

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Н.Н. Лизалек<sup>1,2</sup>, А.С. Вторушин<sup>1</sup>, В.В. Васильев<sup>3</sup>,  
В.К. Шипилов<sup>1,2</sup>, Р.Ю. Степанович<sup>1,2</sup>

1. АО «Институт автоматизации энергетических систем»
2. Новосибирский государственный технический университет
3. Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Юга

## *Введение*

Сложность электромеханических переходных процессов в энергосистемах проявляется в комплексности и многообразии процессов нарушения устойчивости параллельной работы синхронных машин. Одной из важных целей исследования нарушений устойчивости выступает определение положения сечений асинхронного хода и времени нарушения устойчивости при различных аварийных возмущениях. Выявление пространственной структуры неустойчивости становится особо актуальным в задачах построения автоматических систем противоаварийного управления с целью обеспечения устойчивости сложных энергосистем при авариях.

Автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) в послеаварийных режимах ориентирована на выбор управляющих воздействий, обеспечивающих существование послеаварийного режима с запасом статической устойчивости, не меньшим заданного. Однако необходимо также удостовериться в динамической устойчивости переходного процесса, завершающегося установлением послеаварийного режима. При нарушении устойчивости в динамическом переходе необходимо ввести дополнительное управление, которое в совокупности с управлением, обеспечивающим существование послеаварийного режима с допустимым запасом, позволит его действительно осуществить.

В Объединенных энергосистемах (ОЭС) функционирует двухуровневая система АПНУ – централизованная система противоаварийной автоматики (ЦСПА). Выбор управления в ЦСПА осуществляется по принципу 1-ДО, объемы управляющих воздействий рассчитываются в циклическом режиме каждые 30 секунд. Из-за необходимости выбора управлений в заданный промежуток времени и постепенного усложнения математических моделей энергосистем важным фактором является скорость расчета переходного процесса при проверке динамической устойчивости. Значительное влияние на скорость расчета оказывает способ выявления неустойчивости переходного процесса.

### Идентификация неустойчивости

Понятие колебательной структуры возникает на основе наблюдения за перемещениями векторов напряжения в различных узлах системы. При этом проявляется естественная структурная организация электромеханических колебаний энергосистем, приводящая к формированию наблюдаемых колебательных структур.

В основе структурной организации движения лежит образование групп синхронных машин, движущихся относительно центра инерции системы сходным образом. Такие группы (ядра подсистем) формируют вокруг себя области системы, вектора напряжений в узлах которых перенимают характер движения группы.

В качестве группового признака для синхронных машин, лежащих внутри выделяемой области, является знак отклонения скорости их вращения от скорости вращения центра инерции системы  $\Delta\Omega_{ci0}(t)$ . Из этого следует, что знак всех переменных:

$$\Delta\Omega_{ci0}(t) = \Omega_{ci}(t) - \Omega_0(t) \quad (1)$$

в момент времени  $t$  должен быть одним и тем же для всех машин группы, образующих ядро подсистемы.

При расчете электромеханических переходных процессов измерение углов векторов напряжения и роторов синхронных машин проводится относительно так или иначе выбранной общей оси отсчета, обычно вращающейся. Производные по времени для измеряемых таким образом углов вычисляются по соотношениям вида:

$$\frac{d\delta_i(t)}{dt} = \Omega_i(t) - \Omega_{омс}(t) \quad (2)$$

где  $\Omega_{омс}(t)$  - угловая скорость оси отсчета,  $\delta_i(t)$  - угол относительно неё.

При определении структуры движения возможно использовать и относительные смещения. Перемещение вектора напряжения узла относительно центра инерции системы, накопленное на интервале  $(t_0-t)$   $\Delta\delta_{i0}(t, t_0)$  с учетом (2) определится:

$$\Delta\delta_{i0}(t, t_0) = \int_{t_0}^t \Delta\Omega_{i0} dt = \delta_i(t) - \delta_i(t_0) - \int_{t_0}^t (\Omega_0 - \Omega_{омс}) dt \quad (3)$$

Интеграл в правой части вычисляется следующим образом:

$$\int_{t_0}^t (\Omega_0 - \Omega_{омс}) dt = \frac{\sum_k J_k \int_{t_0}^t (\Omega_{zk} - \Omega_{омс}) dt}{\sum_k J_k} = \frac{\sum_k J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_s} \quad (4)$$

где  $\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)$  - изменение угла  $k$ -ой синхронной машины на интервале  $(t_0-t)$ , а суммирование идет по всем синхронным машинам системы. Следовательно, возможно получить соотношение:

$$\Delta\delta_{i0}(t, t_0) = \delta_i(t) - \delta_i(t_0) - \frac{\sum_k J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_s} \quad (5)$$

в правой части которого участвуют углы векторов напряжения и углы роторов синхронных машин, измеренные относительно используемой в расчете оси отсчета. При этом замена оси отсчета не приводит к изменению смещений относительно центра инерции (инвариантность к выбору оси отсчета).

Для идентификации неустойчивости (установления факта нарушения устойчивости и определения сечения асинхронного хода) необходимо выделить межсистемные связи колебательной структуры, по которым, собственно, и происходит развитие асинхронного хода.

Для выделения такой связи можно воспользоваться вычислениями изменений взаимных углов между смежными подсистемами колебательной структуры. Для смежных подсистем,  $s$ -ой и  $m$ -ой, изменение взаимного угла  $\Delta\delta_{sm}(t, t_0)$  на интервале  $(t_0-t)$  определяется как:

$$\Delta\delta_{sm}(t, t_0) = \frac{\sum_{k_s} J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_s} - \frac{\sum_{k_m} J_k [\delta_{zk}(t) - \delta_{zk}(t_0)]}{J_m} \quad (6)$$

где  $k_s$  и  $k_m$  - множества генераторных узлов  $s$ -ой и  $m$ -ой подсистем. При этом выявление межсистемной связи, по которой возникает асинхронный ход, можно проводить по признаку:

$$|\Delta\delta_{sm}(t, t_0)| \geq 180^\circ. \quad (7)$$

Если отключение выявленной межсистемной связи приводит к делению системы на две отдельные части, то определение сечения асинхронного хода на этом завершается [1, 3, 4]. Завершение определения сечения асинхронного хода происходит при установлении факта деления системы на две части совокупностью межсистемных связей, для которых одновременно выполняются соотношения (7). На рисунке 1 приведены характерные колебательные структуры энергообъединений:

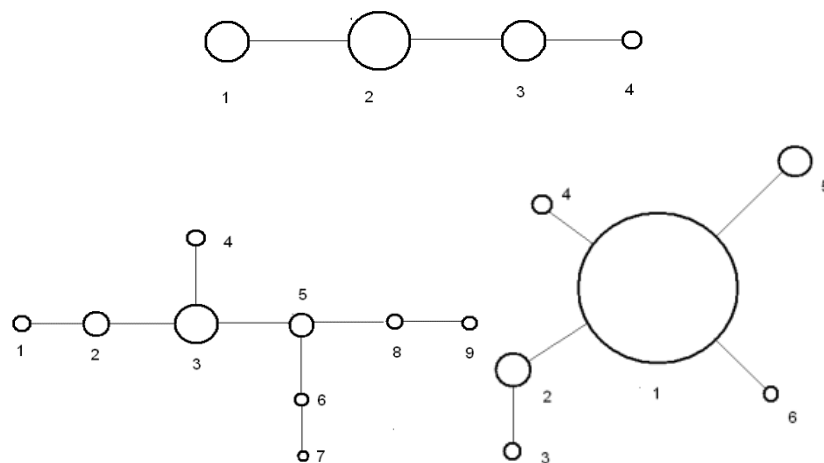


Рис. 1. Примеры колебательных структур энергосистем

### Энергетические характеристики переходного процесса

Кинетическая энергия объекта на интервале  $(t_0-t)$  может нарастать или убывать. В первом случае работа будет положительна, во втором отрицательна. Так как работа  $A$  может быть увязана с изменением потенциальной энергии  $\Delta U$  (в соответствии с определением последней как  $\Delta U = -A$ ), то положительная работа соответствует спуску в потенциальную яму. Отрицательная работа - подъёму из потенциальной ямы. Используя представление об объекте, движущемся в потенциальной яме, можно сделать вывод, что нарушение устойчивости связано с выходом этого объекта на гребень потенциальной функции [2].

Пары связанных подсистем колебательной структуры могут содержать как собственно подсистемы колебательной структуры, так и подсистемы, образованные в результате полного или частичного слияния подсистем, находящихся по разные стороны рассматриваемого сечения. Таким образом, пара может охватывать часть системы или всю систему.

Построить потенциальную яму на основе расчета переходного процесса можно отложив по оси ординат кинетическую энергию взаимных колебаний в некоторый момент времени, взятую с отрицательным знаком, а по оси абсцисс – взаимный угол  $\Delta\delta_{12}(t, t_0)$ , наблюдаемый в тот же момент времени.

На рисунке 2 представлено устойчивое взаимное движение в первом и втором циклах качаний. Последовательность положений: 1-2-3-2-4-2.

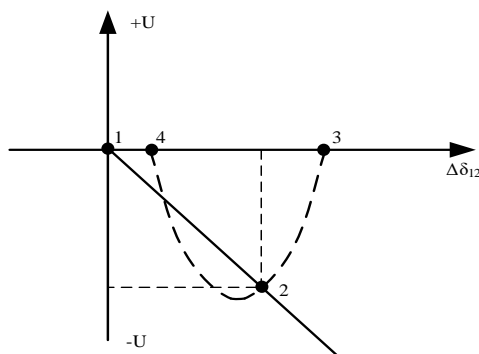


Рис. 2. Расчетная потенциальная яма пары подсистем при устойчивом движении в первом и втором циклах качаний.

Исследование потенциальных ям позволяет выполнить поиск противоаварийного управления, предотвращающего нарушение устойчивости.

### Определение подсистем в колебательной структуре

Можно использовать два подхода к выделению подсистем в колебательной структуре:

1. Определение подсистем на каждом шаге расчета переходного процесса. Данный способ является более точным, однако требует больше процессорного времени.
2. Фиксация состава подсистем в момент начала развития переходного процесса и обновления их в процессе расчета. Достоинством данного способа является быстрота расчета, но возможны погрешности при сложных авариях.

Для сравнения точности определения времени идентификации неустойчивости было выполнено моделирование КЗ на шинах 500 кВ Богучанской ГЭС на математической модели ОЭС Сибири, для сохранения устойчивости энергосистемы в переходном процессе требовалось отключение 2-х генераторов – реализация УВ типа ОГ-2.

Таблица 1. Сравнение времени идентификации неустойчивости

Подход к выделению подсистем	Время идент. неустойчивости. Без УВ, с.	Время идент. неустойчивости. ОГ-1, с.	Длительность расчета, с.
Определение подсистем на каждом шаге расчета	1.226	1.395	12.74
Фиксация подсистем в начале расчета	1.224	1.392	7.21

Энергетические характеристики переходного процесса приведены на рисунках 3–4.

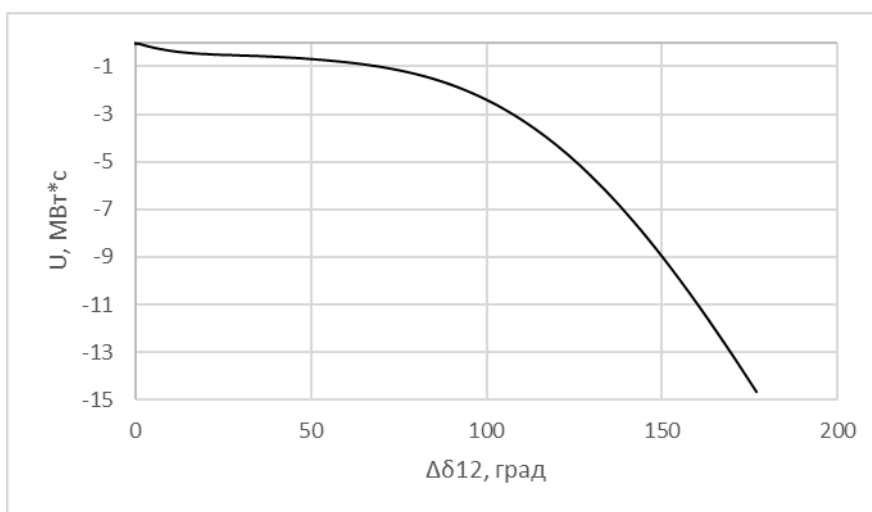


Рис. 3. Потенциальная яма пары БоГЭС – ЭС Сибири при неустойчивом движении

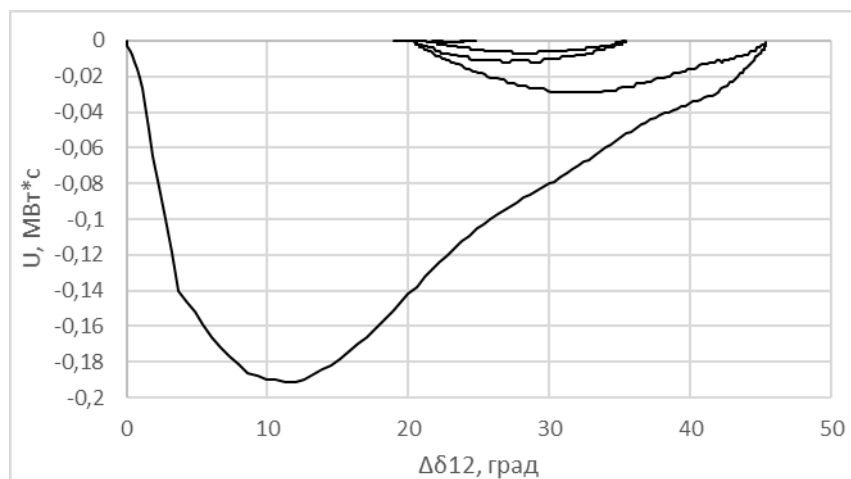


Рис. 4. Потенциальная яма пары БoГЭC – ЭC Сибири при устойчивом движении – OГ-2

### *Заключение*

Фиксация состава подсистем в момент начала развития переходного процесса и обновления их в процессе расчета позволяет увеличить скорость расчета и обеспечивает высокую точность при расчете аварий вблизи станций.

Данный подход к определению подсистем в колебательной структуре может быть использован в системах, использующих принцип 1-ПОСЛЕ, когда выбор УВ осуществляется непосредственно после возникновения аварийного возмущения.

### *Список использованных источников*

1. Лизалек Н.Н. Электромеханические волны и устойчивость энергосистем. М: Директ-Медиа. 2016. 418 с.
2. Лизалек Н.Н., Васильев В.В., Бородин Д.Н., Аржанников С.Г. Выбор корректирующего управления для обеспечения динамической устойчивости волнового электромеханического процесса в энергосистеме // Электричество. 2017. №2. С. 4–13.
3. Лизалек Н.Н., Васильев В.В., Бородин Д.Н., Шипилов В.К. Выбор управляющих воздействий ЦСПА по условию обеспечения динамической устойчивости энергосистемы // Релейная защита и автоматика энергосистем. 2017.
4. Лизалек Н.Н., Тонышев В.Ф. Прогнозирование и идентификация неустойчивости в электроэнергетических системах. Новосибирск: изд-во НГАВТ. 2013. 230 с.

Научный руководитель: Н.Н. Лизалек, д.т.н., профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ.