

Исследование архитектуры неустойчивых взаимных движений энергосистемы как предпосылка определения структуры противоаварийного управления

**ЛИЗАЛЕК Н.Н., ТОНЫШЕВ В.Ф., ВТОРУШИН А.С., ПОПОВА Е.Ю.,
ПЕТРУШКОВ М.В.**

**ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем»
Новосибирский государственный технический университет
Новосибирская государственная академия водного транспорта
Россия
eyi@iaes.ru**

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Структурный анализ устойчивости энергосистем, структура неустойчивости, предельные возмущения, энерговременная диаграмма неустойчивости, архитектура неустойчивости, кластерный анализ, ансамбль неустойчивых движений.

1 ВВЕДЕНИЕ

Сложность электромеханических переходных процессов в энергосистемах проявляется в сложности и многообразии процессов нарушения устойчивости параллельной работы синхронных машин системы. Известно много разновидностей нарушений устойчивости. Наиболее широко встречающимися являются неустойчивые процессы при «малых» (апериодическая статическая устойчивость) и «больших» (динамическая устойчивость) возмущениях.

Нарушения устойчивости в сложных энергосистемах характеризуются рядом количественных и качественных показателей. К первым относятся, в частности, временные (темповые) характеристики процесса, числовые показатели, описывающие интенсивность воздействий (аварийных возмущений), приводящих к неустойчивому взаимному движению, количественные оценки запаса устойчивости. Ко вторым можно отнести характер неустойчивости (при «малых» или «больших» возмущениях, «сползание» или самораскачивание, в первом или последующих циклах качаний), а также способ деления системы на не синхронно движущиеся части.

Обычно каждый процесс нарушения устойчивости рассматривается отдельно как уникальное событие. Однако при построении системной автоматики предотвращения нарушений устойчивости (АПНУ) процессы нарушения устойчивости группируются в некоторые совокупности, объединяемые в рамках иерархических систем управления. Эта группировка, в той или иной степени, связана с естественными динамическими свойствами объекта управления.

Действительно, энергосистема, как единый динамический объект, должна проявлять себя таковым и в процессах нарушения устойчивости. Это означает, что правомерна постановка задачи исследования совокупности процессов нарушений устойчивости в сложной энергосистеме и выявления связей между отдельными её представителями, обусловленных динамическими свойствами системы. Изучение этих связей позволяет перейти к описанию структурных составляющих (архитектуры) этой совокупности неустойчивых взаимных движений энергосистемы.

Наиболее известным и часто применяемым способом исследования устойчивости является непосредственное интегрирование уравнений движения сложной системы. Развитие алгоритмов численного интегрирования и существенное, качественное улучшение

характеристик используемых вычислительных средств, позволяют провести расчётные исследования переходных процессов в любых схемах и для любых возмущений.

Определённые трудности возникают, однако, при постановках задач устойчивости обзорного характера, в которых важны не конкретные результаты расчёта того или иного переходного процесса, а свойства некоторых совокупностей неустойчивых движений в энергосистеме. Понятно, что решение таких задач на основе расчётов переходных процессов затруднено. Приоритетным для таких задач остаётся применение качественных методов анализа устойчивости.

Электромеханические переходные процессы, в том числе и процессы нарушения устойчивости параллельной работы синхронных машин системы, самым тесным образом связаны с физическими эффектами, наблюдающимися при колебательных движениях. Наблюдать их можно, в основном, во время выполнения расчётных исследований. Два из них наиболее существенны для рассматриваемой задачи.

Первый эффект формулируется на основе наблюдения за перемещениями векторов напряжения в различных узлах системы, если их углы измеряются относительно общей оси отсчёта, вращающейся со скоростью центра инерции системы. Выделенные таким образом колебания в системе около её 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 количество и состав подсистем, а также способ их объединения межрегиональными связями, т.е., структура (топология) наблюдаемого колебательного движения, в общем случае, изменяются. Этот эффект можно представить символическим равенством:

$$\boxed{\begin{array}{c} \text{Колебания происходят в виде} \\ \text{противоположно направленных движений} \\ \text{смежных областей системы} \end{array}} = \boxed{\begin{array}{c} \text{Топология колебательных} \\ \text{движений определена их} \\ \text{волновым характером} \end{array}}$$

Второй качественный результат связан с изменением пространственного положения сечения первично развивающегося асинхронного хода при дальнейшем увеличении тяжести возмущения, уже приводящего к нарушению устойчивости. Пусть, для примера, тяжесть возмущения в некотором фиксированном узле системы увеличивается путём роста длительности проходящего короткого замыкания (КЗ). Наблюдаемое нарушение устойчивости параллельной работы синхронных машин системы по некоторому её сечению, затем, после дальнейшего увеличения длительности КЗ, иногда (но не всегда) может смениться более быстрым развитием неустойчивости уже по другому сечению (обычно расположенному ближе к месту аварии). Таких изменений структуры неустойчивости при возрастании тяжести возмущения может быть даже несколько. Таким образом, может наблюдаться изменение структуры неустойчивости при изменении тяжести фиксированного в пространстве возмущения. Этот эффект естественно связать с происходящими при утяжелении изменениями в соотношениях между условиями развития движения по предельным (по устойчивости) траекториям в протяжённой энергосистеме, содержащей множество слабых звеньев, проявляющихся в разных её местах. Эти слабые звенья проявляют себя развитием неустойчивости при разной величине предельного возмущения в рассматриваемом месте системы через различное время. Оказывается, что наблюдаемая структура первично развивающегося асинхронного хода определяется местоположением слабого звена, достигающего критического по устойчивости состояния первым. Это можно представить так:

$$\boxed{\begin{array}{c} \text{Изменение структуры} \\ \text{неустойчивости при изменении} \\ \text{тяжести возмущения} \end{array}} = \boxed{\begin{array}{c} \text{Изменение местоположения} \\ \text{слабого звена, достигающего} \\ \text{критического состояния первым} \end{array}}$$

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В [1] предложен структурный анализ устойчивости (неустойчивости) электромеханических переходных процессов, основанный на исследованиях структурной организации колебательных движений, содержащий в своей постановке задачу определения положения сечения асинхронного хода (структуры неустойчивости). Он использует понятие об осцилляторах системы, представляющих её совокупностью подсистем, связанных потенциально «слабыми» связями. Структура каждого осциллятора определяется на основе расчёта собственных «малых» колебаний системы. Перевозбуждение осцилляторов и приводит к развитию неустойчивого взаимного движения. Качественный характер структурный анализ устойчивости приобретает за счёт использования возможных траекторий движения, для определения которых не требуется численное интегрирование уравнений движения [1].

Явления структурной организации колебаний проявляются тогда, когда эти колебания происходят, т.е. когда осцилляторы системы обладают некоторым запасом энергии. В условиях постоянно действующих возмущений они всегда обладают некоторой энергией колебаний, содержащей потенциальную и кинетическую составляющие. Нарушения устойчивости при малых или больших возмущениях происходят при превышении кинетической составляющей энергии колебаний некоторых пределов, определяемых глубинами потенциальных ям для взаимных колебаний.

Изменения кинетической и потенциальной энергии системы и её частей определены траекторией движения. Для их расчёта вычисляются работы, совершаемые на протяжении некоторым образом выбранной возможной траектории. Расчёт работ в аварийном режиме используется для определения кинетической энергии. Целью расчёта работ на стадии свободного движения становится исследование рельефа многомерной потенциальной функции системы вдоль рассматриваемой траектории, определяющего высоту потенциальных барьеров, защищающих движущиеся объекты энергосистемы от выпадения из синхронизма в послеаварийном режиме [2].

При выборе траекторий движения системы, исследуемых на устойчивость, используются траектории, заведомо опасные по устойчивости. Благодаря первому из отмеченных выше свойств электромеханических колебаний эти траектории целесообразно выбирать на основе исследований структуры колебательного движения, развивающегося в системе при той или иной аварии. В этом случае появляется возможность исследования рельефа потенциальной функции, связанного с региональными (групповыми) движениями в системе. Понятно, что в общем случае потребуется не одна траектория, а некоторая их совокупность – связка возможных траекторий, состав которой зависит от состава возбужденных осцилляторов системы.

Все эти соображения лежат в основе предложенного в [1] способа исследования электромеханических переходных процессов с помощью энерговременных диаграмм неустойчивости при аварийных ситуациях, обусловленных проходящими возмущениями. Эти возмущения моделируются парами противоположных коммутаций одного и того же элемента или элементов системы. С помощью таких пар коммутаций можно моделировать, например, проходящие короткие замыкания, отключения одной или нескольких линий электропередачи, сбросы и набросы нагрузки в одном или нескольких узлах системы и др. Рассматриваемая аварийная ситуация характеризуется её длительностью, определяемой интервалом времени между первой и второй группой коммутаций (интервалом аварийного возмущения). После второй, восстанавливающей доаварийную схему группы коммутаций, система свободно движется в послеаварийном режиме.

В упрощенном виде (без «хвостов» запредельных возмущений [1]) энерговременная диаграмма для конкретной (одной) аварийной ситуации, в общем случае, имеет вид, представленный на рисунке 1.

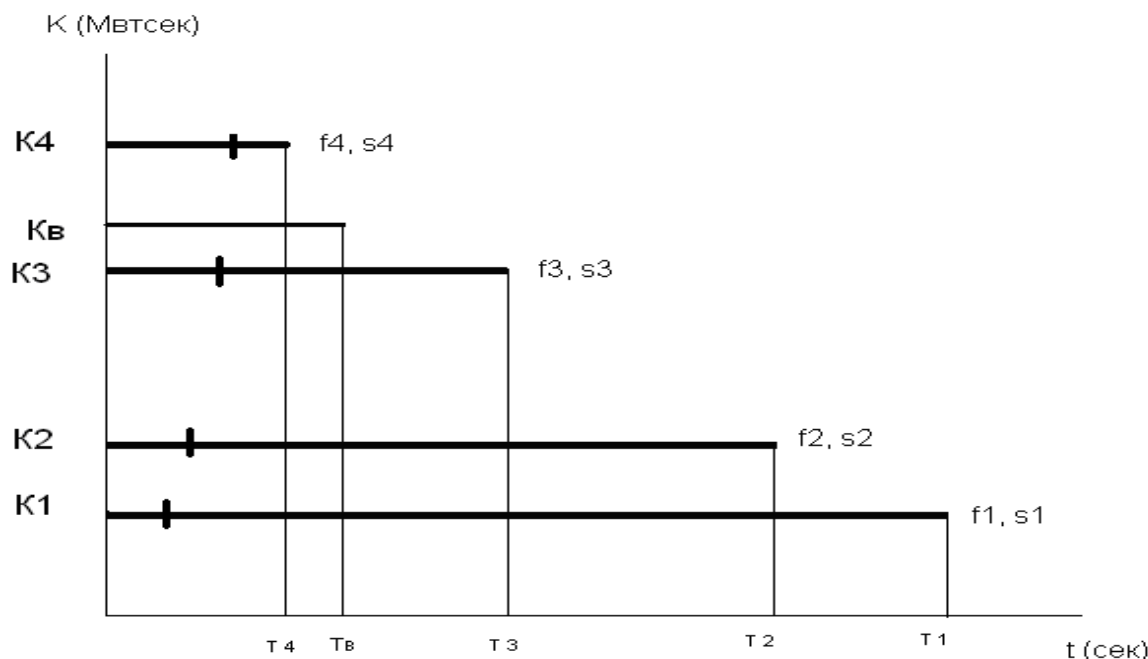


Рис. 1: Энерговременная диаграмма неустойчивости для одной аварийной ситуации

Горизонтальные отрезки прямых показывают энергетические уровни кинетической энергии колебаний K_1, \dots, K_4 (предельные возмущения), возбуждающие различные структуры неустойчивости (варианты «распада» системы) при аварии. Длина этих отрезков T_1, \dots, T_4 равна времени после начала аварии, в течение которого система, при этом предельном возмущении, достигнет точки невозврата (критических взаимных смещений). Для каждого уровня это время складывается из длительности предельного по устойчивости аварийного возмущения (отмеченного вертикальной меткой) и времени выхода системы на критические смещения в её свободном движении в послеаварийном режиме. Каждому уровню соответствует осциллятор с именем f_i и сечение асинхронного хода s_i (являющееся одним из сечений этого осциллятора). Для некоторых аварий нижние энергетические уровни могут определять неустойчивость во втором цикле качаний.

Отметим, что обнаружение нарушения устойчивости, например, при временном отключении линий, может использоваться для выявления нарушения устойчивости и в случае безвозвратной их потери. Это обстоятельство позволяет выявлять случаи отсутствия устойчивого послеаварийного режима при отключениях связей, рассматриваемые как частный случай нарушения динамической устойчивости.

Энерговременная диаграмма для конкретной аварии уже позволяет определить некоторые черты противоаварийного управления, предназначенного для обеспечения устойчивости при её возникновении. Для примера, рассмотрим возмущающее воздействие с энергией возмущения K_b (зависящей от длительности существования аварийного режима), превышающей K_3 ($K_b > K_3$). Предположим, что величина K_b становится известной системе управления в момент времени T_b после возникновения аварии (время идентификации и оценки тяжести аварии). Если $T_b < T_3$, то к моменту готовности системы управления к принятию решений нарушения устойчивости еще не произойдет. Избыток энергии возмущения $K_b - K_3$ характеризует объем управляющего воздействия, обеспечивающего сохранение устойчивости по структуре неустойчивости с номером "3". Величины $K_3 - K_2$ и $K_2 - K_1$ определяют объемы противоаварийных воздействий, обеспечивающих последовательное сохранение устойчивости по структурам "2" и "1". Ресурсы времени на их осуществление составляют: на третьем энергетическом уровне: $(T_3 - T_b)$, на втором - $(T_2 - T_b)$, на первом - $(T_1 - T_b)$. В основу построения, в общем случае иерархического, управления для обеспечения динамической устойчивости переходного процесса при рассматриваемой аварии можно положить временные и пространственные соотношения между развитием неустойчивости по разным структурам. На верхних уровнях иерархии оказываются управления, ориентированные на медленно

развивающиеся типы (структуры) неустойчивости, как правило, содержащие динамические подсистемы наибольших пространственных масштабов. Нижние уровни иерархии предназначены для предотвращения быстро развивающихся процессов нарушения устойчивости по структурам неустойчивости с динамическими подсистемами меньшего масштаба, являющиеся частями подсистем из верхних уровней иерархии.

Последовательность возбуждения структур неустойчивости при росте тяжести конкретной аварии даёт иерархический ряд неустойчивости. Если, при перемещении от первых членов этого ряда к последующим, время нарушения устойчивости монотонно снижается, то такой ряд является правильным. В рамках правильного иерархического ряда возбуждение неустойчивости характеризуется всё большей и большей локализацией и ускорением процессов развития неустойчивости при росте тяжести возмущения (сечения асинхронного хода "приближаются" к месту возмущения). Правильный иерархический ряд возбуждения неустойчивости характеризует естественные свойства пространственно-временной избирательности развития неустойчивости в энергосистеме, приближающейся по своим свойствам к равнопрочной. Описание общего случая энергетических, пространственных и временных соотношений в развитии неустойчивости при конкретном возмущении содержит в себе все основные черты, присущие процессам нарушения устойчивости энергосистем и на множестве возмущений.

Для выбора противоаварийной автоматики необходим анализ не одной, а множества аварийных ситуаций. Способ проведения такого анализа может основываться на следующих соображениях. Получаемое с помощью энергосистемных диаграмм описание неустойчивости даёт компактную и, в тоже время, весьма полную и общую (унифицированную) совокупность энергетических, пространственных и временных характеристик этого явления, применимую для анализа различных и, даже, разнотипных аварийных ситуаций. Энергетическая характеристика – это величина предельной энергии возмущения. Пространственная – это расположение аварийного воздействия и сечения асинхронного хода. Временная – это длительность предельного возмущения и время, затрачиваемое на выход системы в точку невозврата. Общность этих характеристик неустойчивости для различных аварий позволяет строить энергосистемную диаграмму не для одной, а для ансамбля аварийных ситуаций, сопоставлять их между собой и группировать по различным признакам. В состав ансамбля могут включаться разнородные аварии, например: короткие замыкания и отключения линий. Кроме того, результаты исследований устойчивости энергосистемы, находящейся в различных исходных состояниях (исходных режимах), также могут включаться в такой ансамбль.

Признаки, используемые для группировки аварий из их ансамбля, могут быть различными. Они могут иметь энергетический, пространственный, временной или качественный характер. Кроме того, группировка возможна и по нескольким признакам. Например, временные признаки могут использоваться для: выделения всех случаев, в которых предельное время аварии меньше заданного, или, полное время выхода на предельные смещения меньше заданного. Пространственные признаки позволяют, например: отобрать все аварии, происходящие в заданном регионе системы, или, выделить аварии, при которых сечения асинхронного хода размещаются в заданной части системы. Последний вариант позволяет определить район системы, аварии в котором приводят к сходному по топологии развитию асинхронных движений в ней (район топологического подобия развития аварий). Энергетические признаки приводят к выделению аварий, принадлежащих некоторой полосе энергии предельных возмущений. Качественные признаки позволяют, например: выделить только короткие замыкания, или, выделить только однофазные короткие замыкания, или, выделить случаи отключения линий и т.п. Группировка по нескольким признакам может проводиться, например, так: выделить все аварии, возникающие в заданной части системы, приводящие к развитию асинхронного хода по сечениям в заданном её регионе, или, выделить аварии по какому либо из временных признаков, происходящие в заданной части системы и т.п.

Операции селекции аварий из их ансамбля позволяют устанавливать общность и различие между ними. Они легко могут быть формализованы на основе широко используемого кластерного анализа баз данных. Получаемые при этом результаты в виде совокупности кластеров с заданными свойствами описывают уже архитектуру неустойчивых движений системы при аварийных ситуациях.

Кластеры аварийных ситуаций, приводящих к нарушениям устойчивости, определяют структуру проблем устойчивости системы, а, следовательно, и структуру задач, которые могут быть поставлены перед системами противоаварийного управления по обеспечению устойчивости. В связи с этим, информация об архитектуре неустойчивых движений может выступать одной из исходных предпосылок для проведения выбора структуры системы противоаварийного управления объединённой энергосистемы и формулировки задач отдельных, входящих в неё, подсистем.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Единообразие физических характеристик неустойчивого движения, достигаемое при его энерговременном и пространственном описании, позволяет формировать ансамбль аварийных ситуаций, сопровождающихся нарушениями устойчивости, из однотипных, сопоставимых между собой записей.

2 Кластерный анализ этого ансамбля по различным задаваемым признакам позволяет исследовать архитектуру неустойчивых движений сложной энергосистемы.

3 Архитектура неустойчивости взаимных движений системы может быть использована для определения структуры задач по обеспечению устойчивости и выступать исходной предпосылкой при выборе структуры системы противоаварийного управления.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лизалек Н.Н., Ладнова А.Н., Тонышев В.Ф., Данилов М.В., Мочалин К.С. Структура электромеханических колебаний и устойчивость энергосистем. Электричество. – 2011. – №6. – С. 11 – 19.
- [2] Лизалек Н.Н., Ладнова А.Н., Тонышев В.Ф., Попова Е.Ю., Вторушин А.С. Оценка динамической устойчивости энергосистем на основе метода площадей. Изв. АН Энергетика. – 2013. - №1. – С. 139-152.