

# Структура электромеханических колебаний и устойчивость энергосистем<sup>1</sup>

ЛИЗАЛЕК Н.Н., ЛАДНОВА А.Н., ТОНЫШЕВ В.Ф., ДАНИЛОВ М.В., МОЧАЛИН К.С.

*Рассмотрены предпосылки структурного анализа неустойчивости энергосистем. На примере коротких замыканий изложен подход к структурным исследованиям динамической неустойчивости, основанный на анализе колебательных структур системы и оценке их предельного возбуждения по устойчивости.*

**Ключевые слова:** энергосистемы, устойчивость, колебательные структуры, предельные возмущения, энерговременная диаграмма неустойчивости

Построение систем противоаварийного управления требует проведения многочисленных расчетов устойчивости энергосистемы в различных режимах работы. Главная цель таких исследований – прогнозирование путей развития аварий, связанных с нарушениями устойчивости, с последующим выбором противоаварийных мероприятий, обеспечивающих как можно более раннее их прерывание [1]. Прогноз пути развития аварии при нарушении устойчивости невозможен без выявления сечения первоначально возникающего асинхронного хода, являющегося первым шагом на этом пути. В настоящее время отсутствуют методические разработки, направленные на общую эскизную прорисовку возможных сечений асинхронного хода при нарушениях устойчивости в сложной энергосистеме, а следовательно, и на обзор задач управления, обеспечивающего прерывание аварий. Между тем, такая методика могла бы оказаться весьма полезной для анализа изменения ситуации в противоаварийном управлении системой при ее развитии или существенном изменении режима работы.

Рассматриваемый *структурный анализ неустойчивости* использует применительно к исследованию динамической устойчивости энергосистем расширенную постановку задачи устойчивости. Полный анализ устойчивости требует ответа не только на вопрос «произойдет ли нарушение устойчивости при том или ином возмущении (конечном или «бесконечно малом»)», но и на вопрос «по какому сечению произойдет нарушение устойчивости и как его пространственное положение за-

*Prerequisites for a structural analysis of power system instability are considered. An approach for structural studies of transient instability based on an analysis of oscillatory structures of a system and assessment of their limiting excitation with respect to stability conditions is described taking short-circuit fault conditions as an example.*

**Key words:** power systems, stability, oscillatory structures, limiting disturbances, energy-time diagram of instability

висит от свойств системы и возмущения?». Выявление *пространственной структуры неустойчивости* становится особо актуальным в задачах устойчивости сложных энергосистем при авариях, удаленных от генерирующих источников.

Анализ электромеханического движения системы при различных возмущениях позволяет выявить его некоторое общее свойство. Оно формулируется на основе наблюдения (на этапах свободного движения) за перемещениями векторов напряжения в различных узлах системы, если их углы измеряются относительно общей оси отсчета, вращающейся со скоростью центра инерции системы. Выделенные таким образом колебания в системе около ее центра инерции происходят в форме движений областей (подсистем), любые *смежные* из которых движутся на некотором интервале времени в противоположных направлениях, т.е. колебательное движение *волнообразно распределено* по системе. По мере развития переходного процесса число и состав подсистем, а также способ их объединения межрегиональными связями в наблюдаемую колебательную структуру в общем случае изменяются.

Исходя из принципа формирования колебательных структур, ясно, что они могут иметь цепочечный или разветвленный цепочечный характер. Цепочки подсистем могут формировать кольцевые структуры с четным числом подсистем в кольцах. В нескольких колебательных структурах разрыв связи между любыми смежными подсистемами делит систему на две отдельные части. Эта топологическая особенность таких структур означает, что совокупность линий электропередачи, связывающих любые смежные подсистемы, может быть *сечением развивающегося асинхронного хода* в системе (*сечением возможной структуры неустойчивости*). В коль-

<sup>1</sup>Статья написана по результатам исследований в рамках международного проекта ICOEUR (см. «Электричество», 2011, № 4).

цах сечением возможной структуры неустойчивости может выступать любая пара межрегиональных связей. Возможные структуры неустойчивости можно отнести к колебательным структурам высшего иерархического уровня. Они образованы двумя подсистемами, внутри каждой из которых может содержаться одна или несколько так или иначе связанных подсистем колебательной структуры. При развитии колебательной структуры в переходном процессе возможные структуры неустойчивости изменяются вместе с ней.

Предположим, что нарушение устойчивости происходит по одному из сечений возможных структур неустойчивости. И далее: нарушение устойчивости происходит тогда, когда при достаточном (по значению) возмущении сечение одной из возможных структур неустойчивости совпадает с одним из «слабых» сечений системы. Это предположение позволяет предложить подход к выявлению структуры неустойчивости системы при конкретных возмущениях. Он состоит в том, что колебательная структура движения при рассматриваемом возмущении сразу строится с учетом совокупности «слабых» сечений системы, выявленных заранее тем или иным способом. Тогда возможные структуры неустойчивости, построенные на таких модельных колебательных структурах, будут содержать эти «слабые» сечения и отбор среди них реализующейся структуры неустойчивости сведется к сопоставлению тяжести возмущений, приводящих к нарушению устойчивости по разным сечениям. Этот способ выявления структуры неустойчивости отказывается от отслеживания развития колебательной структуры во времени (что возможно только на основе интегрирования уравнений движения системы), заменяя его анализом движения в ожидаемых заведомо опасных по устойчивости структурах колебаний, вызванных рассматриваемым возмущением. Если при этом расчет траектории движения подсистем модельной колебательной структуры заменяется некоторым ее прогнозом, то способ приобретает качественный характер. Для анализа динамической устойчивости обычно достаточно рассматривать траекторию движения системы на первом и втором циклах качаний.

Применение такого способа базируется на определении состава «слабых» сечений системы, проявляющихся при электромеханических колебаниях. Для этого обратимся к известным представителям колебательных структур, так называемым *собственным* или *волновым* структурам. Это — структуры, формируемые собственными «малыми» колебаниями системы с «выключенным» демпфированием около ее центра инерции. Каждому колебательному движению с собственной частотой  $f_k$  отвечает уникальная, *неизменная во времени* волновая структура

$S_k$ . Собственные гармонические колебания смежных подсистем волновых структур происходят в противофазе [2]. Приведем ряд определений, характеризующих волновые (и вообще колебательные) структуры [2]. Число подсистем в структуре — ее *размерность*; участок структуры из последовательной цепочки подсистем — *направление*; *волновое расстояние* между подсистемами по некоторому пути — число электромеханических волн, укладываемых между ними при однократном прохождении этого пути. Волновое расстояние между смежными подсистемами равно  $1/2$  (половине волны). *Волновые размеры структуры* — максимальное волновое расстояние, которое можно на ней измерить. Если суммарную инерцию синхронных машин, вошедших в подсистему, связать с диаметром отображающего ее круга (более «тяжелые» подсистемы имеют большие размеры), то волновые структуры выглядят, например, так, как это показано на рис. 1.

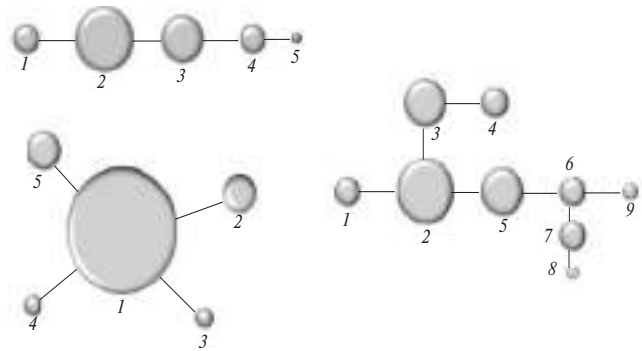


Рис. 1. Примеры волновых структур энергосистемы

Волновые структуры отображают структурную организацию *стоячих «малых» электромеханических волн* с различными собственными частотами. Особенностью волновых структур энергосистем масштаба ЕЭС России оказывается то, что подавляющее большинство из них, лежащих в верхней плотной полосе спектра, имеют звездообразный характер и малые волновые размеры (локальные колебания). И только несколько десятков волновых структур колебаний нижней и средней относительно разреженных полос спектра (с частотами примерно до 1,2 Гц) имеют цепочечный или разветвленный цепочечный характер с направлениями сравнительно больших волновых размеров (системные колебания). Кольцевые структуры встречаются весьма редко (единичные случаи).

Для характеристики процессов распространения колебаний используется представление о *бегущих волнах*. Так как длина бегущих и стоячих электромеханических волн одной и той же частоты совпадает из-за совпадения их дисперсионных соотношений, то направления волновых структур можно ассоциировать с каналами распространения «ма-

лых» бегущих колебаний соответствующих частот [2]. Это предположение позволяет оценить время, необходимое для установления стоячих «малых» колебаний низких и средних частот в сложной системе. Действительно, зная число подсистем, входящих в максимально развитое направление волновой структуры, и время прохождения бегущих противофазных колебаний между любыми смежными подсистемами (оцениваемое как полпериода колебаний), можно определить время, необходимое для прохождения бегущей волны от одного конца направления до другого. Для колебаний с частотами примерно до 1,2 Гц число подсистем в направлениях волновых структур ЕЭС России постепенно возрастает от 2 до 12–15 [2]. Результаты оценки времени прохождения бегущих волн представлены на рис. 2. Так как время установления стоячих колебаний оценивается как удвоенное время прохождения бегущей волны, то (на базе рис. 2) можно делать выводы о возможности развития затухающих стоячих колебаний различной частоты, охватывающих всю ЕЭС России.

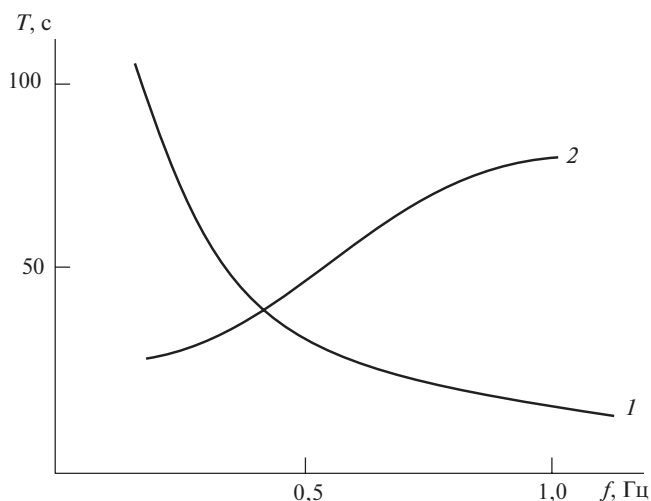


Рис. 2. Оценка времени распространения бегущих волн в ЕЭС России: 1 — постоянное времени затухания колебаний; 2 — время прохождения бегущей волны

Расчеты устойчивых переходных процессов в ЕЭС России, проводимые по нелинейной модели с «выключенным» демпфированием с целью определения времени прохождения колебаний различных частот [2], дают близкие результаты к оценкам, приведенным на рис. 2. Это указывает на возможность выявления структур и оценки скоростей распространения устойчивых нелинейных колебаний на основе волновых структур и позволяет объяснить развитие наблюдаемой колебательной структуры движения во время переходного процесса. Действительно, наложение нескольких различно структурно организованных колебаний разного периода, распространяющихся по системе с разными скоростями по разным направлениям и затухаю-

щих с различной скоростью, неизбежно приведет к эффекту развития наблюдаемой колебательной структуры движения во времени.

Расчеты процессов нарушения устойчивости показывают, что межрегиональные связи волновых структур действительно могут выступать сечениями асинхронного хода. Это означает, что связи волновых структур (необязательно все) входят в состав «слабых» сечений системы при электромеханических колебаниях.

Таким образом, можно предположить, что волновые структуры системы содержат важную информацию об ее свойствах и при нелинейных колебаниях. Это связано с присутствием в них «слабых» сечений системы и отражением структурной организации (топологии) колебаний, при которой эти «слабые» сечения могут проявиться. Отсюда следует, что каждая волновая структура выступает некоторым цельным, неделимым объектом. Расчет переходных процессов при конкретных возмущениях показывает, что при нелинейных колебаниях смещения центров инерции смежных подсистем структур системы, совпадающих с волновыми, обязательно происходят в противоположных направлениях. Это относит такие разбиения на подсистемы к структурным образованиям, известным как *пространственные осцилляторы* [3] (в этой статье будем называть их просто осцилляторами). Применительно к энергосистемам под  $k$ -м пространственным осциллятором понимается структура разбиения на подсистемы, совпадающая с волновой структурой  $k$ -го свободного движения при «малых» колебаниях. Собственная частота «малых» колебаний  $f_k$  используется в качестве индивидуального «имени»  $k$ -го пространственного осциллятора.

Пространственные осцилляторы представляют просто варианты разбиения системы на подсистемы, на движение которых не накладывается никаких условий. Структуру пространственного осциллятора для ее терминологического отличия от волновой структуры будем называть *осциллирующей*. Если смежные подсистемы какой-либо осциллирующей структуры, движущиеся в одном направлении на данном этапе конкретного переходного процесса, объединить между собой (слить), то в результате такого структурного преобразования будет получена колебательная структура движения этого осциллятора в рассматриваемом процессе. Понятно, что колебательные структуры осцилляторов по размерности не могут превосходить их осциллирующих структур, а их минимальная размерность равна двум. Каждое сечение такой колебательной структуры может выступать как возможное сечение структуры неустойчивости системы (порожденной

движениями данного осциллятора в данном переходном процессе).

Применительно к простейшей математической модели электромеханических переходных процессов (постоянные модули электродвижущих сил машин и моменты турбин) число степеней свободы системы равно числу синхронных машин в ней. Электромеханические переходные процессы в энергосистеме – это взаимные колебания синхронных машин и изменение средней частоты. Можно говорить, что движение системы из  $N$  синхронных машин определяется взаимодействием  $N-1$  ее колебательных степеней свободы и одной поступательной. Формами проявления колебательных степеней свободы системы и выступают ее пространственные осцилляторы (полный набор которых также содержит  $N-1$  элемент). Каждому стационарному режиму системы соответствует свой набор пространственных осцилляторов, характеризующих динамические свойства системы в окрестности ее состояния равновесия, определяемые топологиями осциллирующих структур, составом межрегиональных связей и инерционностью подсистем.

Для оценки влияния параметров возмущения на структуру неустойчивости можно воспользоваться представлением о том, что возмущающее воздействие возбуждает пространственные осцилляторы, насыщая их энергией колебаний. Будем связывать процессы нарушения устойчивости с некоторым предельным по устойчивости (критическим) возбуждением хотя бы одного из них. Количественной характеристикой может выступать значение предельной по устойчивости энергии колебаний осцилляторов системы при том или ином возмущающем воздействии. Предельные значения энергии колебаний всех (или части) осцилляторов описывают весь (или часть) энергетического спектра предельных возмущений соответственно. При одновременном перевозбуждении нескольких осцилляторов структура неустойчивости (в общем случае уже в многочастотном асинхронном ходе) будет зависеть от взаимного расположения сечений структур неустойчивости перевозбужденных осцилляторов в электрической сети системы (определяться свойствами топологической суммы [2] структур неустойчивости).

Представление о пространственных осцилляторах можно использовать в алгоритмах оценки устойчивости энергосистем, основанных на исследовании их движения в структурно организованных формах.

Представление о колебательной структуре движения позволяет выстроить его иерархию. На верхнем уровне находится движение центра инерции системы. На среднем уровне иерархии – региональные движения, представляемые движениями

центров инерции подсистем относительно центра инерции системы. На низшем уровне иерархии оказываются локальные движения синхронных машин в подсистемах, осуществляемые относительно центров инерции этих подсистем.

Разобьем энергосистему на некоторое число подсистем. Получившееся разбиение системы на подсистемы и объединяющие их межрегиональные связи представляет некоторое структурное отображение системы. Число подсистем, входящих в структуру, определяет ее размерность. Одна и та же система может представляться множеством ее структурных отображений.

Представим скорость вращения  $j$ -й синхронной машины в виде суммы постоянной слагающей (частоты вращения в исходном режиме) и трех относительных процессов:

$$W_{Tj}(t) = W_0 + DW_{Tjs}(t) + DW_{s0}(t) + DW_0(t),$$

где  $DW_0(t) = W_0(t) - W_0$ ;  $DW_{s0}(t) = W_{s0}(t) - W_0$ ;

$DW_{Tjs}(t) = W_{Tj}(t) - W_{s0}(t)$ ;  $W_0(t) = \dot{\alpha} \sum_i J_i W_{Ti}(t) / \dot{\alpha} \sum_i J_i$ ;

$W_{s0}(t) = \dot{\alpha} \sum_i J_i W_{Ti}(t) / \dot{\alpha} \sum_i J_i$ ;  $W_0(t)$  – скорость переме-

щения центра инерции системы;  $W_{s0}(t)$  – то же подсистемы, к которой отнесена данная синхронная машина;  $i$  и  $i_s$  – множества синхронных машин во всей системе и  $s$ -й подсистеме;  $J_i$  – моменты инерции;  $DW_0(t)$  – отклонение скорости перемещения центра инерции системы от угловой частоты исходного стационарного режима  $W_0$ ;  $DW_{s0}(t)$  – синхронное относительное движение подсистемы – региональный процесс, определяемый отклонением скорости перемещения центра инерции подсистемы относительно скорости перемещения центра инерции системы;  $DW_{Tjs}(t)$  – индивидуальное движение – локальный процесс движения синхронной машины в  $s$ -й подсистеме относительно ее центра инерции.

Абсолютное перемещение ротора синхронной машины:

$$\begin{aligned} d_{Tj}(t) &= d_{Tj}(0) + W_0 t + \\ &+ \int_0^t \{ DW_0(t) + DW_{s0}(t) + DW_{Tjs}(t) \} dt = \\ &= d_{Tj}(0) + d_0(t) + Dd_0(t) + Dd_{s0}(t) + Dd_{Tjs}(t). \end{aligned}$$

Движение системы, описываемое с помощью введенной иерархической системы относительных процессов, будем называть структурно организованным. При изменении структуры одной и той же системы одно и то же движение организуется различным образом (обладает разными формами структурной организации). Для каждой структуры системы вводятся в рассмотрение составляющие ее



региональные и локальные объекты: подсистемы как элементы системы и отдельные синхронные машины как элементы подсистем.

Вне зависимости от способа разбиения системы на подсистемы выполняются соотношения сохранения импульса ( $J_s = \dot{\mathring{a}} J_i$  – суммарный момент инерции подсистемы):

$$\begin{aligned} \dot{\mathring{a}} J_s DW_{s0}(t) &= 0; \dot{\mathring{a}} J_i DW_{ris}(t) = 0; \\ \dot{\mathring{a}} J_s \frac{d(DW_{s0})}{dt} &= 0; \dot{\mathring{a}} J_i \frac{d(DW_{ris})}{dt} = 0; \\ \dot{\mathring{a}} \int_0^t J_s DW_{s0}(t) dt &= \dot{\mathring{a}} J_s Dd_{s0}(t) = 0; \\ \dot{\mathring{a}} \int_0^t J_i DW_{ris}(t) dt &= \dot{\mathring{a}} J_i Dd_{ris}(t) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Составляющие угловых скоростей отвечают уравнениям относительного движения:

$$\begin{aligned} J_\ominus \frac{d(DW_0)}{dt} &= DM_\ominus; J_s \frac{d(DW_{s0})}{dt} = DM_s - \frac{J_s}{J_\ominus} DM_\ominus; \\ J_i \frac{d(DW_{ris})}{dt} &= DM_i - \frac{J_i}{J_s} DM_s, \end{aligned}$$

где  $J_\ominus = \dot{\mathring{a}} \dot{\mathring{a}} J_i = \dot{\mathring{a}} J_i$  – суммарный момент инерции системы;  $DM_\ominus$  – суммарный небаланс моментов на валах машин в системе;  $DM_s$  – суммарный небаланс моментов в  $s$ -й подсистеме;

$DM_s - DM_\ominus J_s / J_\ominus = DM_{s0}$  – небаланс момента, действующего на подсистему в ее относительном движении около центра инерции системы;  $DM_i - DM_s J_i / J_s = DM_{is}$  – небаланс момента, действующего на синхронную машину в ее относительном движении около центра инерции подсистемы, в которую она входит.

Добавка кинетической энергии, приобретенная системой в переходном процессе,

$$\begin{aligned} DK(t) &= 0,5 \dot{\mathring{a}} \dot{\mathring{a}} J_i DW_{ris}^2(t) + 0,5 \dot{\mathring{a}} J_s DW_{s0}^2(t) + \\ &+ W_0 J_\ominus DW_0(t) + 0,5 J_\ominus DW_0^2(t) \end{aligned}$$

разбивается на составляющие:  $DK(t) = DK_{лок}(t) + DK_{рег}(t) + DK_{сис}(t)$ , где  $DK_{лок}$ ,  $DK_{рег}$ ,  $DK_{сис}$  – добавки кинетической энергии за счет локальных колебательных процессов в подсистемах, региональных колебательных процессов в системе и системного процесса в поступательной степени свободы.

Колебательные составляющие добавок кинетической энергии (и их сумма – кинетическая энергия колебаний) – положительно определенные функции. Так как колебательные процессы имеют относительный характер, то вне зависимости от знака отклонения скорости вращения процесс, идущий на некотором интервале времени с нарастанием колебательной составляющей кинетической энергии, будем называть ускоряющимся по этой составляющей на этом интервале, а с уменьшающейся составляющей кинетической энергии – процессом торможения по этой составляющей. Изменения колебательных составляющих кинетической энергии связаны с работами на составляющих перемещений:

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t \dot{\mathring{a}} J_s \frac{DW_{s0}^2}{2} \dot{\mathring{a}} Dd_{s0}(t) &= \dot{\mathring{a}} DM_{s0} d(Dd_{s0}); \\ \int_{t_0}^t \dot{\mathring{a}} J_i \frac{DW_{ris}^2}{2} \dot{\mathring{a}} Dd_{ris}(t) &= \dot{\mathring{a}} DM_{is} d(Dd_{ris}). \end{aligned}$$

Для ускоряющихся (в указанном выше смысле) движений работа положительна, для движений с торможением – отрицательна.

Изменение формы структурной организации процесса приводит только к изменению удельного веса составляющих добавок кинетической энергии, связанных с локальными и региональными колебаниями (при неизменности их суммы), т.е. кинетическая энергия колебаний инвариантна к изменению структуры. То же относится и к сумме работ, проводимых при перемещениях региональных и локальных объектов системы. Составляющие, связанные с перемещением центра инерции системы, также не зависят от ее структуры.

Структура системы может выбираться из различных соображений, однако в данном случае будут использоваться ее осциллирующие структуры. Рассматривается случай, когда послеаварийный режим существует и совпадает с исходным состоянием системы. При этом наборы пространственных осцилляторов исходного и послеаварийного режимов совпадают. Такая ситуация возникает при возмущениях, вызванных парами противоположных коммутаций одного и того же элемента в системе, отделенных друг от друга некоторым интервалом времени. Тяжесть таких возмущений определена длительностью этого интервала.

Рассмотрим реакцию системы, находящейся в состоянии равновесия, на ударное (импульсное) возмущение в течение очень короткого интервала времени  $dt$ . Изменения угловых скоростей объектов структурно организованного движения определяются в соответствии с выражениями:

$$J_{\Sigma} DW_0 = DM_{\Sigma} dt; \quad J_s DW_{s0} = DM_{s0} dt;$$

$$J_i DW_{iis} = DM_{is} dt.$$

Каждый из объектов на выделенных уровнях иерархии приобретет импульс, определяемый приведенными соотношениями, и некоторую добавочную кинетическую энергию соответственно. Добавка кинетической энергии распределится между иерархическими уровнями:

$$DK_{\text{сис}} = 0,5 J_{\Sigma} DW_0^2 + W_0 J_{\Sigma} DW_0;$$

$$DK_{\text{рег}} = 0,5 \sum_s J_s DW_{s0}^2; \quad DK_{\text{лок}} = 0,5 \sum_{i_s} J_i DW_{iis}^2.$$

После снятия импульсного возмущения в момент  $dt$  оказывается, что объекты приобрели кинетическую энергию, но отреагировать своим смещением еще не успели.

Используем подход к оценке устойчивости, основанный на законе сохранения энергии. Определение предельных по устойчивости возмущений требует вычисления запасов по работе торможения объектов, которую может совершить система для компенсации приобретенной ими кинетической энергии (высота потенциальных барьеров на траекториях движения объектов). Наблюдатель в момент  $t_0$  может оценить этот запас, предположив в простейшем случае, что скорости объектов далее остаются постоянными. Тогда оценка сводится к расчету работы при прогнозируемом движении объектов по возможным траекториям, продолжающим действительные траектории после момента  $t_0$ . В общем случае возможными траекториями называются те, на которых соблюдаются соотношения сохранения импульса (1) и выполняются уравнения баланса мощностей в узлах системы (при этом действительные траектории являются подмножеством возможных). Появление экстремума функции, определяющей зависимость работы торможения от смещения объекта по возможной траектории  $A_{об}(Dd_{об})$ , дает оценку ее предельного значения и критического смещения  $Dd_{кр}$ . Если кинетическая энергия объекта в момент  $t_0$  равна или превосходит оцененный запас по работе торможения, то можно ожидать нарушения устойчивости при угловом смещении, равном критическому, через интервал времени

$$DT = \frac{Dd_{кр}}{\dot{Dd}_{об}(t_0)} \frac{dDd_{об}}{\sqrt{\frac{2}{J_{об}} \sqrt{K_{об}(t_0) + A_{об}(Dd_{об})}}},$$

где  $K_{об}(t_0)$  – кинетическая энергия объекта в момент  $t_0$ .

Теперь можно определить основные черты алгоритма оценки параметров ударных возмущений,

предельных по устойчивости объектов структурно организованного движения по возможным траекториям. Распределение импульса между подсистемами и синхронными машинами зависит, в основном, от места приложения возмущения. При выбранном расположении возмущения увеличение его тяжести можно смоделировать пропорциональным ростом амплитуд импульсов за счет роста интервала  $dt$ . Выберем возмущение некоторой фиксированной тяжести (пробное возмущение). Пробное возмущение характеризуется кинетической энергией, дополнительно приобретенной системой за интервал импульсного воздействия:

$$DK^{\text{прб}} = DK_{\text{сис}}^{\text{прб}} + DK_{\text{рег}}^{\text{прб}} + DK_{\text{лок}}^{\text{прб}}.$$

Проведем расчет работы торможения на выбранных по тем или иным соображениям возможных траекториях объектов. Объект, работа торможения которого при перемещении по выбранному пути первой достигает экстремума, является виновником нарушения устойчивости при движении по данной возможной траектории.

Экстремальное значение работы торможения неустойчивого объекта показывает значение предельной кинетической энергии, которой возмущение должно наделить этот объект в момент  $dt$  для того, чтобы произошло нарушение устойчивости при движении по возможной траектории. Зная кинетическую энергию объекта, приводящую к нарушению устойчивости, определим соответствующий импульс этого объекта. Соотношение между предельным по устойчивости импульсом объекта и его импульсом при пробном возмущении

$$b_{об}^{\text{прд}} = \frac{J_{об} DW_{об}^{\text{прд}}}{J_{об} DW_{об}^{\text{прб}}} = \frac{DW_{об}^{\text{прд}}}{DW_{об}^{\text{прб}}}$$

показывает, как должны измениться импульсы всех объектов при изменении тяжести пробного возмущения до уровня, необходимого для нарушения устойчивости выбранного объекта при движении по возможной траектории. Тогда значение предельного возмущения, для характеристики которого естественно использовать кинетическую энергию колебаний системы, инвариантную к выбору ее структуры, можно оценить по формуле:

$$DK_{\text{кол}}^{\text{прд}} = [DK_{\text{рег}}^{\text{прб}} + DK_{\text{лок}}^{\text{прб}}] (b_{об}^{\text{прд}})^2.$$

Рассмотрим алгоритмы выявления структур неустойчивости энергосистемы на примере пары коммутаций, обеспечивающие моделирование коротких замыканий (КЗ) конечной длительности (сходные алгоритмы пригодны и для других пар

противоположных коммутаций, например для коммутаций линий электропередачи). Результатом аварийного воздействия является формирование (к моменту отключения шунта КЗ  $Dt$ ) распределенного по системе импульса  $J_i DW_{Gi} = DM_i Dt$ , где  $DM_i$  – небалансы моментов при КЗ в избранном узле системы. При известном распределении  $J_i DW_{Gi}$  определяются:  $DW_0(Dt)$  и  $DW_{i0}(Dt) = DW_{Gi} - DW_0(Dt)$ . Эти отклонения определяют свободные движения в поступательной и колебательных степенях свободы системы соответственно.

Выберем  $k$ -й пространственный осциллятор. Колебательные импульсы  $J_i DW_{i0}$  разделятся между его региональными и локальными движениями. В общем случае смежные подсистемы приобретают импульсы необязательно противоположного знака. Колебательная структура может быть получена из осциллирующей структуры после слияния смежных подсистем с одинаковыми знаками импульса. Кинетическая энергия колебательных движений в рамках полученной колебательной структуры при данном возмущении разделится на региональную и локальную составляющие:  $DK_{\text{кол}}(Dt) = DK_{\text{рег}}(Dt) + DK_{\text{лок}}(Dt)$ . Это разделение характеризуется соотношением, определяющим долю региональных движений:  $L_k = DK_{\text{рег}}(Dt) / DK_{\text{кол}}(Dt)$ .

Разделение энергии колебаний может рассматриваться для колебательных структур и других пространственных осцилляторов, для каждого из которых характерен свой весовой коэффициент энергии региональных движений. Можно предполагать, что те из них, в которых вес региональных движений имеет максимальное значение, и будут входить в состав доминирующих возбужденных пространственных осцилляторов (эти осцилляторы максимально резонируют с распределенным импульсом возмущения).

Проведем теперь для рассматриваемого пространственного осциллятора оценку предельного импульсного возмущения, приводящего к нарушению устойчивости по одному из сечений полученной колебательной структуры. Эта оценка проводится для возможной траектории движения, характеризующейся неизменностью импульсов подсистем колебательной структуры и пренебрежением импульсами всех локальных движений в подсистемах (локальные импульсы обнуляются). На такой траектории подсистемы выступают как цельные (но распределенные) объекты, внутренние движения которых не дифференцированы, и процессы нарушения устойчивости возможны только при межрегиональных колебаниях (вынесены на границы подсистем). Перемещение по указанной траектории обеспечивается при пошаговом изменении

углов синхронных машин  $d_{Gi}(t) = d_{Gi}(0) + \int_0^t \dot{d}W_{s0} dt$

и расчете текущего режима в сети без шунта КЗ, на основе которого определяются небалансы моментов синхронных машин и работа торможения специально сконструированных объектов системы. В качестве таких объектов рассматриваются подсистемы всех возможных вариантов структур неустойчивости, которые могут образоваться на полученной колебательной структуре. Среди них отбирается вариант, подсистемы которого первыми (при перемещении по возможной траектории) достигают критического смещения. Результат расчета: структура неустойчивости рассматриваемого осциллятора, предельные значения кинетической энергии региональных колебаний подсистем структуры неустойчивости, а также функциональная зависимость работы торможения этих подсистем от их углового смещения.

Знание возможностей по торможению подсистем структуры неустойчивости осциллятора при импульсном воздействии позволяет оценить предельное возмущение при конечной длительности КЗ. Для этого проводится пошаговый расчет работ ускорения подсистем структуры неустойчивости при небалансах относительных моментов, действующих на них на интервале КЗ (т.е. в схеме с шунтом КЗ). При равенстве накопленной площади ускорения еще остающейся после отключения КЗ, площадке торможения ее значение фиксируется (эта процедура имеет прямое сходство с известным методом площадей, почему здесь и используется его терминология). Затем определяются предельная кинетическая энергия колебаний (по описанному выше алгоритму, т.е. уже с учетом локальных и региональных движений) и время, которое пройдет после отключения КЗ до выхода подсистем структуры неустойчивости на предельное отклонение. Кроме этого, определяется время выхода подсистем на предельное смещение при запредельных возмущениях.

Проведя аналогичные расчеты для других пространственных осцилляторов (при различии получающихся колебательных структур, соответственно, и других возможных траекториях), получим оценку спектра предельных возмущений в рассматриваемом узле, приводящих к нарушению устойчивости по различным сечениям энергосистемы в рамках осциллирующих структур с именами « $f_i$ ».

Конечно, предельное возмущение по устойчивости только межрегиональных движений колебательной структуры осциллятора может быть уже избыточным по устойчивости каких-либо ее локальных колебаний. Однако локальные движения в колебательной структуре одного пространственного

осциллятора становятся региональными для другого (и наоборот) за счет их топологического различия, поэтому при полном представительстве доминирующих колебаний вероятность пропуска какой-либо структуры неустойчивости падает. Этим и определяется возможность ограничиться анализом устойчивости только взаимных колебаний подсистем.

Результаты расчета для нескольких осцилляторов удобно отобразить на энергoвременной диаграмме. На рис. 3 приведен пример такой диаграммы для трех доминирующих колебаний конкретной энергосистемы (115 узлов, 33 синхронные машины) при КЗ в некотором выбранном узле. Спектр собственных «малых» колебаний этой системы содержит 32 составляющие, колебания первого десятка из них имеют не звездообразные структуры. Горизонтальные отрезки прямых показывают энергетические уровни кинетической энергии колебаний, которой должна обладать система после отключения КЗ для развития неустойчивости различных осцилляторов (энергетические уровни возбуждения структур неустойчивости осцилляторов). Длина этих отрезков показывает время, которое пройдет после отключения КЗ до момента нарушения устойчивости при предельном возмущении. При запредельных возмущениях время выхода в критическую точку уменьшается (у каждой горизонтальной линии появляются направленные вверх и влево энергoвременные «хвосты»). Сечения структур неустойчивости даны в виде номеров подсистем осциллирующих структур, между которыми находится это сечение. Кривая, выходящая из нуля, отображает зависимость приобретенной кинетической энергии колебаний от длительности КЗ.

Рассмотрение положения сечений трех полученных структур неустойчивости в электрической сети системы показывает, что для рассматриваемой аварии все они совпадают между собой (это одно и то же сечение). Различие условий возбуждения неустойчивости, МВт·с

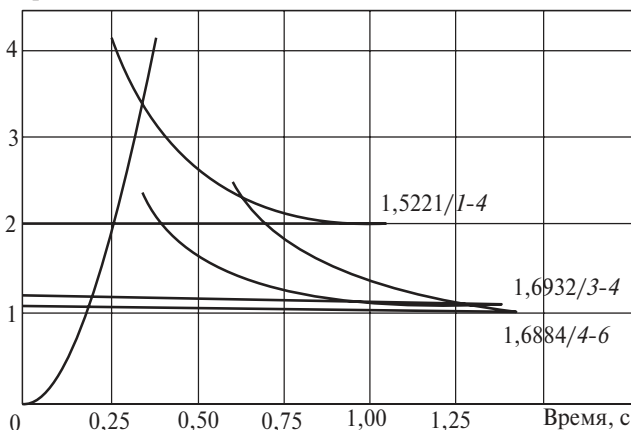


Рис. 3. Энергoвременная диаграмма неустойчивости

тойчивости этих осцилляторов по одному и тому же сечению системы объясняется различием траекторий движения подсистем колебательных структур (разных у разных осцилляторов). Из рис. 3 видно, что при КЗ длительностью меньше 0,2 с нарушения устойчивости не произойдет. При росте длительности КЗ свыше 0,2 с нарушение устойчивости, связанное с колебаниями осциллирующей структуры 1,6884 Гц, проявится в первую очередь. Энергетическая близость условий неустойчивости осцилляторов 1,6884 и 1,6932 Гц определяется близостью их колебательных структур. Так как сечения структур неустойчивости в сети совпадают, то при возмущениях, достаточных для возбуждения неустойчивости одного, двух или всех трех осцилляторов, асинхронный ход остается двухмашинным с неизменным положением центра качаний. Из рис. 3 также видно, что при длительности КЗ около 0,2 с нарушение устойчивости произойдет примерно через 1,5 с после отключения КЗ, т.е. имеется временной ресурс для осуществления противоаварийного управления, обеспечивающего сохранение устойчивости, равный 1,5 с. Соответственно, при росте длительности КЗ этот временной ресурс снижается. Проверка полученных результатов непосредственным расчетом переходного процесса показывает их хорошее совпадение как в части предельной длительности КЗ, так и по расположению сечения асинхронного хода.

Если предположить, что колебательные структуры пространственных осцилляторов во втором цикле качаний совпадают с колебательными структурами первого цикла, а импульсы подсистем только меняют знак, то можно оценить условия нарушения устойчивости и во втором цикле. Алгоритм такого расчета отличается от описанного не очень существенно (кроме расчета времени выхода подсистемы на предельное смещение).

На рис. 4 приведена энергoвременная диаграмма неустойчивости на первом и втором циклах качаний, рассчитанная при КЗ в другом узле той же

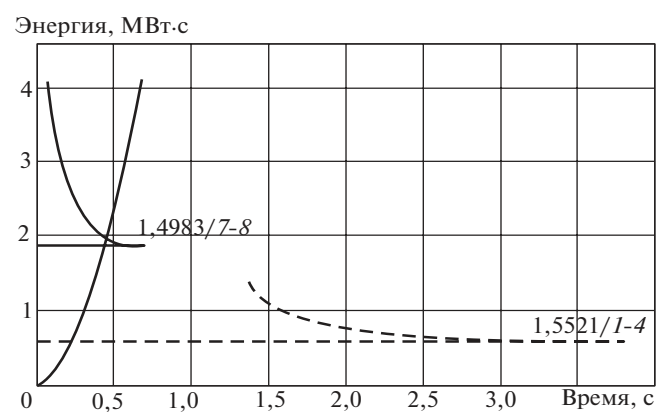


Рис. 4. Энергoвременная диаграмма неустойчивости на первом и втором циклах качаний



энергосистемы. Рассматривались две доминирующие осциллирующие структуры, причем для одной из них (1,5521 Гц) оказалось, что возможно нарушение устойчивости во втором цикле. Соответствующая кривая изображена штриховыми линиями. Видно, что развитие неустойчивости на втором цикле по сечению 1–4 этой структуры происходит за большой интервал времени. При большом возмущении, достаточном для развития неустойчивости в первом цикле, неустойчивость будет наблюдаться в виде быстрого развития асинхронного хода по несовпадающему в сети с предыдущим сечению 7–8 пространственного осциллятора 1,4983 Гц. Непосредственный расчет переходного процесса в системе подтверждает полученный результат.

Энерговременная диаграмма строится для некоторого узла и шунта КЗ. Если провести такие расчеты для выбранной совокупности узлов и шунтов, то можно (уже для этой совокупности): оценить значения предельных возмущений, выделить сечения асинхронного хода, оценить возможность развития многочастотного асинхронного хода, определить запасы времени на противоаварийное управление с целью предотвращения нарушений устойчивости, определить области системы, возмущения в которых приводят к сходным сценариям развития аварии при нарушениях устойчивости и др. Это позволяет провести предварительный обзор содержания задач по прерыванию развития аварий при нарушениях устойчивости вследствие КЗ в некотором регионе или во всей системе в целом.

**Заключение.** Энергосистема как среда, в которой происходят электромеханические колебания, характеризуется естественной пространственной структурной организацией колебательных движений, отражающей их волновой характер. Процессы нарушения устойчивости системы существенным образом связаны с топологией ее электромеханических колебаний.

Исследование структур неустойчивого колебательного движения в системе удобно проводить с привлечением понятий о пространственных осцилляторах, их осциллирующих и колебательных структурах, а также о возможных структурах неустойчивости, описывающих динамические свойства при колебаниях в энергосистеме с топологических позиций и используемых для получения различных форм структурно организованного движения.

Энергосистема может быть представлена множеством ее структурных отображений (структур). Любое движение системы может быть организовано на ее структуре. Структурно организованное движение имеет иерархический характер и состоит из общего движения системы, региональных движений подсистем и локальных движений в подсистемах.

Множеству структур одной и той же системы соответствует множество структурно организованных форм одного и того же движения.

Анализ энергетических соотношений при движении различных объектов структурно организованного движения позволяет оценивать условия нарушения устойчивости этих объектов относительно их окружения.

Структурный анализ неустойчивости электромеханических переходных процессов энергосистем использует энергетические соотношения для структурно организованного движения. Его основной методический прием – формулировка задачи анализа устойчивости в виде совокупности взаимно дополняющих задач устойчивости движения по возможным траекториям подсистем колебательных структур пространственных осцилляторов системы при рассматриваемых возмущениях.

Алгоритмы структурного анализа динамической неустойчивости позволяют выявлять содержание задач обеспечения динамической устойчивости с оценками их основных характеристик (предельных возмущений, положения сечений асинхронного хода, временных ресурсов для осуществления управления и др.).

Проверка алгоритмов структурного анализа динамической неустойчивости при коротких замыканиях при сопоставлении результатов их использования с расчетами переходных процессов показала их применимость для исследования существенных признаков развития неустойчивого движения в сложных энергосистемах.

Расширение задачи анализа устойчивости энергосистем за счет включения в нее вопроса о пространственной организации неустойчивого движения позволяет получать результаты ее решения в новых формах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Бушуев В.В., Лизалек Н.Н., Новиков Н.Л. Динамические свойства энергообъединений. – М.: Энергоатомиздат, 1995.
3. Крауфорд Ф. Волны. Т. 3. – М.: Наука, 1974.

*Авторы: Лизалек Николай Николаевич окончил электроэнергетический факультет Новосибирского электротехнического института (НЭТИ – ныне Новосибирский государственный технический университет – НГТУ) в 1969 г. В 1994 г. защитил докторскую диссертацию «Анализ динамических свойств энергообъединений на основе волнового подхода» в НЭТИ. Научный руководитель ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем» (ИАЭС).*

*Ладнова Александра Николаевна окончила факультет энергетики НГТУ в 2007 г. Ведущий инже-*

нер отдела проектирования Филиала ОАО «НТЦ электроэнергетики» – СибНИИЭ.

**Тонышев Владимир Федорович** окончил электроэнергетический факультет НЭТИ в 1971 г. В 1987 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка защит синхронных машин от асинхронных режимов» в СибНИИЭ. Профессор Новосибирской государственной академии водного транспорта.

**Данилов Максим Владимирович** окончил факультет энергетики НГТУ в 2004 г. Заведующий сектором ПА ЗАО «ИАЭС».

**Мочалин Константин Сергеевич** окончил электромеханический факультет Новосибирской государственной академии водного транспорта в 2008 г. Заведующий лабораторией Новосибирской государственной академии водного транспорта.