

УДК 621.311

**ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ
ФАКТОРОВ НА СИНХРОННУЮ ДИНАМИЧЕСКУЮ
УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (ЭЭС)**

ГУСЕЙНОВ Ак. М.

АзНИ и ПИИ Энергетики, АО «Азерэнерджи»

(продолжение статьи, опубликованной в №3, 2007г. журнала)

АННОТАЦИЯ

Оценена степень влияния различных факторов на величину предельного времени отключения короткого замыкания (к.з.) по условию сохранения синхронной динамической устойчивости в многомашинной регулируемой электроэнергетической системе (ЭЭС).

Показано, что наибольшее влияние на предельное время отключения оказывает способ представления нагрузок узлов (статическими или динамическими характеристиками, постоянным сопротивлением, $S_n = \text{const}$).

Показана недопустимость замены генераторов с быстродействующим (тиристорным или высокочастотным возбуждением) и АРВ сильного действия постоянной ЭДС E'_d за реактансом X'_d .

Показано также, что для большей точности, ближайшую к месту к.з. электростанцию следует заменить не менее, чем двумя эквивалентными генераторами.

Ключевые слова: энергосистема, синхронная динамическая устойчивость, динамические и статические характеристики нагрузок, автоматический регулятор возбуждения.

**ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ
ФАКТОРОВ НА СИНХРОННУЮ ДИНАМИЧЕСКУЮ
УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (ЭЭС)**

Б. Учет различных характеристик нагрузки

Как известно, нагрузка электрической системы представляет собой совокупность многочисленных потребителей электроэнергии, обладающих различными статическими и динамическими характеристиками и питающихся от узловых точек энергосистемы. Эти узлы комплексных нагрузок обычно обладают большой мощностью, и процессы в них оказывают существенное влияние на систему.

Практика исследований устойчивости энергосистем показывает, что при различных параметрах нагрузки пределы динамической устойчивости генераторов могут быть существенно различными. Во многих работах [4] подчеркивается мысль о значительно большем влиянии различных допущений при моделировании нагрузки на результаты расчетов, нежели уточнение математической модели генераторов.

Как известно, при расчетах динамической устойчивости применяют следующие способы моделирования нагрузки:

1. Постоянной мощностью $\dot{S}_n = \text{const}$;
2. Постоянным сопротивлением $\dot{Z}_n = \text{const}$;
3. Статическими характеристиками;

4. Динамическими характеристиками.

Первый и второй способы применяются в тех случаях, когда исследуется влияние параметров генераторов и их систем регулирования при изучении устойчивости отдельной электропередачи или выполняются предварительные расчеты динамической устойчивости сложных энергосистем с ориентировочными значениями основных параметров [4].

Представление нагрузки в виде $\dot{Z}_n = \text{const} \left(\dot{Y}_n = \frac{\dot{S}_n}{|U_n|^2} \right)$ означает, что мы

допускаем квадратичную зависимость P и Q от U , независимость P от f и гиперболическую зависимость Q от f [3].

Такое представление не соответствует реальным характеристикам, так как асинхронные двигатели, входящие в состав комплексной нагрузки, при медленных изменениях U даже в широких пределах почти не изменяют потребляемой ими активной мощности [2].

Моделирование нагрузки $S_n = \text{const}$ предпочтительнее [4], но также не соответствует реальности, так как осветительная, печная и выпрямительная нагрузка при изменениях напряжения потребляют различную мощность.

Более точно нагрузка может быть смоделирована статическими характеристиками сочетаниями 1-го и 2-го способов $(S_n = \text{const}) + (Z_n = \text{const})$ – с учетом состава потребителей [4].

При расчетах динамической устойчивости статические характеристики должны быть дополнены учетом динамических свойств нагрузки, т.е. представлены в виде $P, Q = f(U, t)$ [12–17].

Близок к этому способ моделирования комплексной нагрузки включением в уравнение движения генератора члена, отражающего регулирующий эффект нагрузки. Тогда удастся использовать метод проведения сети к генерирующим узлам и значительно сократить время расчета на ЭВМ, особенно при исследовании длительного переходного процесса [4].

Наиболее правильным является моделирование асинхронной нагрузки с помощью эквивалентного асинхронного двигателя. При этом обычно [3, 4, 13, 14] асинхронный двигатель моделируется на основе схемы замещения для установившегося режима при пренебрежении переходными электромагнитными процессами в роторе.

Некоторые исследования [15–17] показывают, что это допущение не всегда приемлемо. В [13, 16] показано, что различия в параметрах двигателей и приводных механизмов не оказывают существенного влияния на уровень критического напряжения узла нагрузки. Поэтому при исследованиях процессов, где скольжения меняются в диапазоне до 15–20%, допустимо моделирование узла асинхронной нагрузки одним асинхронным двигателем.

Аналогичные выводы можно сделать относительно синхронной нагрузки [3].

Из сказанного выше следует, что комплексная нагрузка при расчетах динамической устойчивости должна моделироваться совокупностью трех эквивалентных элементов: синхронного и асинхронного двигателей и статической нагрузки [17].

Однако динамические характеристики узлов нагрузки энергосистем чаще всего неизвестны и в практике расчетов приходится моделировать нагрузку характеристиками $S_n = \text{const}$ и $Z_n = \text{const}$ или приближенными характеристикам.

Таким образом, во многих случаях имеется необходимость внести уточнение в этот вопрос, так как изменение параметров нагрузки может оказать заметное влияние на протекание электромеханического переходного процесса и на синхронную динамическую устойчивость,

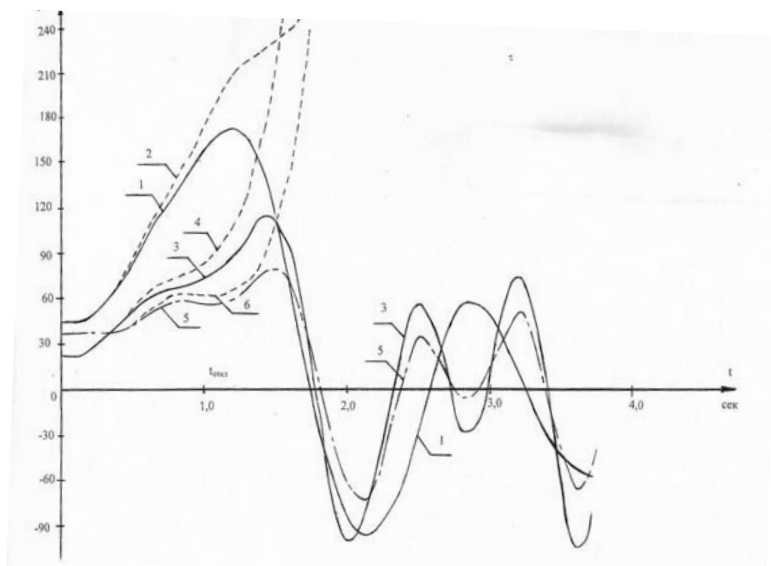


Рис.7. Варианты Б3.2 и Б3.3. Относительные углы при $t_{откл}=1,0$ сек, 1- δ_{39-75} –вар. Б.3.2; 2- δ_{39-75} –вар. Б.3.3; 3- δ_{64-75} –вар. Б.3.2; 4- δ_{64-75} –вар. Б.3.3; 5- δ_{78-75} –вар. Б.3.2; 6- δ_{78-75} –вар.

В настоящей работе сделана попытка оценить степень влияния различного задания характеристик нагрузки на величину предельного времени отключения короткого замыкания.

Все узлы нагрузки по электрической удаленности от места к.з. были условно разделены на три зоны (Таблица Б):

1. Ближайшая – узлы №№ 32, 39;
2. Ближняя – узлы №№ 30, 40, 65;
3. Дальняя – все остальные узлы.

За основной был принят расчет при задании всех нагрузок динамическими характеристиками (вар. Б1).

Исходные данные расчетов этой серии, за исключением характеристик нагрузки, взяты такими же, как и в варианте № 0 предыдущей серии (А).

Результаты расчетов приведены в таблице Б. Задание нагрузки статической характеристикой только в одном узле № 87 (вар.Б 2.1), электрически удаленном от места к.з., уменьшает величину $t_{откл.пред}$ на 0,3 сек. или на 18%.

Такое существенное влияние удаленной и составляющей всего 2,5 % от суммарной мощности энергосистемы (8,2 % от мощности ГРЭС, теряющей устойчивость) нагрузки объясняется, скорее всего, усилением роли не очень существенных факторов (в данном случае, снижения напряжения в узле 87) в режимах, предельных по устойчивости. Возможно также, что предположение о несущественности влияния резкого снижения напряжения в узле 87 на устойчивость системы неправомерно, так как узел 87 через реактанс автотрансформатора (ветвь 73 – 87) связан с магистральной ЛЭП – 330 кВ.

И, наконец, надо вероятно учесть то обстоятельство, отмеченное в [23], что при задании статических характеристик $Q=f(U)$ полиномом второй степени и снижении напряжения до уровня $0,815U_{ном}$ сходимость итерационного процесса расчета напряжения резко ухудшается, а то и вообще процесс расходится.

Последнее подтверждается расчетом (вар.Б.2), когда нагрузка в нескольких узлах была задана статическими характеристиками и когда уже при $t_{откл}=0,6$ сек. в узлах, где были заданы статические характеристики нагрузки, напряжение становится

равным нулю и итерационный процесс расчета установившегося режима расходится.

Также не получается расчет и при задании всей части нагрузки характеристикой $S_n = \text{const}$ (Вар. Б 4.1, Б 4.2, Б 4.3). Напряжение в узлах, где нагрузка задана этой характеристикой, быстро падает до нуля и расчет останавливается. (Необходимо отметить, что задание характеристикой $S_n = \text{const}$ нагрузки в двух-трех узлах может вдруг существенно увеличить $t_{\text{откл.пред}}$ – вар. Б4.4). По-видимому, в этом «виноват» метод итерационного расчета напряжений.

Рассмотрим теперь, как влияет на величину $t_{\text{откл.пред}}$ задание нагрузки характеристикой $Z_n = \text{const}$.

В варианте Б 3.1 (он соответствует варианту № 0 серии А) в двух произвольных узлах заданы характеристики нагрузки $Z_n = \text{const}$. Предельное время отключения по сравнению с вариантом Б1 уменьшилось на 0,2 сек. или на 12,5%. Увеличение числа узлов, в которых задана нагрузка $Z_n = \text{const}$. (вар. Б 3.2 и Б 3.3), уменьшает $t_{\text{откл.пред}}$ на – 0,6 сек. (37,5%) и 0,7 сек. (43,7 %) соответственно.

В варианте Б 3.3 изменяется даже качественная картина процесса (Рис.7). Наконец, задание для всех узлов характеристики $Z_n = \text{const}$, (вар. Б 3.5) приводит к уменьшению $t_{\text{откл.пред}}$ на 0,8 сек. (50%).

Влияние представления нагрузок на величину $t_{\text{откл.пред}}$ зависит не только от удаленности нагрузок, места к.з. и генераторов, но и от мощности нагрузок. Этот вывод вытекает из сравнения вариантов Б 3.2 и Б 3.4.

В первом случае в близких узлах были заданы динамические характеристики, а в отдаленных (с большой суммарной мощностью) – $Z_n = \text{const}$.

Во втором случае – наоборот. В результате величина $t_{\text{откл.пред}}$ оказалась больше, чем в первом. Причем незначительность разницы указывает на преобладающее влияние нагрузок, близких к месту к.з. и генераторам.

В. Учет регулирования возбуждения

При расчете динамической устойчивости современных крупных автоматически управляемых энергосистем требуется более точное моделирование генераторов и их систем регулирования. Однако, при моделировании возбуждения возникают трудности при выборе параметров, так как при более детальном представлении необходимо иметь постоянные времени, которым очень трудно или фактически невозможно дать физическую интерпретацию. Следовательно, помимо увеличения затрат оперативной памяти и времени счета на ЭВМ, требуется много дополнительных данных, значения которых определены эмпирически [4].

Целесообразная степень детализации зависит от целей и задач исследования.

В [11, 18] указывается, что при больших возмущениях системы возбуждения можно моделировать упрощенно, так как различные запаздывания в каналах регулятора и закон регулирования, имеющие большое значение для повышения статической устойчивости, при расчетах динамической устойчивости не столь важны, вследствие того, что на выходе регулятора и всей системы возбуждения в первом цикле почти всегда держится максимальное напряжение.

В упрощенных расчетах генераторы, снабженные регуляторами возбуждения пропорционального типа, вводятся в схему замещения реактивным сопротивлением X'_d и приложенной за ним ЭДС $E'_d = \text{const}$ или даже $E' = \text{const}$. Генераторы с компаундированием также вводятся сопротивлением X'_d и $E'_d = \text{const}$.

При более точных расчетах динамической устойчивости систем с большим количеством генераторов во многих случаях оказывается необходимым уточненное представление лишь нескольких синхронных машин. Остальные без особой погрешности могут быть замещены постоянством ЭДС E'_d или E' [1, 8, 9].

Таблица Б.

п/п	№ Вариантов	№ характеристик нагрузки в узлах									$t_{отк.пр}$ сек	При $t_{отк} > t_{отк.пр}$ нарушается устойчивость или причина ост-ки р/та	Примечание
		1-ая зона		2-ая зона			Дальняя зона						
		32	39	30	40	65	45	52	87	во всех остальных			
1	Б1	6	6	6	4	4	6	6	4	4 или 6	1,6	ГЭС (Г64)	Указанным в табл. номерам соответствуют следующие характеристики нагрузки: 0 – $P = \text{пост.}$, $Q = \text{пост.}$; 1 – статические характеристики $P = f(U)$, $Q = f(U)$.; При $U_{ном} = 110$ кВ; 3 – $Z_n = \text{пост.}$ 4 – динамические характеристики I состав нагрузки, I тип АД; 6 – динамич. харак-ки II состав нагр., I тип АД.
2	Б2.1	6	6	6	4	1	6	6	1	4 или 6	1,3	ГРЭС (Г39)	
3	Б2.2	1	0	1	1	1	6	6	4	4 или 6	0,5	$U_{32}=0$	
4	Б3.1	6	6	6	4	4	3	3	4	4 или 6	1,4	ГЭС (Г64)	
5	Б3.2	6	6	6	4	4	3	3	3	3	1,0	ГЭС (Г64)	
6	Б3.3	6	6	3	3	3	3	3	3	3	0,9	все эл.станции	
7	Б3.4	3	3	3	3	3	6	6	4	4 или 6	1,1	ГЭС (Г64) и Г78	
8	Б3.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0,8	все эл.станции	
9	Б4.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$U_{32}=U_{39}=...=0$	
10	Б4.2	6	6	6	4	4	0	0	0	0	0	$U_{32}=U_{39}=...=0$	
11	Б4.3	0	0	0	0	0	6	6	4	4 или 6	1,2	$U_{32}=0$	
12	Б4.4	6	6	0	0	0	6	4	4	4 или 6	2		

В данной работе оценивается влияние различного учета системы регулирования возбуждения генераторов на величину предельного времени отключения к.з.

В рассмотренной схеме ЭЭС большинство генераторов энергосистемы имеют электромашинные возбудители с регуляторами возбуждения пропорционального действия. На блоках 150 Мвт (Г19, Г39, Г40) в качестве основного используется тиристорное возбуждение с АРВ сильного действия, а в качестве резервного – электромашинный возбудитель.

На рис.8 представлены функции $E'_d = f(t)$ для варианта В1, который соответствует варианту №0 серии А. Видно, что для большинства электростанций замена их постоянством ЭДС E'_d не должна оказывать влияния на результат.

В варианте В1 для всех генераторов задано регулирование напряжения с помощью электромашинных возбудителей с регуляторами возбуждения пропорционального действия. Исключение составляет эквивалентный генератор ОЭС, для которого было задано постоянство E'_d

В варианте В2 все эквивалентные генераторы, кроме Г39, были представлены постоянством E'_d . Для генератора Г39 задавалось электромашинное возбуждение с АРВ пропорционального действия. В результате величина $t_{откл.пред}$ увеличилась на 0,1 сек. (примерно 7%).

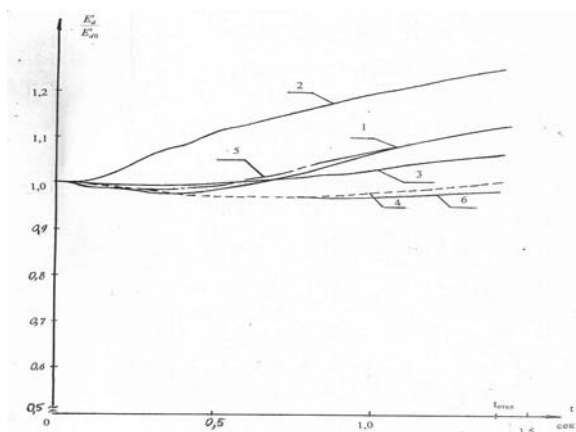


Рис. 8. Зависимости $E'_d = f(t)$
 1 – Г39 (эл. машинное возбуждение и АРВ пропорц. действия); 2 – Г39 (тиристорное или в/ч возбуждение и АРВ сильного действия); 3 – Г64, 4 – Г14, 5 – Г40, 6 – Г24 (эл. машинное возбуждение и АРВ пропорц. действия)

напряжение генераторов за тем или иным сопротивлением в течение времени к.з.

2. Принимается, что в течение к.з. напряжение в точке замыкания остается неизменным.

Отказавшись от этих допущений, формулу (1) можно написать в виде

$$\Delta A = y_{ко} \int_0^t (U_n^2 - U_{ост}^2) dt, \quad (2)$$

где $U_{ост}$ является сложной функцией всех ЭДС.

Как видно из рис.8, кривые $E'_d = f(t)$ в первом цикле качаний (до момента $t = t_{омк. к.з.}$) для части генераторов (Г14, Г24) лежат ниже прямой E'_d/E'_{d0} , а для другой части генераторов (Г64, Г40..) – выше этой прямой.

В [10] указывается, что нарушение устойчивости энергосистемы произойдет тогда, когда количество энергии, запасенное путем определенного процесса, превзойдет некоторое критическое значение $\Delta A_{кр}$

Величину энергии, на которую изменяется вся энергия системы за время короткого замыкания Δt , можно определить по упрощенной формуле

$$\Delta A = y_{ко} (U_n^2 - U_{ост}^2) \Delta t, \quad (1)$$

где $y_{ко}$ – активная составляющая проводимости шунта к.з.

При данном остаточном напряжении имеется критическое время к.з. $\Delta t_{кр}$, при котором ΔA достигает критического значения $\Delta A_{кр}$, после чего происходит нарушение устойчивости системы.

Формула (1) была выведена при следующих двух допущениях.

1. Принимается неизменным

В варианте В.2 влияние первой части генераторов оказывается более сильным, т.е. замена реальных зависимостей $E'_d = f(t)$ прямой $E'_d = \text{const}$ увеличивает величину $U_{\text{ост}}$. В результате та же величина $\Delta A_{\text{кр}}$ достигается при большем $\Delta t = t_{\text{откл пред.}}$.

При замещении Г39 также постоянством E'_d (Вар.3) величина $t_{\text{откл пред.}}$, естественно, уменьшилась. По сравнению с вариантом В1 снижение составило 0.1 сек., т. е. также незначительно.

В варианте В4 для Г39 учитывалось быстродействующее тиристорное возбуждение с АРВ сильного действия, а для остальных генераторов (кроме Г75, заданного $E'_d = \text{const}$) – электромашинное возбуждение с АРВ пропорционального действия.

Соответственно, в исходных данных для Г39 (1 част, табл. 3) задавалось $T_{\text{во}} = 0,06$ сек., $T_{\text{вф}} = 0,02$ сек., $T_{\text{р}} = 0,04$ сек. и принимались следующие значения параметров АРВ (1 част, табл. 1):

$b = -50$ е.в./е.н.; $b' = -2$ е.в./е.н./сек.; $c' = 4$ е.в./Гц; $c'' = 0,9$ е.в./Гц/сек²; $E_{\text{df}} = 2,6$; $\Delta t_1 = 0,04$ сек.; $\Delta t_2 = 0,04$ сек.

Для сравнительных оценок были проведены еще две серии расчетов при трехфазном к.з. в узле 38.

Все исходные данные варианта В5 соответствуют варианту В1, за исключением задания к.з. в узле 38. В варианте В5 принято, что в момент $t_{\text{с}} = t_{\text{к.з.}}$ напряжение в узле 38 становится равным нулю.

Величина $t_{\text{откл пред.}}$ при этом снизилась до 0,5 сек., т.е. в 2,8 раза.

В варианте В6 для Г39 было задано быстродействующее тиристорное возбуждение с АРВ сильного действия. Дополнительно во всех узлах были заданы динамические характеристики нагрузки (что также увеличивает $t_{\text{откл пред.}}$). В результате увеличения $t_{\text{откл пред.}}$ составило 0,1 сек.

Подтверждается вывод, сделанный в [11, 18], что регулирование возбуждения более эффективно влияет на динамическую устойчивость при малых возмущениях, чем при больших.

Г. Учет влияния параметров эквивалентного асинхронного двигателя

Замену асинхронной нагрузки одним эквивалентным двигателем следует считать допустимой лишь при условии выбора для него не средних, а некоторых предельных параметров, больших или меньших по сравнению со средними – в зависимости от характера расчета, с целью обеспечения запаса в худшую сторону.

В тех случаях, когда в расчете динамической устойчивости проводимости нагрузки, возрастающие при переходном процессе, способствуют повышению устойчивости, очевидно, необходимо принимать предельные параметры, соответствующие меньшим проводимостям.

Наоборот, для настройки релейной защиты более благоприятные условия соответствуют меньшим броскам тока при переходных режимах, и, следовательно, для эквивалентного двигателя должны выбираться параметры, отвечающие большим проводимостям.

Для оценки влияния параметров эквивалентного асинхронного двигателя на величину $t_{\text{откл. пред.}}$ было произведено два расчета с величинами параметров по рекомендациям [12-17], соответствующих двум предельным случаям с довольно значительными отклонениями от средних значений.

Результаты расчета приведены в таблице Г.

Вариант Г1 соответствует варианту № 0 в серии А.

Таблица Г.

№ вар	Назначение принятых предельных параметров	Величины параметров АД				$t_{\text{откл пре д,сек}}$
		$X_L, \text{о.е.}$	$X_{\mu}, \text{о.е.}$	$R, \text{о.е.}$	$M_T, \text{сек.}$	
Г1	Для расчетов динамической устойчивости	0,185	1,67	0,0185	5	1,4
Г2	Для выбора уставок релейной защиты	0,263	5	0,0832	2	1,3
Отклонение параметров АД от средних значений, %		$\pm 17,4$	± 50	$\pm 63,6$	$\pm 42,8$	
Согласно [19]		0,383	1,39	0,145	4,17	

Как видно из таблицы, разница в величине $t_{\text{откл пред}}$ невелика. Она составляет 0,1 сек, или около 7%.

Д. Учет влияния коэффициента демпфирования

Составляющая момента $M_k(\omega)$ синхронной машины, зависящая от изменения частоты вращения всех $\Delta\omega_k = p\delta_k$ синхронных машин и их механических двигателей (асинхронный момент), может быть представлена в общем виде [6, 11, 20, 21, 22]

$$M_k(\omega) = (D_{kk}^{(M)} + D_{kk}^{(E)})\Delta\omega_k + \sum_{j=1}^n D_{kj}^{(E)}\Delta\omega_{kj}, \quad (3)$$

где $D_{kk}^{(M)}\Delta\omega$ – изменение момента механического двигателя генератора (или механического привода СД) в соответствии с его моментно–скоростной характеристикой. Здесь может быть учтено вязкое трение при вращении ротора агрегата, а также действие АРС;

$D_{kk}^{(E)}\omega_k$ – изменение электромагнитного момента синхронной машины, зависящее, главным образом, от ЭДС и токов, возникающих в контурах: обмоток возбуждения, демпферной обмотки и «бочке» ротора при изменении ее собственной частоты вращения;

$D_{kj}^{(E)}$ – составляющие, обусловленные наличием электрических связей между машинами. В многомашинной энергосистеме эти составляющие могут иметь разный знак [11] и частично компенсироваться, но предположение $\sum_{j=1}^n D_{kj}^{(E)}\Delta\omega_{kj} = 0$ в ряде случаев недопустимо.

Сравнительно полный учет собственных и взаимных составляющих электромагнитного момента при произвольном изменении скорости синхронной машины дает использование полных уравнений Парка–Горева.

В литературе [1, 11, 20, 21, 22] указывается, что у современных мощных турбогенераторов уже при небольших (порядка десятых долей процента) скольжениях развивается значительный асинхронный момент. Максимальные же значения скольжений турбогенераторов при устойчивых динамических переходах, как показывают расчеты, могут достигать 1–2%. Однако, влияние асинхронных моментов невелико. Происходит это потому, что при тяжелых к.з., когда роторы генераторов получают наибольшее ускорение, одновременно имеет место значительное снижение напряжения на их выводах. Асинхронные же моменты пропорциональны U^2 .

Поэтому, как указывается в [20], если для к-го агрегата учитываются уравнения АРВ и АРС, позволяющие приближенно учесть собственные составляющие асинхронного момента, то член $D \frac{d\delta}{dt}$, введенный в уравнение движения генератора, позволяет косвенно учесть взаимную составляющую момента. При этом предлагается

принимать величину коэффициента демпфирования $D = (1 \div 2,0)$ о. е.

Для проверки, насколько изменится предельное время отключения к.з. при варьировании величины D в указанных пределах, было выполнено три варианта расчетов.

Вариант Д1 соответствует варианту № 0 серии А.

Таблица Д.

№ вар	Коэффициент демпфирования, D (о.е.)		$t_{откл.пред}$ сек.	При $t_{откл.} > t_{откл.пред}$ Нарушается устойчивость
	Для гидрогенераторов (Г 64)	Для блоков 150 МВт (Г39, Г 40, Г19)		
Д1	0	2	1.4	ГЭС (64)
Д2	1	2	1.5	ГЭС (64)
Д3	0	0	1.2	ГЭС (64)

Как видно из таблицы Д, влияние коэффициента демпфирования в заданных пределах не очень значительно.

Е. Различный учет ОЭС

При некоторых расчетах бывает удобно принимать точку примыкания к ОЭС за шины бесконечной мощности.

Такое допущение при расчетах режимов, далеких по устойчивости от предельных, не влияет на результаты.

Для проверки, насколько задание ОЭС не эквивалентным генератором, а шинами бесконечной мощности, влияет на величину предельного времени отключения к.з., был проделан следующий расчет (вар. Е).

1. В точке примыкания к ОЭС (узел 75) задавались шины бесконечной мощности.

2. Все остальные исходные данные соответствовали варианту А5 серии А.

Величина $t_{откл.пред}$, увеличилась на 0,4 сек. или на 36,4%. Изменилась и картина электромеханического переходного процесса (рис.9.)

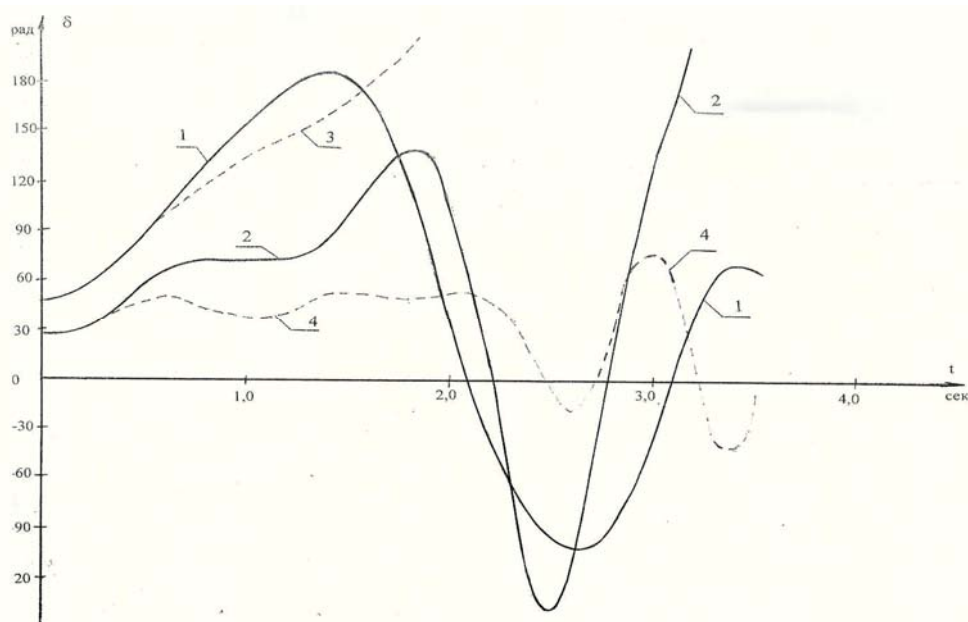


Рис.9. Относительные углы $\delta=f(t)$ Вар. А5, $t_{откл.}=1,2$ сек; 1- δ_{202-75} ; 2- δ_{304-75} ; Вар. Е, $t_{откл.}=1,6$ сек. 3- δ_{202-75} ; 4- δ_{304-75} ; (узлы 202 – ГРЭС – ЭГ-2; узел. 304 – ГЭС – ГГ-4)

ВЫВОДЫ

Произведенные расчеты позволяют сделать следующие выводы о влиянии исследованных факторов на величину предельного времени отключения короткого замыкания ($t_{откл.пред}$) по условию сохранения синхронной динамической устойчивости энергосистемы.

1. Представление всех нагрузок узлов типовыми динамическими характеристиками приводит к увеличению $t_{откл.пред}$ на 0,8 сек. или на 50% по сравнению с вариантом, где все нагрузки замещены постоянным сопротивлением.

При этом значительные (в среднем $\pm 30\%$ от средних значений) изменения параметров эквивалентного асинхронного двигателя привели к незначительному изменению величины $t_{откл.пред}$ – на 0,1 сек.

Представление всех или большей части нагрузок постоянной мощностью или статическими характеристиками приводит в самом начале расчета к расходящемуся итерационному процессу и расчет останавливается.

Представление нагрузки статической характеристикой только в одном узле (при том, что в остальных узлах нагрузки представлены динамическими характеристиками) приводит к уменьшению $t_{откл.пред}$ на 0,33 сек. или на 19%, а в пяти узлах – на 1,1 сек. или на 69%. Представление нагрузки в тех же пяти узлах постоянной мощностью приводит к уменьшению $t_{откл.пред}$ на 0,6 сек. или на 38%.

Следовательно, способ представления нагрузок оказывает значительно большее влияние на величину $t_{откл.пред}$, чем все прочие факторы.

Поскольку во всех узлах нагрузка является комплексной (т.е. содержит и асинхронную, и осветительную и прочую составляющую), то представление нагрузки динамическими характеристиками, даже типовыми, предпочтительнее, чем задание ее постоянным сопротивлением, постоянной мощностью или статическими характеристиками.

3. Замена генераторов с электромашинным возбуждением и АРВ пропорционального действия постоянством ЭДС E'_d за реактансом X'_d приводит к уменьшению $t_{откл.пред}$ на 0,1 сек. и, таким образом, может считаться допустимой. Учет быстродействующего (тиристорного или высокочастотного) возбуждения и АРВ сильного действия для части генераторов приводит к значительному увеличению $t_{откл.пред}$ при двухфазном к.з. на землю. При отключении трехфазного к.з. увеличение $t_{откл.пред}$ составило – 0,1 сек по сравнению с вариантом, где для всех генераторов принималось электромашинное возбуждение и АРВ пропорционального действия.

Следовательно, генераторы с быстродействующим возбуждением и АРВ сильного действия недопустимо замещать постоянной ЭДС E'_d за реактансом X'_d . Исключение составляет случай трехфазного к.з., когда влияние всех исследованных факторов на величину $t_{откл.пред}$ почти не проявляется.

4. Увеличение коэффициента демпфирования D от 0 до 2 для генераторов, близких к месту к.з., увеличивает $t_{откл.пред}$ на 0,3 сек.

Поэтому, принимая из общих соображений $D=1 \div 2$, получим $t_{откл.пред}$ с погрешностью $\pm 1,5$ сек.

5. Задание ОЭС шинами бесконечной мощности увеличивает $t_{откл.пред}$ на 0,4 сек. по сравнению с вариантом, где ОЭС задана эквивалентным генератором.

Такая погрешность очень велика, и во всех расчетах ОЭС следует задавать эквивалентным генератором.

1. *Веников В.А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учебник для вузов М.: Высшая школа, 1985.

2. *Азарьев Д.И.* Математическое моделирование электрических систем, ГЭИ, 1962.

3. *Гусейнов Ф.Г.* Некоторые вопросы энергетических систем и их режимов. Баку, 1963.
4. *Поздняков А.Ю.* Применение ЦВМ для расчетов синхронной динамической устойчивости сложных энергосистем (обзор). БТИ, ОР ГРЭС, Москва, 1967.
5. *Pai M.A.* Power system stability Analysis by the Direct Method of Lyapunov-North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1981.
6. *Авраменко В.Н., Умедян В.В., Пукерник Л.В.* Опыт применения ЦВМ для расчетов динамической устойчивости в сложных энергосистемах. – В кн. доклады на II Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР. М., Энергия, 1969.
7. *Лоханин Е.К., Васильева Г.В., Галактионов Ю.Н.* Математическая модель энергосистем для расчета и анализа переходных процессов и устойчивости. – Труды ВНИИЭ, 1976, в кн.
8. Общая характеристика комплексной программы расчета устойчивости сложных энергосистем / Лоханин Е.К., Усков А.В., Васильева, и др. – Труды ВНИИЭ, 1976, вып.51.
9. *Портной М.Г., Рабинович Р.С.* Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости. – М.: Энергия, 1978
10. Применение цифровых вычислительных машин в электроэнергетике: Учебное пособие для вузов/ Шербачев О.В., Зейлигер А.Н., Кодомская К.П. и др. – Л.: Энергия, Ленинград, отд-ние, 1980.
11. *Гусейнов А.М.* Демпфирующие свойства электроэнергетических систем, объединенных слабыми межсистемными связями. - Электричество, 1999, №8.
12. *Авраменко В.Н.* Методика учета динамических характеристик нагрузки при расчетах динамической устойчивости энергосистемы на ЭЦВМ, Изв. АН СССР, «Энергетика и Транспорт», 1963, №6.
13. *Гуревич Ю.Е.* Влияние параметров нагрузки на динамическую устойчивость генераторов. – Электричество, 1969, №1.
14. *Гусейнов Ф.Г.* Расчет на ЦВМ электромеханических переходных процессов эквивалентной асинхронной нагрузки электрической системы. Изв.вузов, Энергетика 1969, М8.
15. *Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А.* Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
16. *Гуревич Ю.Е. и др.* Устойчивость нагрузки электрических систем. – М.: Энергоиздат, 1981.
17. *Гусейнов Ф.Г., Рахманов Н.Р.* Эквивалентирование нагрузок электрических систем при исследованиях статической и динамической устойчивости. – Электричество 1973, №6.
18. *Вайнер Н.Г.* Уточнение моделирования турбогенераторов в расчетах динамической устойчивости. Труды ВНИИЭ, вып. 37, 1970.
19. *Китушин В.Г.* Практический критерий запаса динамической устойчивости системы в книге: Доклады на II Всесоюзном научно-техническом совещании по устойчивости и надежности энергосистем СССР. Тбилиси, 1969.
20. *Авраменко В.Н., Цукерник Л.В.* Об учете моментов, зависящих от частоты вращения машин при расчете синхронной динамической устойчивости энергосистем. В сб. «Проблемы технической электродинамики», Вып. 42, 1973.
21. *Литкенс И.В., Пуго В.И.* Колебательные свойства электрических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
22. *Веников В.А., Литкенс И.В., Пуго В.И.* Демпферные коэффициенты. М.:МЭИ, 1979.
23. *Качанова Н.А., Юрковская Е.М.* Модификация программы расчета установившегося режима сложных энергосистем. В сб. «Проблемы технической

ELEKTROENERGETİK SİSTEMDƏ (EES) SİNXRON DİNAMİKİ DAYANIQLIĞA MÜXTƏLİF FAKTORLARIN TƏSİR DƏRƏCƏSİNİN QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ

HÜSEYNOV Ak. M.

Elektroenergetik sistemdə (EES) sinxron dinamik dayanıqlığın saxlanma şərti daxilində qısa qapanmanın (q.q.) açılma vaxtının buraxıla bilən hesabat qiymətinə müxtəlif faktorların təsir dərəcəsi qiymətləndirilmişdir.

Açılma vaxtının buraxıla bilən qiymətinə yük düyünlərinin verilmə üsullarının (statiki və ya dinamik xarakteristika ilə, sabit müqavimət, $S_{yük} = \text{const}$) ən böyük təsir etməsi göstərilmişdir.

Teztəsirli (tristor və ya yüksək tezlikli təsirləndiricili) və cəld təsiredici TAT-lı generatorların E'_d sabit EHQ – ni X'_d əvəzedilməsinin buraxılabilməməsi göstərilmişdir.

Həmçinin göstərilmişdir ki, elektrik stansiyasının yaxınlığındakı q.q. zamanı böyük dəqiqlik əldə etmək üçün elektrik stansiyası iki ekvivalent generatorla əvəz edilməlidir.

EVALUATION OF DEGREE OF DIFFERENT FACTORS INFLUENCE ON SYNCHRONOUS DYNAMIC STABILITY ELECTRICAL POWER SYSTEM (EPS)

HUSEYNOV Ak. M.

The degree of different factors influence on calculated value of bound time of short circuit switching off to keep synchronous dynamic stability electrical power system (EPS) has been evaluated.

It was shown that the way of elements loads representation (by means of static and dynamic characteristics, constant resistances, $S = \text{const}$) had the maximal influence on bound time of switching off.

It was shown that substitution of generators with fast run excitement (tyristor or high frequent) and automatical regulators of excitement of powerful (strong) action with constant E.M.F. E_d after X_d reactance.

It was shown that the most precise calculation might be achieved at the expense of substitution of nearest to the short circuit point electrical station with two equivalent generators at least.