_I - \delta_0) + q_I [\cos (\delta_I - \alpha_{12 I}) - \cos (\delta_0 - \alpha_{12 I})] + (P_{мех II} - P_{нагр}) (\delta_{II} - \delta_I) + \\ + P_{III} (\delta_I - \delta_{II}) + q_{III} [\cos (\delta_I - \alpha_{12 III}) - \cos (\delta_{II} - \alpha_{12 III})] \leq 0. \quad (6)$$

Обозначая

$$\frac{P_{мех II} - P_{нагр} - P_{III}}{q_{III}} \text{ через } a, \\ \frac{P_I (\delta_I - \delta_0) + q_I [\cos (\delta_I - \alpha_{12 I}) - \cos (\delta_0 - \alpha_{12 I})] - (P_{мех II} - P_{нагр}) \delta_I + P_{III} \delta_I + \\ + q_{III} \cos (\delta_I - \alpha_{12 III})}{q_{III}} \text{ через } A,$$

получим следующее выражение для определения предельного допустимого значения угла вылета ротора в фазе раздельной работы ($\delta_{II \text{ макс}}$):

$$A + a \delta_{II \text{ макс}} = \cos (\delta_{II \text{ макс}} - \alpha_{12 III}). \quad (7)$$

В связи с тем, что в фазе раздельной работы уравнение движения ротора имеет вид:

$$K \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{мех II} - P_{нагр},$$

предельная длительность этого периода определится уравнением

$$t_{II \text{ макс}} = - \frac{\left(\frac{d\delta}{dt} \right)_{\delta_I} \cdot K}{P_{мех II} - P_{нагр}} \pm \sqrt{\frac{\left(\frac{d\delta}{dt} \right)_{\delta_I}^2 K^2}{(P_{мех II} - P_{нагр})^2} + \frac{(\delta_{II \text{ макс}} - \delta_I) 2 K}{P_{мех II} - P_{нагр}}}. \quad (8)$$

О выборе знака перед корнем в уравнении (8) см. приложение.

Следует заметить, что в рассматриваемом случае установившиеся режимы до и после повторного включения, строго говоря, уже не будут идентичными. Действительно, не исключена возможность того, что ряд приемников электрической энергии, не допускающих кратковременного снижения напряжения, будет отключен от сети. Мы в дальнейших расчетах,

однако, полагаем возможным не учитывать этот фактор в связи с тем, что в обычной промышленной нагрузке удельный вес таких приемников мал.

Приведенные формулы позволяют сравнительно легко произвести расчеты допустимого времени раздельной работы для случаев, когда $P_{нагр} \leq P_{мехII}$.

Несколько сложнее решается вопрос при $P_{нагр} > P_{мехII}$, почему мы и считаем целесообразным выяснить характер протекания операции АПВ в этом случае. Очевидно, что все возможные случаи АПВ при $P_{нагр} > P_{мехII}$ можно условно разделить на две категории:

1. Когда АПВ с длительностью раздельной работы (t_{II}), равной нулю, сопровождается сохранением устойчивости.

2. Когда АПВ при $t_{II} = 0$ вызывает нарушение устойчивости.

Согласно приведенному в приложении правилу выбора знаков, случаям, вошедшим в первую категорию, будет соответствовать знак $+$ перед корнем в уравнении (8). Время раздельной работы, подсчитанное по этому уравнению, будет максимально допустимым, и уменьшение его должно сопровождаться улучшением условий устойчивости.

Случаям, отнесенным ко второй категории, соответствует в уравнении (8) знак $-$ перед корнем. Это означает, что фаза раздельной работы здесь ограничена двухсторонним пределом: она не может длиться меньше времени $t'_{II, макс}$, подсчитанного при знаке $-$, с другой стороны, ее продолжительность не должна превышать $t''_{II, макс}$, подсчитанное при знаке $+$. Время раздельной работы, не лежащее в интервале $t'_{II, макс} \div t''_{II, макс}$, должно, следовательно, приводить к нарушению синхронизма. Указанное обстоятельство чрезвычайно осложняет проведение операции АПВ и заставляет нас считать ее здесь практически трудно осуществимой. В дальнейшем этот случай нами не рассматривается.

Полагая в неравенстве (6) величину $\delta_{II} - \delta_I$ равной нулю, получим, что в случаях, отнесенных нами к первой категории, должно выполняться условие:

$$q_{III} \geq \frac{P_I(\delta_1 - \delta_0) + q_I [\cos(\delta_1 - \alpha_{12I}) - \cos(\delta_1 - \alpha_{12I})] + P_{III}(\delta_1 - \delta_I)}{\cos(\delta_1 - \alpha_{12III}) - \cos(\delta_I - \alpha_{12III})}$$

Для наглядного представления характера влияния местной нагрузки станции на допустимое при АПВ время раздельной работы нами был произведен ряд расчетов этого времени для станции с $K = 0,03$, связанной одиночной линией длиной в 100 км с шинами мощного объединения. Результаты этих расчетов представлены в виде кривых $t_{II, макс} = f(P_{нагр})$ на рис. 3.

Анализ приведенных кривых позволяет сделать следующие заключения:

1. При предельно легких авариях, характеризуемых $X_k = \infty$, нагрузка, включенная на шины станции, в рассмотренном интервале ($0 < P_{нагр} \leq 2$) увеличивает допустимое время раздельной работы, облегчая тем самым проведение операции АПВ. На участке $P_{нагр} = 0 \div 1$ кривая $t_{II, макс} = f(P_{нагр})$ имеет восходящий характер, уходя в бесконечность при $P_{нагр} = 1$. Таким образом, увеличение нагрузки здесь сопровождается возрастанием допустимого времени раздельной работы и при $P_{нагр} = 1$ теоретически оно может быть принято сколько угодно большим. Физический смысл последнего заключения очевиден. Действительно, отключение линии не может нарушить установившегося движения ротора станции, имеющей на своих шинах нагрузку, равную мощности ее первичного двигателя.

Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается плавным падением допустимого времени раздельной работы, причем и на границе рассматривае-

мого интервала, т. е. при $P_{нагр} = 2$, его величина ($t_{II макс} = 0,32$) вполне допускает проведение операции АПВ.

2. При тяжелых авариях, характеризуемых $X_k = 0$, влияние нагрузки на допустимое время раздельной работы также положительно, но сам характер кривой $t_{II макс} = f(P_{нагр})$ значительно отличается от разобранных в пункте 1. Здесь в интервале $P_{нагр} = 0 \div 1$ кривая $t_{II макс} = f(P_{нагр})$ почти прямолинейна и при $P_{нагр} = 1$ $t_{II макс}$ имеет вполне определенную конечную величину. При дальнейшем увеличении $P_{нагр}$ допустимое время раздельной работы растет более интенсивно и, наконец, при некотором критическом значении $P_{нагр} = P_{нагр кр}$ кривая $t_{II макс} = f(P_{нагр})$ испытывает разрыв, сопровождающийся резким увеличением значения $t_{II макс}$. Понять физический смысл указанного разрыва кривой при $P_{нагр} = P_{нагр кр}$ нетрудно из изложенных ниже рассуждений. Прежде всего необходимо обратить внима-

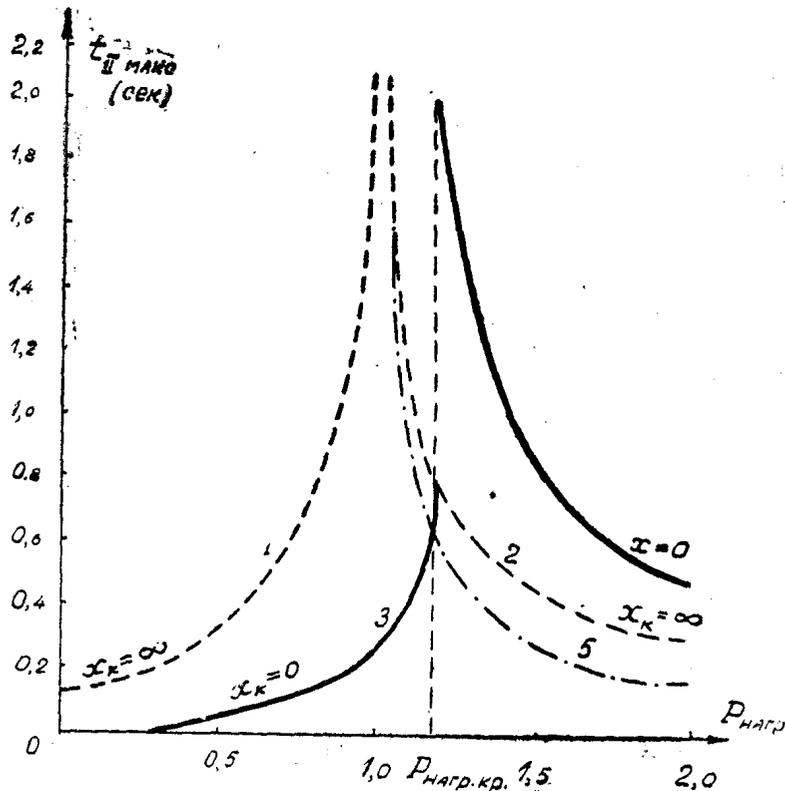


Рис. 3. Зависимость допустимого при АПВ времени раздельной работы от нагрузки, приключенной к шинам станции

ние на то, что при $P_{нагр} > P_{мех II}$ уравнение (7) может иметь несколько решений относительно угла $\delta_{II макс}$. Наиболее легко проследить это обстоятельство на следующем примере: предположим, что ротор станции, получив в результате аварии некоторый запас живой силы, в периоде раздельной работы продолжает двигаться в первоначальном направлении, испытывая некоторое торможение, связанное с недостатком мощности, равным $P_{нагр} - P_{мех II}$. Выберем значение $P_{нагр}$ так, чтобы остановка относительного движения ротора произошла при угле $\delta_{II_0} = \delta_i$. Тогда уравнение (7) может дать нам следующие три решения относительно угла $\delta_{II макс}$: 1) угол $\delta_{II макс}^a$, лежащий в стороне первоначального движения ротора и по величине несколько меньший, чем угол δ_i , 2) угол $\delta_{II макс}^b$, равный углу δ_i ,

3) угол $\delta_{II\text{ макс}}^c$, лежащий в стороне обратной первоначальному отклонению ротора, т. е. по величине меньший, чем угол δ_l .

Возникает вопрос: какое же из указанных трех решений должно нами учитываться в расчетах?

Очевидно, что по времени ротор прежде всего достигнет угла $\delta_{II\text{ макс}}^a$, при котором

$$\int_{\delta_{II\text{ макс}}^a}^{\delta_l} [P_{\text{мех III}} - P_{\text{эл III}}] d\delta = \int_{\delta_{II\text{ макс}}^a}^{\delta_l} (P_{\text{мех II}} - P_{\text{нагр}}) d\delta$$

и в любой точке интервала $\delta_l \div \delta_{II\text{ макс}}^a$ повторное включение не будет вызывать нарушения синхронизма. Если же мы произведем эту операцию не в указанном интервале, а при $\delta_{II\text{ макс}}^c = \delta_l$, то синхронизм также будет сохранен, но здесь достаточно сколь угодно малого уменьшения длительности раздельной работы против времени, соответствующего углу $\delta_{II\text{ макс}}^c = \delta_l$, чтобы система теряла устойчивость. Действительно, в реальных случаях всегда можно найти такую величину $\Delta\delta$, при которой

$$\int_{\delta_l - \Delta\delta}^{\delta_l} (P_{\text{мех III}} - P_{\text{эл III}}) d\delta < \int_{\delta_l - \Delta\delta}^{\delta_l} (P_{\text{мех II}} - P_{\text{нагр}}) d\delta$$

и неравенство (5) невыполнимо.

Таким образом, мы должны считаться с тем, что при углах δ_{II} , превышающих $\delta_{II\text{ макс}}^a$, возможна полоса неустойчивых переходов и, во избежание неудачных повторных включений, полагаем необходимым в расчетах учитывать только тот угол $\delta_{II\text{ макс}}$, которого ротор достигает раньше других по времени.

Нами только что разобран случай, когда остановка относительного движения ротора происходит при угле $\delta_{II_0} = \delta_l$. Допустим, что мы незначительно увеличили $P_{\text{нагр}}$. Остановка относительного движения ротора произойдет теперь при угле $\delta_{II_0} < \delta_l$. Совершенно очевидно, что повторное включение, произведенное при угле δ_{II_0} , и в этом случае будет сопровождаться сохранением синхронизма, но нетрудно доказать, что здесь второе решение уравнения (7) должно дать значение угла $\delta_{II\text{ макс}}^c$, меньшее, чем угол δ_{II_0} . Действительно, всегда можно найти такую величину $\Delta\delta$, при которой выполнялось бы условие:

$$\int_{\delta_{II_0} - \Delta\delta}^{\delta_l} (P_{\text{мех III}} - P_{\text{эл III}}) d\delta > \int_{\delta_{II_0} - \Delta\delta}^{\delta_{II_0}} (P_{\text{мех II}} - P_{\text{нагр}}) d\delta$$

и, следовательно, устойчивы будут операции АПВ, производимые не только при угле δ_{II_0} , но и в некоторой области меньших углов, прилегающих к этой точке. С другой стороны, сколь угодно малое возрастание величины $P_{\text{нагр}}$ против значения мощности нагрузки, соответствующей $\delta_{II_0} = \delta_l$, должно привести к тому, что первое решение уравнения (7) даст

значение угла δ_{II}^a , увеличенное сравнительно с получающимся при $\delta_{II}^a = \delta_I$, так как равенство

$$\int_{\delta_{II}^a}^{\delta_I} (P_{мех II} - P_{эл II}) d\delta = \int_{\delta_{II}^a}^{\delta_{II}^0} (P_{мех II} - P_{нагр}) d\delta$$

с возрастанием $P_{нагр}$ и с уменьшением δ_{II}^0 будет удовлетворяться уже при больших значениях δ_{II}^a . Таким образом, мы должны сделать важный вывод: с увеличением $P_{нагр}$ полоса неустойчивости, лежащая между углами δ_{II}^a и δ_{II}^b , соответствующими первому и второму решениям равенства (7), сужается. Интересующий нас разрыв кривой 3—4 на рис. 3 соответствует случаю полного исчезновения этой полосы. При этом сливаются углы δ_{II}^a и δ_{II}^b и становится возможным АПВ на всем протяжении движения ротора от его положения в конце аварийного периода до достижения им угла δ_{II}^c . Допустимая длительность раздельной работы в этом случае резко увеличивается, так как она теперь включает в себя время двойного пробега ротором интервала $\delta_I \div \delta_{II}^0$ плюс время прохождения интервала $\delta_I \div \delta_{II}^c$. С дальнейшим ростом нагрузки необходимо ограничивать только обратный ход ротора, и равенство (7) будет давать одно решение — угол δ_{II}^c , лежащий в стороне, противоположной первоначальному отклонению. В дальнейшем, т. е. в интервале $P_{нагр} \div 2$, кривая $t_{II}^c = f(P_{нагр})$ плавно спадает, давая, однако, значение $t_{макс}$, вполне допускающее безблезненное проведение операции АПВ.

3. Сопоставление ветвей 2 и 4 кривых, изображенных на рис. 3, позволяет заключить, что в случаях, когда $P_{нагр} > P_{нагр кр}$, допустимая длительность периода раздельной работы при тяжелых авариях у шин станции больше, нежели при легких. Более тяжело в интервале $P_{нагр} \div 2$ должны проходить АПВ при коротких замыканиях у противоположного конца линии, так как здесь нарушается приток мощности из системы, нагрузка же на шинах станций сохраняет значительную величину. Нетрудно видеть, что в предельном случае, когда при аварии связь с системой полностью отсутствует, а на станцию ложится вся нагрузка, допустимые времена раздельной работы будут меньше находимых по кривой 2 (рис. 3) на величину времени отключения аварии, т. е. на $t_I = 0,15$ сек. На рис. 3 этому случаю соответствует кривая 5, из сопоставления которой с ветвью 4 следует, что при $P_{нагр} = P_{нагр кр} \div 2$ АПВ с длительностью периода раздельной работы в 0,2 сек. возможно при любых типах аварий.

4. Совокупность всех кривых, изображенных на рис. 3, позволяет предположить, что по мере облегчения аварии значения $P_{нагр кр}$ будут уменьшаться, приближаясь в пределе к $P_{нагр кр} = P_{мех II}$, в то время как соответствующие им времена $(t_{II}^a, t_{II}^b) P_{нагр кр}$ должны расти.

В соответствии с этим положением и учитывая выводы пункта 3, можно сделать заключение о том, что наиболее тяжелыми случаями для проведения операций АПВ следует считать:

- 1) при $P_{нагр} \ll P_{мех II}$ — трехполюсное короткое замыкание у шин станции;
- 2) при $P_{нагр} \geq P_{нагр кр}$ — трехполюсное короткое замыкание у противо-

положного конца линии (здесь $P_{нагр\ кр}^{(3)}$ — значение $P_{нагр\ кр}$ при трехполюсном коротком замыкании у шин станции).

3) при $P_{мех\ и} < P_{нагр} < P_{нагр\ кр}^{(3)}$ — трехполюсное короткое замыкание либо у шин станции, либо у шин объединения. Очевидно, что первому случаю будут соответствовать значения $P_{нагр}$, лежащие левее проекции точки пересечения кривых 3 и 5 (рис. 3); второй же случай имеет место при $P_{нагр}$, лежащих правее этой проекции.

5. Соображения, изложенные в пунктах 1, 2, 3, 4, заставляют нас прийти к выводу, что в рассмотренном интервале $P_{нагр} = 0 \div 2$, нагрузка, приключенная к шинам станции, значительно облегчает проведение операции АПВ, причем наиболее резко сказывается ее благоприятное влияние при значениях $P_{нагр}$, равных или несколько превышающих величину $P_{нагр\ кр}$.

Приложение

Определение знака перед корнем в уравнении (8)

Во всех случаях, когда ускорение $\frac{P_{мех\ и} - P_{нагр}}{K}$ и начальная скорость $\left(\frac{d\delta}{dt}\right)_{\delta_1}$ имеют одинаковые знаки, перед корнем в уравнении (8)

должен быть поставлен знака $+$.

В тех же случаях, когда указанные ускорение и скорость имеют разные знаки, в фазе раздельной работы возможно колебание ротора. Наиболее просто при этом решается вопрос, если угол $\delta_{и\ макс}$ лежит в стороне, обратной начальному отклонению, так как здесь, очевидно, перед корнем также должен быть поставлен $+$. Если же этот угол расположен в стороне первоначального отклонения и скорость ротора в периоде раздельной работы не меняет знака, необходимо найти значение суммы:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} [P_I - q_I \sin(\delta - \alpha_{12})] d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_2} [P_{III} - q_{III} \sin(\delta - \alpha_{12_{III}})] d\delta.$$

В случае, когда указанная сумма меньше нуля, в уравнении (8) перед корнем должен быть взят знак $-$. В случае, когда указанная сумма больше нуля, перед корнем должны быть поставлены знаки \pm и найдены времена $t'_{и\ макс}$ и $t''_{и\ макс}$, соответствующие каждому из этих знаков. Сохранение устойчивости при АПВ здесь будет возможно только при условии, если действительное время раздельной работы $t_{и}$ будет удовлетворять условию:

$$t'_{и\ макс} \leq t_{и} \leq t''_{и\ макс},$$

где $t'_{и\ макс}$ — значение $t_{и\ макс}$, подсчитанного при условии, что в уравнении (8) перед корнем стоит знак $-$, $t''_{и\ макс}$ — то же, но когда перед корнем стоит знак $+$.

Принятые обозначения

E_1 — э. д. с. станции за продольным переходным реактансом.

E_2 — напряжение шин бесконечной мощности.

$Z_{11} = R_{11} + jX_{11}$ — собственный импеданс станции.

$$\alpha_{11} = 90 - \psi_{11}; \psi_{11} = \arctg \frac{X_{11}}{R_{11}}.$$

$Z_{12} = R_{12} + jX_{12}$ — взаимный импеданс станции и объединения.

$$\alpha_{12} = 90 - \psi_{12}; \psi_{12} = \arctg \frac{X_{12}}{R_{12}}.$$

K — инерционный коэффициент станции.

C — постоянная инерции станции.

ω — угловая скорость вращения синхронной оси системы.

δ — угол между поперечной осью ротора и синхронной осью системы.

t — время.

$P_{эл}$ — электрическая мощность, отдаваемая станцией.

$P_{мех}$ — мощность первичного двигателя станции.

$P_{нагр}$ — мощность нагрузки, приключенной к шинам станции перед аварией.

δ_0 — угол вылета ротора в режиме, предшествующем аварии.

δ_1 — значение угла δ в конце аварии.

δ_{II} — то же в конце фазы отдельной работы.

δ_l — значение угла δ в установившемся, но неустойчивом движении роторов в третьей фазе операции АПВ, отсчитанное в направлении движения в начале этой фазы.

X_K — реактанс шунта в месте короткого замыкания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горев А. А. — Введение в теорию устойчивости параллельной работы электрических станций, Кубуч, 1936.

2. Пухова Г. Ф. — Устойчивость системы при трехфазном АПВ одиночных линий электропередач, Научные записки Львовского политехнического института, выпуск II, 1948.