

Алгоритмы оценки динамической устойчивости при управляемом переходе к послеаварийному режиму

**ЛИЗАЛЕК Н.Н., БОРОДИН Д.Н., ВТОРУШИН А.С.,
АРЖАННИКОВ С.Г.**

**ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем»
Новосибирский государственный технический университет
Россия**

Основные факторы, определяющие возможность нарушения динамической устойчивости управляемого АПНУ перехода к послеаварийному режиму, устойчивому по статике.

1. *Запаздывание* ввода управляющих воздействий.

2. *Дополнительные* возмущения, которые не могут быть учтены при выборе управления, обеспечивающего статическую устойчивость послеаварийного режима.

3. Возможность нарушения динамической устойчивости *не в первом* цикле качаний.

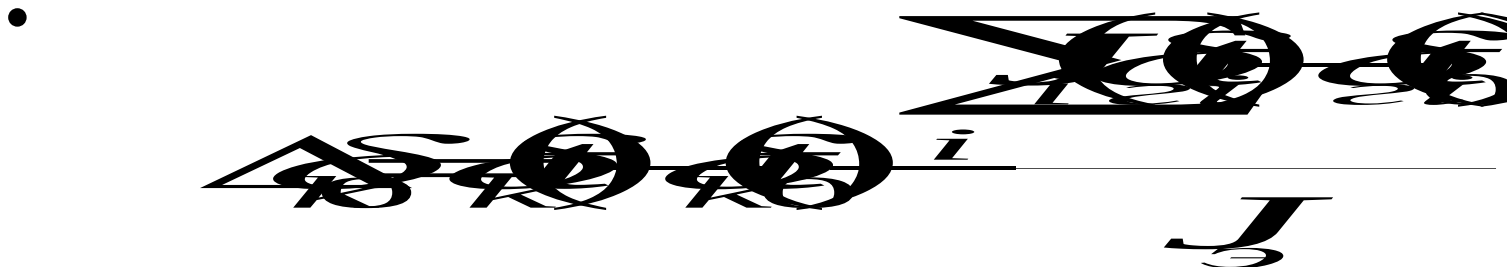
- Для решения задач динамической устойчивости необходимо оперировать с динамической моделью системы. При этом может быть учтено выполнение управляющих воздействий через заданные интервалы времени после срабатывания пусковых органов АПНУ, расширен список аварийных ситуаций и определена возможность нарушения устойчивости не в первом цикле качаний.
- Алгоритмы идентификации неустойчивости на траектории движения динамической модели системы могут быть основаны на энергетическом методе, примененном к относительным движениям подсистем, разделяемых сечениями *колебательной структуры*.

- Система может быть представлена совокупностью областей, любые смежные из которых движутся в *противоположных направлениях в каждый момент времени* (эволюционирующая колебательная структура движения). В основе структурной организации движения лежит образование групп синхронных машин, движущихся относительно центра инерции системы сходным образом. Такие группы формируют вокруг себя области системы, вектора напряжений в узлах которых перенимают характер движения группы. Для выделения подсистем нужно определить границы между ними.

- Признаком граничной связи, объединяющей две смежные подсистемы, может быть разный знак отклонений индивидуальной угловой частоты в узлах по её концам от угловой скорости перемещения центра инерции системы. Эта колебательная структура описывает движение как электромеханическую волну относительных скоростей.

- При определении структуры движения можно воспользоваться не относительными скоростями, а *относительными смещениями, определяя электромеханическую волну смещений.*

Перемещение вектора напряжения k -ого узла относительно центра инерции системы на интервале $(t_0 - t)$ определится соотношением, которое можно применять для выделения структур по скоростям и по смещениям:



- В классической постановке энергетический метод (метод площадей) используется для оценки *предельных возмущений*. В рассматриваемой задаче энергетический метод должен *обеспечить идентификацию динамической неустойчивости движения системы при данном возмущении*. Это означает, что при движении системы по её траектории необходимо определить момент времени, после которого *свободный (т.е. в свободном движении) возврат* системы в *существующее (и уже пройденное) положение устойчивого равновесия физически невозможен*.

- Процесс эволюции колебательной структуры во времени связан с не установившимся волновым процессом в существенно неоднородной системе. Наибольший интерес представляют структуры, сложившиеся в системе к моменту начала развития асинхронного хода. Эти структуры содержат обычно не более 4 подсистем (чаще всего 2, реже 3) и имеют цепочечный или звездообразный характер.
- Энергетический метод основан на расчете составляющих кинетической энергии колебаний и работы на траекториях регионального относительного движения в системе.

Региональная составляющая
кинетической энергии колебаний и ее
производная по времени

$$K_{reg} = \sum_s \frac{A_s^2}{2}$$

$$\frac{dK_{reg}}{dt} = \sum_s \frac{dA_s^2}{dt}$$

- Определение региональных характеристик переходного процесса в условиях переменной колебательной структуры сводится к простому *пересчету относительных скоростей и моментов для подсистем*, который использует результаты численного интегрирования уравнений движения системы. Последние соотношения можно интерпретировать как способ осмысления скоростных, силовых и энергетических характеристик переходного процесса *на всем его временном протяжении* в контексте структуры, сложившейся к моменту времени t .

Физическая причина нарушения устойчивости

Физической причиной нарушения устойчивости в переходном процессе является недостаточность ресурсов по торможению расходящихся объектов. Применительно к случаю структурно организованного движения это означает, что кинетическая энергия колебаний регионального движения чрезмерно велика и синхронизирующие моменты своей работой не в состоянии *остановить* разбегающиеся подсистемы.

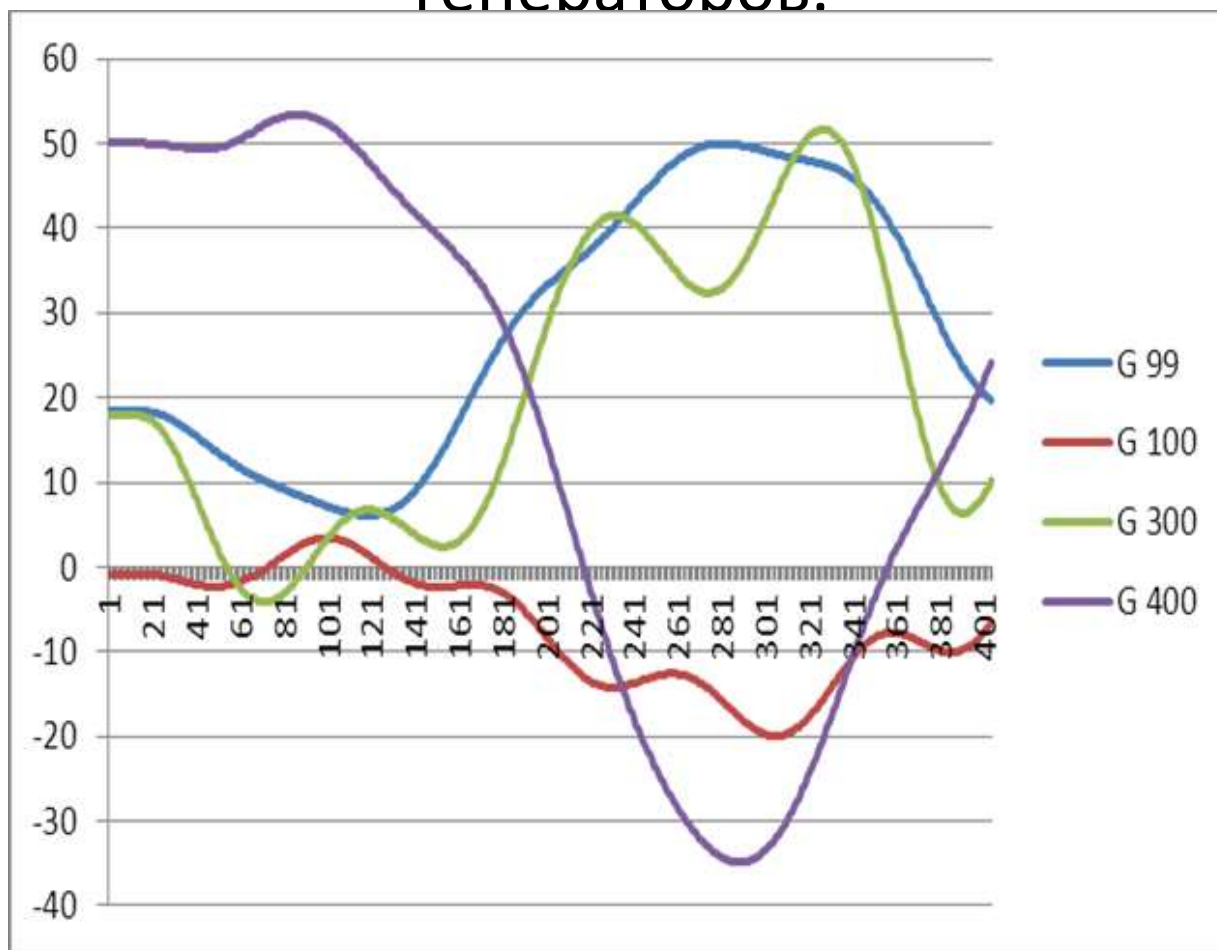
Идентификации неустойчивости на действительной траектории движения системы энергетическим методом.

- Проводится интегрирование уравнений движения системы при рассматриваемых возмущениях.
- Определяется колебательная структура (как функция времени) и её возможные структуры неустойчивости.
- Определяются скорость перемещения центра инерции системы и центров инерции подсистем. Рассчитываются относительные скорости $\Delta\Omega_{10}$, $\Delta\Omega_{20}$ и моменты ΔM_{10} , ΔM_{20} .
- Определяются кинетическая энергия регионального движения подсистем и её производная по времени.
- Анализируется изменения знаков величин $\Delta\Omega_{10}$, $\Delta\Omega_{20}$, ΔM_{10} ,
- ΔM_{20} , $\frac{dK_{\text{рез}}}{dt}$.

- Если на траектории движения в некоторый момент времени *отрицательная* величина $\frac{dK_{\text{рез}}}{dt}$ сменяется на *положительную* при неизменности знаков $\Delta\Omega_{10}, \Delta\Omega_{20}$, то идентифицируется нарушение динамической устойчивости взаимного движения подсистем 1 и 2 в момент исчерпания ресурса по торможению подсистем. Определяется непогашенный избыток кинетической энергии $K_{\text{рез}}$.
- Если $\frac{dK_{\text{рез}}}{dt}$ не принимает отрицательного значения на всем протяжении рассматриваемой траектории, то фиксируется нарушение устойчивости, связанное с отсутствием послеаварийного режима.

Расчетный пример. Сохранение устойчивости при отключении связи без короткого замыкания на ней.

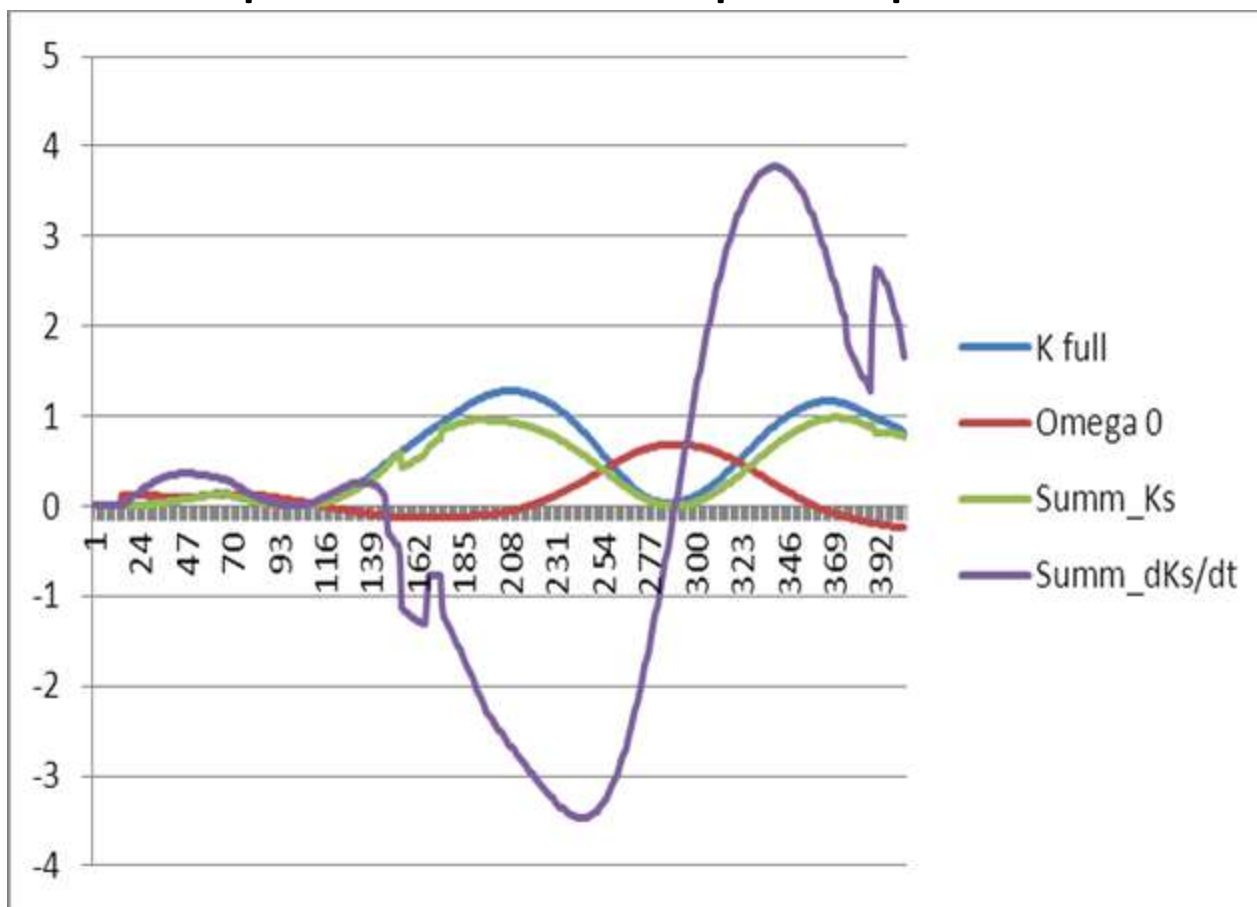
Работает АПНУ послеаварийного режима. Углы генераторов.



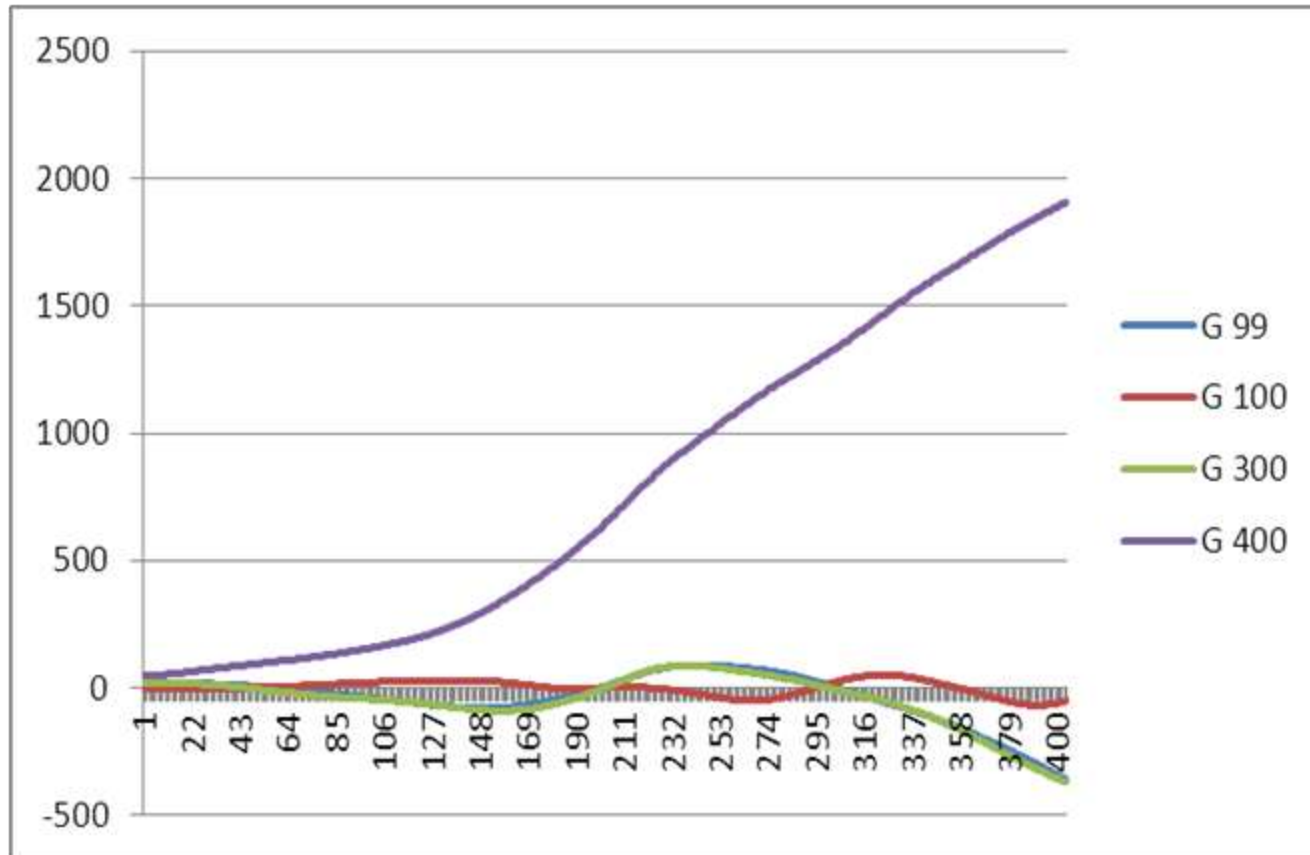
Расчетный пример. Сохранение устойчивости при отключении связи без короткого замыкания на ней.

Работает АПНУ послеаварийного режима.

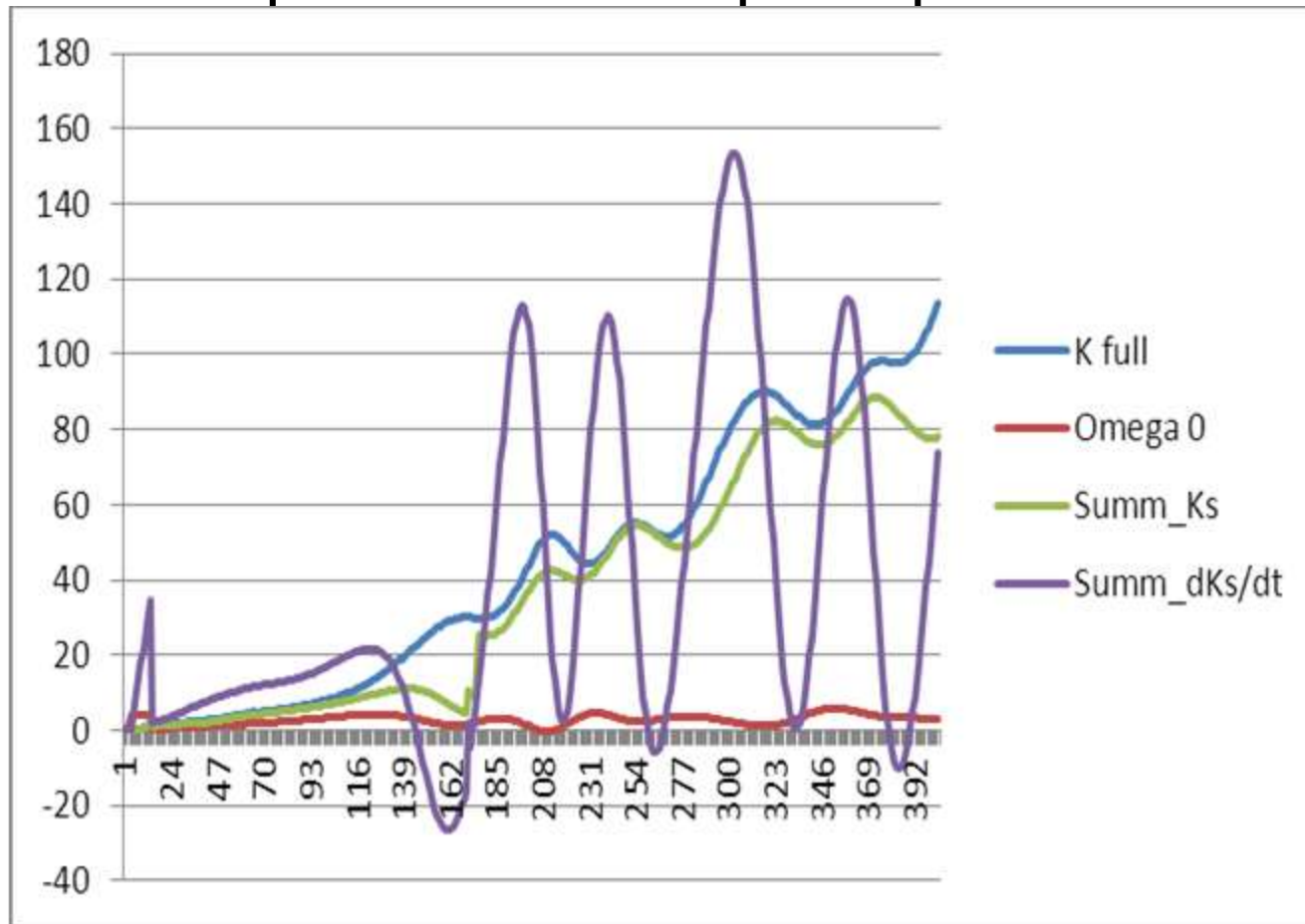
Энергетические характеристики.



Расчетный пример. Нарушение устойчивости при отключении связи после короткого замыкания на ней. Работает та же АПНУ послеаварийного режима. Углы генераторов.



Расчетный пример. Нарушение устойчивости при отключении связи после короткого замыкания на ней. Работает та же АПНУ послеаварийного режима. Энергетические характеристики.



Энергетический метод исследования процессов распада синхронизма системы при возмущениях.

- Идентификацию неустойчивости сложных энергосистем можно проводить качественными методами, основанными на законе сохранения импульса и теореме об изменении кинетической энергии. Примером такого подхода служит энергетический метод, разновидностью которого является метод площадей.
- Возможности применения таких алгоритмов для сложных энергосистем связаны с упрощениями описания колебательных движений в них на основе исследования траекторий структурно организованного движения. При разбиении на подсистемы могут использоваться колебательные структуры двух типов, формируемые возмущающим воздействием.

Энергетический метод исследования процессов распада синхронизма системы при возмущениях.

- Выявление структуры колебаний позволяет анализировать пространственно-временные характеристики взаимопревращений кинетической и потенциальной энергии колебаний системы в переходном процессе, определяющие устойчивость параллельной работы синхронных машин.
- Простая топология колебательной структуры позволяет свести рассмотрение устойчивости ее движения к ряду задач устойчивости для двухмашинных схем, являющихся представлениями возможных структур неустойчивости данной колебательной структуры.

Энергетический метод исследования процессов распада синхронизма системы при возмущениях.

- Выбор структуры неустойчивости из этого ряда, для которой выполняются признаки нарушения устойчивости, позволяет определить сечение асинхронного хода. В случае возбуждения неустойчивости по разным возможным структурам неустойчивости колебательной структуры можно говорить о нарушениях устойчивости по нескольким сечениям, т.е. о многочастотном асинхронном ходе.
- Предложенные алгоритмы оценки применимы для анализа устойчивости на любом цикле качаний. В них используются все понятия классического метода площадей: работы (площади) ускорения и торможения, характеристики мощности в аварийном и послеаварийном режиме.

Спасибо за внимание