

## Выбор схемно-режимных ситуаций для проверки функционирования автоматического регулятора возбуждения

АРЦИШЕВСКИЙ Я.Л., КЛИМОВА Т.Г., СЕРОВ Д.М.

Представлена методика определения схемно-режимных ситуаций, необходимых и достаточных для расчета оптимальных настроек автоматического регулятора возбуждения (АРВ) и проверки функционирования регуляторов при этих настройках. Проверка функционирования АРВ синхронного генератора с выбранной настройкой проводится по результатам оценки длительности и интенсивности переходных процессов режимных параметров при различных возмущениях в различных схемно-режимных ситуациях. Рассматриваются восемь различных схем, в том числе нормальная и ремонтные. Проверка реализуется в реальном времени. Необходимые ситуации определяются при анализе спектрального состава колебаний частоты при внутренних и внешних возмущениях при переборе в исходной схеме различных возможных сочетаний отключаемых и подключаемых линий и нагрузок. Необходимыми режимами и схемами являются ситуации, при которых наблюдаются существенные спектральные составляющие колебаний частоты на различных шинах станции и при внешних и внутренних возмущениях. Режимы с близкими спектральными представлениями целесообразно заменять одним. Достаточно рассмотреть все ситуации, при которых характеристики переходных процессов превышают допустимые значения. Например, должны быть рассмотрены все ситуации, при которых время переходных процессов больше 15 с. Из них выбираются необходимые ситуации.

Ключевые слова: энергосистема, переходные процессы, автоматический регулятор возбуждения, настройка

События в энергосистемах и вызванные ими последующие изменения совокупности физических величин характеризуются интенсивностью электрических и механических переходных процессов.

Проверка функционирования и выбор настройки автоматического регулятора возбуждения (АРВ) синхронного генератора проводится по результатам оценки длительности и интенсивности переходных отклонений совокупности электрических и механических физических величин при различных возмущениях. Для выявления экстремальных, наиболее опасных, отклонений создаются разные возмущения в различных схемно-режимных ситуациях.

При практическом использовании такого подхода к проверке функционирования АРВ оказыва-

ется, что требуемое число опытов для реализации переходных процессов весьма велико, при этом значительная их часть не направлена на выявление экстремального, т.е. наиболее опасного. Проводится обоснование методики сбора и обработки необходимого и достаточного объема информации для проверки функционирования АРВ.

Рассмотрено восемь различных схем, в том числе нормальная и ремонтные. Полный набор рассматриваемых схемно-режимных ситуаций должен гарантированно включать и самую опасную ситуацию. При определении схемно-режимных ситуаций, как правило, отключаются линии, отходящие от станции от шин различного уровня напряжения.

В качестве возмущений используются:

трехфазное короткое замыкание (КЗ), поочередно реализуемое на всех шинах станции, длительностью 0,04 с – внешнее по отношению к генератору с исследуемым АРВ; 5%-й скачок уставки напряжения СГ с подключенным исследуемым АРВ, тестовый сигнал [1] – внутреннее по отношению к данному генератору возмущение; внутреннее возмущение реализуется в генераторе, подключенном к указанным шинам.

На рис. 2 показан спектральный состав колебаний частоты на шинах 500, 220 и 110 кВ станции при внешних и внутренних возмущениях. Видно, что спектральное представление колебаний, вызванных обоими возмущениями, практически оди-

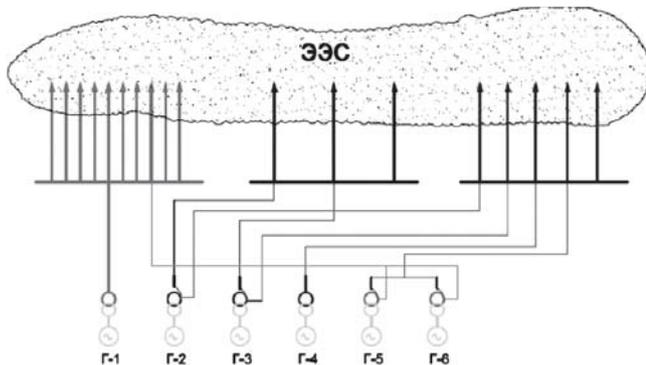
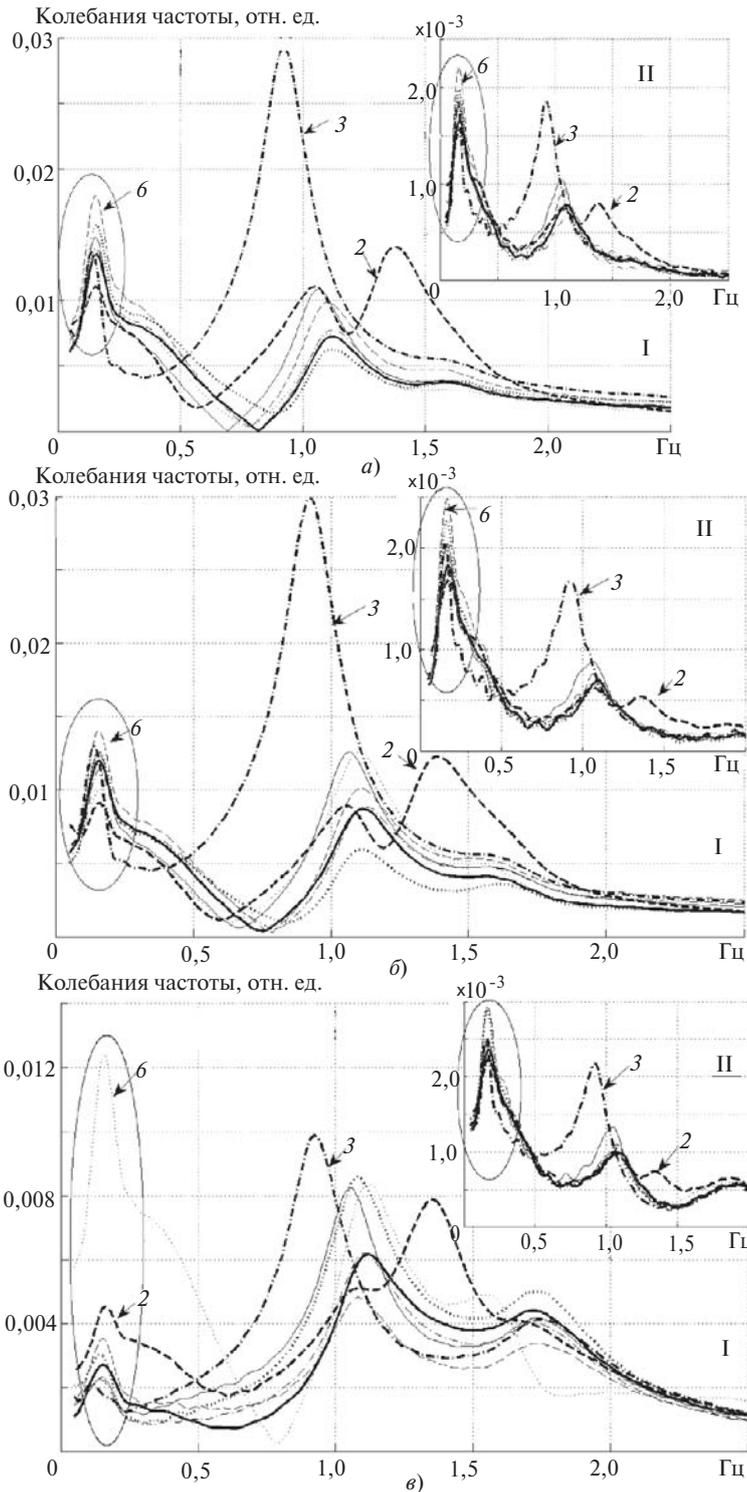


Рис. 1. Исходная схема с определением схемно-режимных ситуаций



**Рис. 2.** Спектральный состав колебаний частоты на шинах станции (*а* – 500 кВ; *б* – 220 кВ; *в* – 110 кВ) при внешних (I) и внутренних (II) возмущениях; сплошная полужирная линия – нормальная схема, остальные – ремонтные

наково на шинах всех уровней напряжений. «Овалом» отмечена область резонансной частоты  $f_1$ , наименьшее из всех значений резонансной частоты практически не меняется при различных точках приложения возмущающих воздействий и отключении различных линий вокруг станции. Значения остальных резонансных частот существенно меня-

ются при изменении подключения линий вокруг станции.

При сравнении действия внешнего и внутреннего возмущений следует отметить совпадение числа резонансных частот и их значений в спектральном представлении откликов на данные возмущения. Проявление особенностей каждой схемы при обоих видах возмущений одинаково во всех схемных ситуациях. Увеличение мощности межзонального низкочастотного колебания (НЧК) при внутреннем возмущении обусловлено реализацией этого возмущения в виде скачка уставки, имеющего спектр, обратно пропорциональный значениям частоты. Более пропорционально отображается соотношение мощностей низкочастотных колебаний при внешнем возмущении, поскольку можно считать, что КЗ длительностью 0,04 с в рассматриваемом диапазоне частот имеет равномерный спектр. Следовательно, для анализа схемно-режимных ситуаций достаточно использовать только внешнее возмущение.

При сравнении спектральных представлений колебаний частоты при различных схемных ситуациях и различных точках приложения внешнего возмущения (рис. 2) можно отметить, что большая часть кривых близка друг другу. Это приводит к тому, что в этих схемно-режимных ситуациях функционирование АРВ будет одинаковым и настройка параметров АРВ в этих ситуациях также будет одинакова.

Спектральное представление не дает полного описания колебательного процесса. Нет информации об амплитуде и фазе процесса. Для полного изображения колебательного процесса необходимо использовать его гипервекторное представление, т.е. представление колебательного процесса на плоскости с двумя системами координат [4], рис. 3.

Колебательный процесс представляется вектором, начало которого определяется значениями действительной и мнимой частей корня характеристического уравнения, длина вектора пропорциональна амплитуде колебания, а наклон к горизонтальной оси характеризует его начальную фазу (рис. 4,б).

На рис. 3,а «овалом» отмечен момент КЗ, при котором наблюдается большая погрешность измерения частоты. Данный диапазон времени не участвует в определении спектрального и гипервекторного представления.

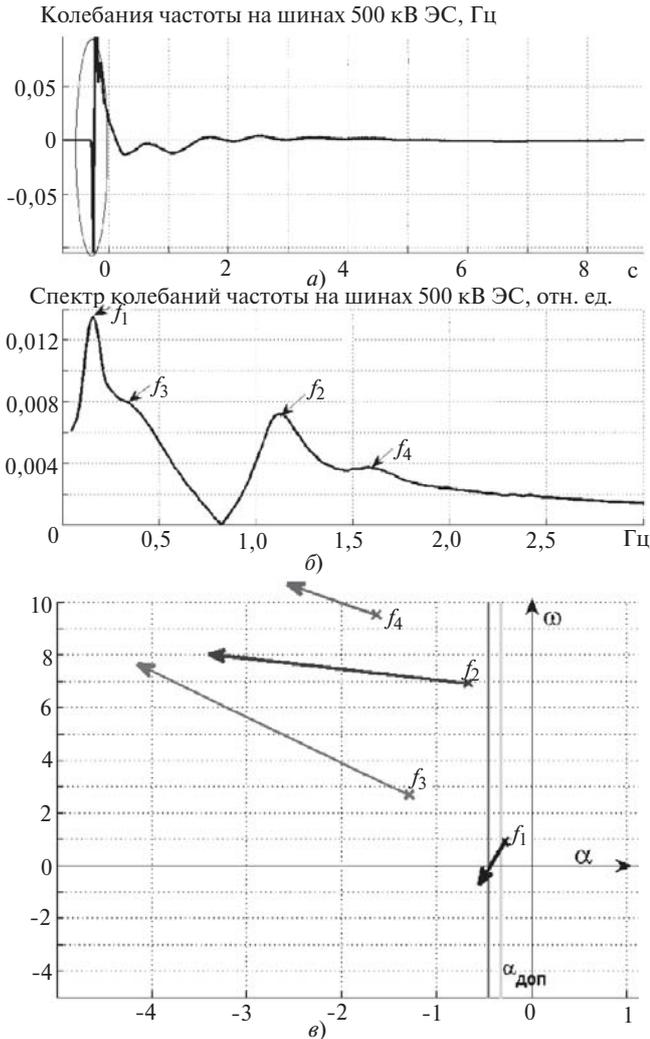


Рис. 3. Колебания частоты на шинах 500 кВ при КЗ на шинах ЭС (а) и их спектральное (б) и гипервекторное (в) представление

В спектральном представлении выделяются колебания четырех резонансных частот (рис. 3,а, б); им соответствуют четыре вектора (рис. 3,в). Чем дальше от вертикальной оси  $\omega$  в отрицательной области значений  $\alpha$  начинаются эти векторы, тем быстрее процессы и тем меньше влияния оказывают соответствующие колебания на результирующее качество переходного процесса. Колебания

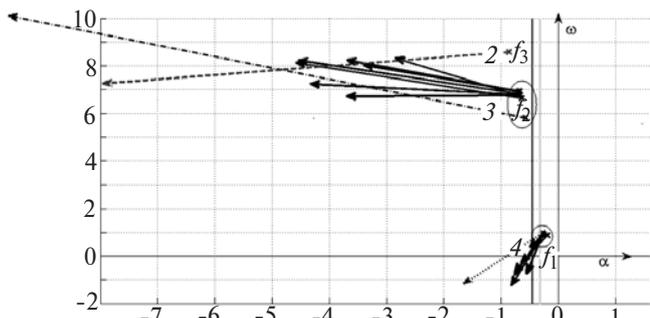


Рис. 4. Гипервекторное представление доминирующих колебаний при различных схемно-режимных ситуациях

начинающиеся максимально близко у вертикальной оси  $\omega$  в отрицательной области значений  $\alpha$ , являются доминирующими, определяющими итоговую оценку поведения системы. Поэтому целесообразно сопоставить поведение доминирующих колебаний с частотой  $f_1$  и  $f_2$  (рис. 3,б, в) при различных схемно-режимных ситуациях (рис. 4).

При сравнении векторов доминирующих колебаний видно, что при колебании с резонансной частотой  $f_1$  выделяется колебание, относящееся к ситуации 4. На частоте  $f_2$  выделяется колебание, относящееся к ситуации 3, к тому же появляется доминирующее колебание с частотой  $f_3$ , относящееся к ситуации 2. Аналогичные утяжеленные ситуации проявляются и при анализе спектральных представлений сигналов на рис. 2. В остальных ситуациях колебания близки между собой, и для проверки целесообразно выбрать одну ситуацию, например, соответствующую нормальному режиму работы. Поскольку утяжеленные ситуации наравне с нормальным режимом 1 обязательны для проверки при анализе функционирования исследуемого АРВ в целом, необходимо рассмотреть три из восьми схемно-режимных ситуаций.

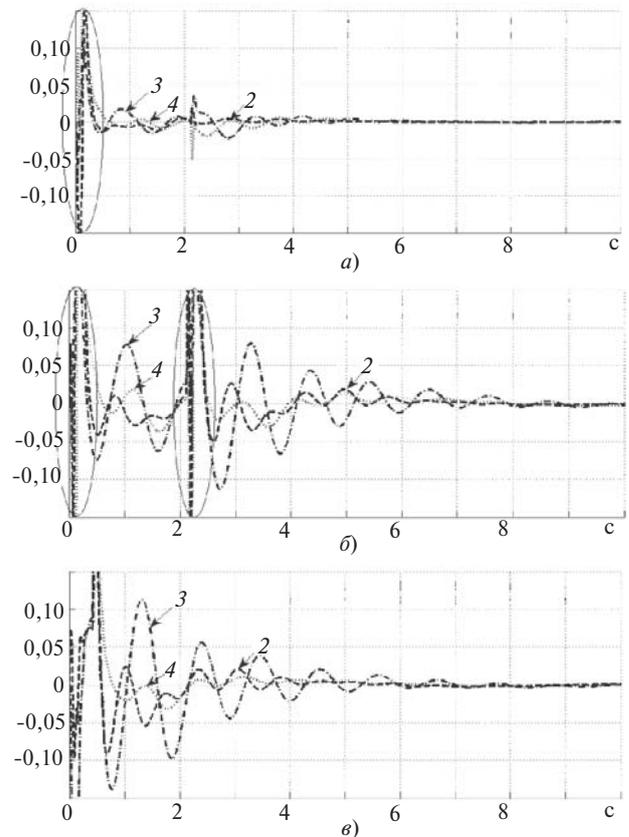


Рис. 5. Осциллограммы при отключении ВЛ 500 кВ при КЗ вблизи ЭС: а – основными защитами при однофазном КЗ с успешным ОАПВ; б – основными защитами при двухфазном КЗ на землю с неуспешным ТАПВ; в – действием УРОВ при однофазном КЗ с отказом выключателя («овалом» выделены моменты КЗ, при которых возникает большая погрешность измерений частоты)

Для иллюстрации связи утяжеленных ситуаций спектрального и гипервекторного представления с видом переходных процессов выбраны наиболее распространенные ситуации работы автоматики на линиях 500 кВ: успешное ОАПВ, неуспешное ТАПВ и действие УРОВ.

Во всех случаях (рис. 5,а–в) переходный процесс, соответствующий КЗ у шин ЭС с отключением линии в режиме 3, имеет наибольшие амплитуду и длительность.

**Выводы.** 1. Наглядное выявление утяжеленных схемно-режимных ситуаций можно получить с помощью спектрального и гипервекторного представления откликов на тестовые возмущения.

2. Необходимые ситуации определяются спектральным составом колебаний частоты при внутренних и внешних возмущениях перебором в исходной схеме различных возможных сочетаний отключаемых и подключаемых линий и нагрузок. Необходимыми режимами и схемами являются ситуации, при которых наблюдаются существенные спектральные составляющие колебаний частоты на различных шинах станции и при внешних и внутренних возмущениях. Режимы с близкими спектральными (или гипервекторными) представлениями целесообразно заменять одним.

3. Достаточные ситуации определяются допустимыми значениями параметров переходных процессов. Должны быть рассмотрены все ситуации, при которых время переходных процессов больше 15 с [1].

4. Для определения требуемых необходимых ситуаций достаточно использовать внешнее возмущение.

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 5, pp. 4–8.*

5. Гипервекторное представление позволяет найти наиболее медленно затухающую компоненту и именно по ней определять общую длительность переходных процессов, которая не должна быть больше 15 с [1].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СТО 59012820.29.160.20.001–2012.** Стандарт организации ОАО «СО ЕЭС». Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов. Утвержд. 03.04.2012.

2. **Методические** указания по устойчивости энергосистем. Приказ Минэнерго России от 30.06.2003 № 277.

3. **Литкенс И.В., Пуго В.И.** Колебательные свойства электрических систем.—М.: Энергоатомиздат, 1988, 216 с.

4. **Арцишевский Я.Л., Климова Т.Г., Распеляев А.И.** Представление переходных процессов электроэнергетических систем на гиперплоскости с двумя системами координат. — Электричество, 2011, № 4, с. 37–42.

[01.07.15]

*А в т о р ы:* **Арцишевский Ян Леонардович** окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ — ныне Национальный исследовательский университет «МЭИ» — НИУ «МЭИ») в 1969 г. В 1976 г. защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию по применению дискретных сигналов в векторных измерениях в РЗиА. Доцент кафедры РЗиАЭС НИУ «МЭИ».

**Климова Татьяна Георгиевна** окончила радиотехнический факультет МЭИ в 1973 г. В 1981 г. защитила в МЭИ кандидатскую диссертацию «Фазовая синхронизация пространственно разнесенных автогенераторов». Доцент кафедры РЗиАЭС НИУ «МЭИ».

**Серов Дмитрий Михайлович** окончил МЭИ в 2013 г. Ассистент кафедры РЗиАЭС НИУ «МЭИ».

## Choice of Necessary and Sufficient Circuit and Regime Situations for Check of Functioning of AEC

**ARTSISHEVSKII Yan Leonardovich** (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»), Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**KLIMOVA Tat'yana Georgiyevna** (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**SEROV Dmitrii Mikhailovich** (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Research Staff

*The technique of definition of the circuit and regime situations necessary and optimum settings of the automatic excitation controller (AEC) and check of functioning of regulators, sufficient for calculation, at these settings is presented in article. Check of functioning of AEC of the synchronous generator with the chosen control is made by results of an assessment of duration and intensity of transition processes of regime parameters at various indignations in various circuit and regime situations; 8 various schemes, including normal and repair, are considered. Check is realized in real time. Necessary situations are defined in the analysis of spectral structure of fluctuations of frequency at internal and external indignations at search in the initial scheme of various possible combinations of the disconnected and connected lines and loadings. The necessary modes and schemes are situations at which essential spectral components of fluctuations of frequency on various tires of station are observed and at external and internal indignations. It is expedient to replace the modes with close spectral representations with one. It is enough*

*to consider all situations at which characteristics of transition processes exceed admissible values. For example, all situations at which time of transition processes is more than 15 s have to be considered. Necessary situations get out of them.*

**К е у w o r d s:** *power system, transients, automatic excitation regulator, adjustment*

---

REFERENCES

1. **STO 59012820.29.160.20.01–2012.** Standart organizatsii OAO «SO EES». Trebovaniya k sistemam vzbuzhdeniya i avtomaticheskim regulyatoram vzbuzhdeniya sil'nogo deistviya sinkhronnykh generatorov Utverzh. 03.04.2013. (Standard institution JSC «System Operator of the Unified Energy System»). «Requirement for excitation systems and automatic controllers excitation of strong action synchronous generators». Approved 04.04.2012.
2. **Metodicheskiye ukazaniya po ustoychivosti energosistem.** Prikaz Minenergo Rossiiot 30.06.2003 No. 277 (Guidelines for stability of power systems. Order of the Ministry of Energy of Russia No. 277).
3. **Litkens I.V. and Pugo V.I.** *Lolebatel'nye svoistva elektricheskikh system* (Vibrational properties of electrical systems). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1988, 216 p.
4. **Artsishevskii Ya.L., Klimova T.G., Rassheplyayev A.I.** *Electrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2011, No. 4, pp. –42.