

\* \* \*

## Мониторинг низкочастотных колебаний в электроэнергетических системах

ЖУКОВ А.В., КЛИМОВА Т.Г., РАСЩЕПЛЯЕВ А.И.

*Анализ фазовых углов напряжений электрических станций (ЭС), расположенных в различных сколь угодно удаленных друг от друга точках, позволяет определить группы синхронно работающих генераторов или синхронных групп (СГ), оценить параметры абсолютного, относительного и взаимного движения (скольжения) СГ и отдельных ЭС при квазистационарных и переходных процессах в электроэнергетических системах.*

**Ключевые слова:** электрическая станция, фазовый угол, относительное движение, оценка параметров

Система мониторинга переходных режимов (СМНР), (англ. Wide Area Monitoring System — WAMS) позволяет регистрировать измерения, содержащие информацию, необходимую для анализа электрических режимов и процессов, происходящих в энергосистеме при различных возмущениях и технологических нарушениях в работе энергосистемы, и выявлять причины их возникновения [1]. Данные, регистрируемые измерения, относятся к классу временных рядов.

*By analyzing the phase angles between the voltages of power stations situated at different points located at any electrical distance from each other it is possible to determine the groups of synchronously operating generators (or synchronous groups), to estimate the parameters of absolute, relative, and mutual motion (slipping) of synchronous groups and individual power stations in quasi steady-state modes and during transients in electric power systems.*

**Key words:** power station, phase angle, relative motion, estimation of parameters

Анализ временных рядов предполагает, что измерения содержат систематическую (регулярную) составляющую (обычно включающую несколько компонент разного типа) и случайный шум (ошибку), который затрудняет обнаружение регулярных компонент.

Большинство регулярных компонент временных рядов принадлежит к двум классам: к тренду или периодическим составляющим. Тренд (долговременная тенденция изменения исследуемого вре-

менного ряда) представляет собой общую систематическую линейную или нелинейную компоненту, изменяющуюся во времени. Периодические составляющие — это повторяющиеся компоненты. Оба эти вида регулярных компонент часто присутствуют в ряде одновременно.

**Анализ тренда.** Вид тренда определяется при предварительном визуальном рассмотрении временных рядов. Многие монотонные временные ряды хорошо описываются линейной функцией.

**Анализ периодичности.** Периодические составляющие временного ряда анализируются методами спектрального анализа, использующими понятия спектральной плотности сигнала. Сигнал  $x(t)$  и его спектральная плотность  $X(j\omega)$  взаимно однозначно связаны прямым и обратным преобразованием Фурье. Энергетический спектр сигнала определяется как квадрат модуля спектральной плотности  $|X(j\omega)|^2$ . Для конечных выборок временных сигналов  $x(n)$ ,  $n = 0, \dots, N-1$  формула

$$X(j\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\omega n}$$

представляет собой оценку спектральной плотности, на основе которой вычисляется оценка энергетического спектра исследуемого процесса:

$$\tilde{S}_{\text{ЭС}}(\bar{\omega}) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-in\bar{\omega}} \right|^2, \quad -\rho \leq \bar{\omega} \leq \rho, \quad (1)$$

где  $\bar{\omega} = \omega T$  — безразмерная круговая частота;  $T$  — интервал дискретизации [3].

Интеграл от энергетического спектра определяет энергию анализируемой части временного ряда или усредненную мощность (при делении на длину окна обработки  $N$ ).

Оценка автокорреляционной функции (АКФ) конечного временного ряда  $K_x(m)$  вычисляется по формуле:

$$K_x(m) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-m-1} x[n+m] x^*[n], & 0 \leq m \leq N-1; \\ \sum_{n=-1}^{N-|m|-1} x^*[n+|m|] x[n], & -(N-1) \leq m \leq N-1. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $*$  — комплексное сопряжение.

При  $m=0$  по АКФ можно дать оценку энергии анализируемой части временного ряда.

По аналогичным соотношениям определяется и взаимная корреляционная функция (ВКФ) двух выборок данных, относящихся к взаимодействующим объектам. Использование ВКФ позволяет определить влияние взаимодействующих объектов друг на друга.

Далее исследуется поведение ряда электрических станций при использовании значений фазовых углов напряжения, измеренных устройствами СМПП относительно сигналов точного времени GPS. Измерения фазовых углов представляют собой конечные выборки временных рядов.

В примере анализируемых данных (рис. 1) приведены реальные характеристики изменения фазовых углов векторов напряжения, полученные СМПП в девяти узлах ЭЭС относительно фазы опорного сигнала GPS. Производные фазовых углов представляют собой абсолютное скольжение, т.е. отклонение частоты ЭС от синхронной. Изменения электроэнергетического режима в некоторой точке определяют изменения фазы (а следовательно, и скольжения) всех объектов обратно пропорционально электрическому расстоянию между объектами и точкой возмущения. Анализ взаимного скольжения позволит выделить группы генераторов, отделившихся от ЭЭС.

Представляет интерес исследование абсолютно, относительно и взаимного движения как в квазистационарном режиме (малые возмущения), так и при переходных процессах (при больших возмущениях).

**Анализ квазистационарного режима.** Для иллюстрации анализа выбран набор значений абсолютных скольжений, полученных при дифференцировании фазовых углов векторов напряжений в некоторых узлах ЭЭС (рис. 2). Для удобства визуального анализа все значения абсолютных скольжений смещены относительно друг друга на 0,01 Гц по вертикали (рис. 2,а). Нижняя выборка расположена без смещения.

Визуальный анализ характеристик показывает следующее.

Все зависимости имеют тренд одного направления, что характеризует синхронность работы рассматриваемой группы генераторов [2].

Колебательные составляющие всех зависимостей разные, эти составляющие в основном определяются работой каждой ЭС.

Отмечается большое различие уровня высокочастотных составляющих между отдельными выборками (что может определяться погрешностью измерения, использованием разнотипных измерителей, флуктуациями нагрузки). Различный уровень высокочастотного шума внутри одного временного ряда, возможно, определяется флуктуациями нагрузки.

Количественная оценка периодической составляющей временного ряда, представляющего абсолютное скольжение частот в узлах ЭЭС, определяется мощностью этой низкочастотной составляющей

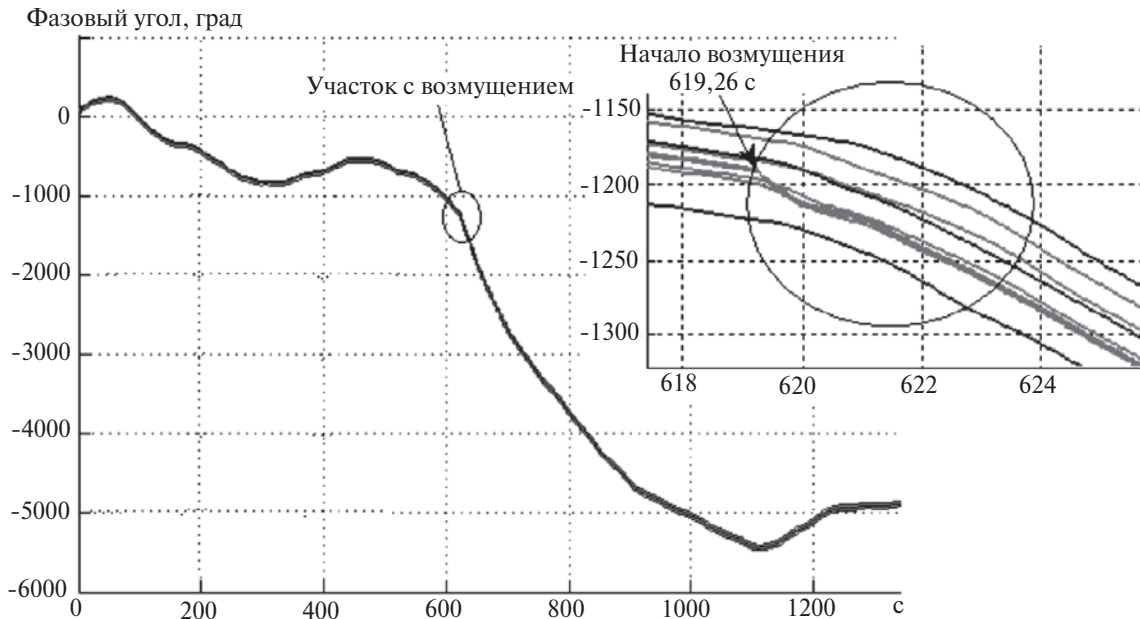


Рис. 1. Пример зависимости фазовых углов векторов напряжения в различных узлах ЭЭС

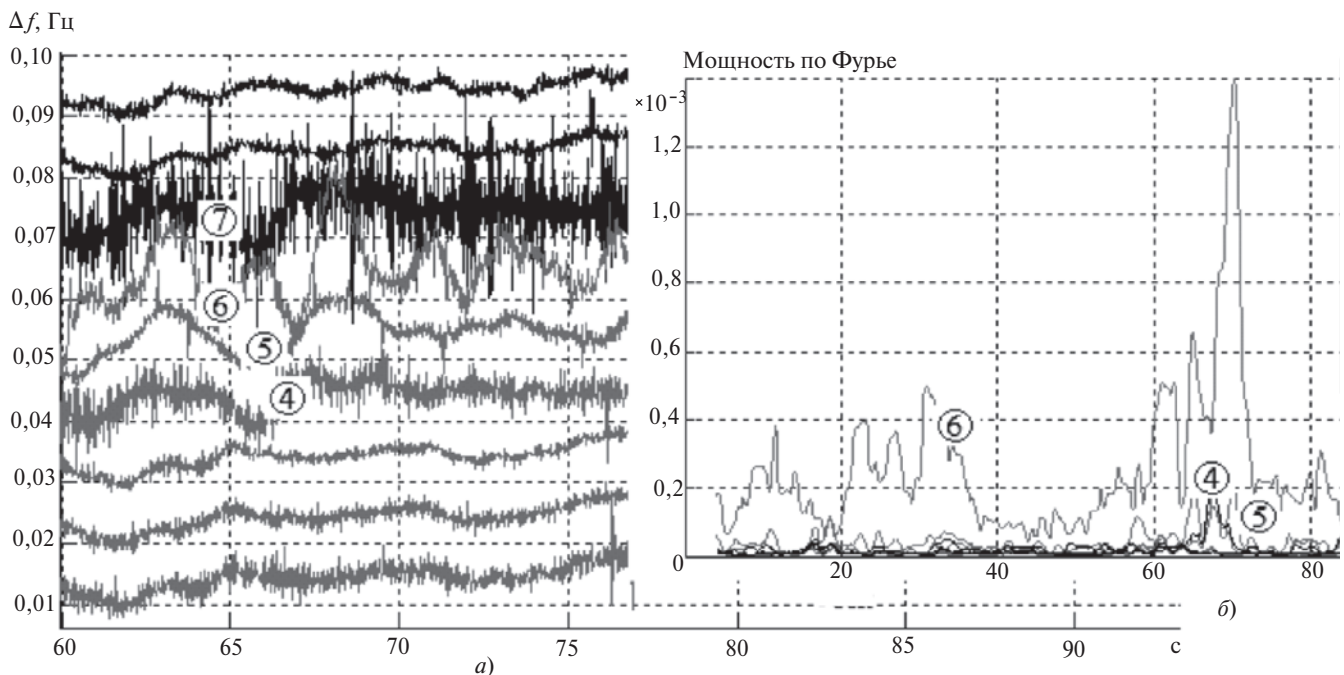


Рис. 2. Анализ квазистационарного режима (цифрами отмечены ЭС с наиболее нестабильным скольжением)

шей временного ряда (рис. 2,б). Визуально видно, что в некоторых выборках колебательная составляющая весьма значительна (кривые 4–7 рис. 2,а). Это проявляется и в кривых мощности (рис. 2,б). Наибольшую мощность колебательной составляющей имеет процесс 6 (ЭС6).

Расчет мощности в частотной области (использование спектральной плотности) и во временной области (использование АКФ) [3] дает идентичные результаты. Расчет АКФ требует меньше вычислительных ресурсов. При сравнении рассчитанной мощности колебательной составляющей квазиста-

ционарного процесса абсолютного скольжения с заданным порогом определяются объекты с недопустимыми колебаниями частоты.

Низкочастотный спектр любого процесса в рассматриваемых данных имеет переменный во времени состав спектральных составляющих разной мощности. Это хорошо видно на волновом спектре, построенном с помощью вейвлета Морле для набора данных по ЭС6 (6 на рис. 2).

На рис. 3 представлена действительная часть комплексного спектра Морле. На спектре проведены линии, соединяющие экстремумы частот-

ных составляющих в диапазоне 0,04, 1 Гц (рис. 3,б).

Частота ниже 0,2 Гц определяется нагрузкой [2]. Более высокая частота характеризует состояние ЭС, на которой установлена СМНР, и влияние других ЭС. Собственная частота ЭС (частота максимальной мощности) в течение времени наблюдения (100 с) флуктуирует в некотором диапазоне. Параметры частотных составляющих, расположенных выше двухсторонней стрелки (рис. 3,б), могут быть определены при использовании окна наблюдения, равного 4 с и менее.

При суммировании всех значений квадрата модуля волнового спектра вдоль временной оси (горизонтальной оси рис. 3,б) формируется скейлограмма (рис. 3,а), характеризующая среднюю мощность спектральных составляющих за время наблюдения. Из рис. 3,а видно, что средняя собственная частота колебания абсолютного скольжения ЭСб близка 0,4 Гц.

Анализ спектрального состава в заданном диапазоне частот временного ряда при использовании длительности временного ряда (скользящего окна наблюдения) 4 с показывает, что низкочастотную составляющую целесообразно аппроксимировать суммой двух синусоидальных составляющих (рис. 4,а).

Результаты оценки параметров колебательной составляющей, аппроксимированной суммой двух синусоидальных колебаний, при использовании окна обработки 4 с показаны сплошной линией на рис. 4,б. Восстановленная по полученным оценкам колебательная составляющая в сумме с трендом совмещается с анализируемым временным рядом. В результате наблюдается достаточно точное повторение колебательного изменения временного ряда.

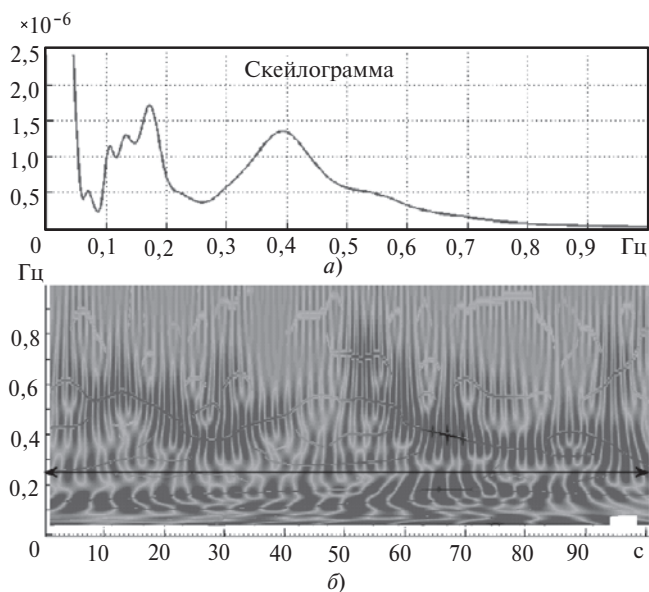


Рис. 3. Анализ спектрального состава абсолютного скольжения ЭСб

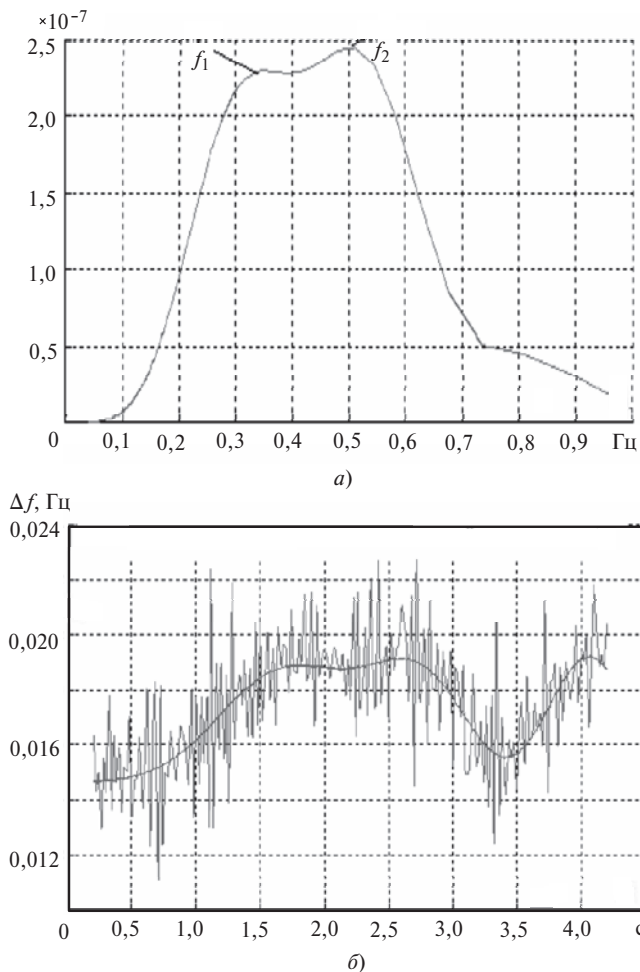


Рис. 4. Спектральная плотность мощности временного ряда б (а) и оценка параметров колебательной составляющей (б)

Таким образом, методы спектрального анализа позволяют оценить параметры квазистационарного режима: его спектральный состав, математическое ожидание и дисперсию высокочастотных флуктуационных составляющих, и проводить постоянный мониторинг низкочастотных колебаний.

**Анализ процессов при больших возмущениях.** В примере анализируемых данных (рис. 1) после дифференцирования проявляются существенные скачки абсолютного скольжения, вызванные отключением блока на станции ЭС1. На рис. 5 показана реакция абсолютного скольжения всех объектов на заданное большое возмущение.

На рис. 5 видно однонаправленное изменение абсолютного скольжения всех объектов (изменение тренда одного знака), при сильно различающихся колебательных составляющих скольжения объектов. Три ЭС имеют достаточно существенное отклонение частоты от средней частоты остальной инерционной (синхронной) группы объектов. В дальнейшем под синхронной группой (СГ) понимается группа ЭС, одинаково реагирующих на возмущения.

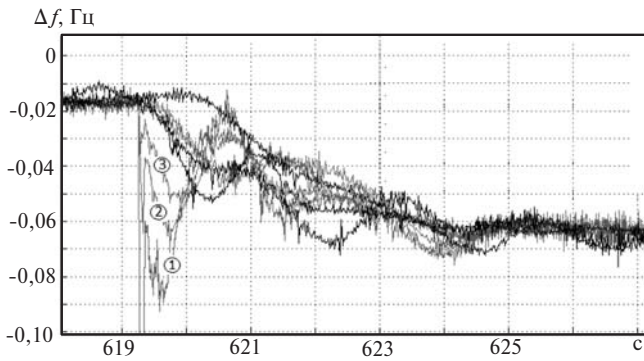


Рис. 5. Изменение абсолютного скольжения исследуемых объектов при большом возмущении (цифрами отмечены вариации скольжения наиболее возмущенных ЭС)

По скорости изменения скольжения вычисляются компоненты основной инерционной группы СГ1 и определяется состав кратковременной синхронной группы СГ2 возмущенных объектов ЭС1–ЭС3.

На рис. 6 показан еще один способ определения момента возмущения и состава синхронных групп при использовании автокорреляционной и взаимных корреляционных функций всех измерений.

Значение АКФ в нулевой момент времени определяет энергию процесса. Энергия колебательной составляющей абсолютного скольжения резко увеличивается в момент возмущения (рис. 6), это проявляется в АКФ(0) (кривая 1, рис. 6). АКФ(0) данных ЭС1 (блок № 4) совпадает численно с ВКФ(0) данных с блоков № 3 и № 4. Отключение блока на станции ЭС1, естественно, дает одинаковые изменения фазы в двух измерителях СМНР, поставленных на объектах этой станции. На рис. 6 показаны

значения ВКФ(0) данных блока № 4 (наиболее возмущенного объекта) и остальных данных при скользящем окне обработки данных. Видно четкое разделение всех объектов на две группы по однотипности поведения. Выделяются три возмущенных объекта (кривые 1–3) СГ2 и остальные мало изменившие поведение объекты СГ1.

Абсолютное движение (фазовые углы) инерционной группы СГ1 и ЭС, входящих в группу СГ2, с момента возникновения возмущения и относительные движение и скольжение ЭС группы СГ2 относительно группы СГ1 показаны на рис. 7.

На рис. 7,а показано абсолютное движение всех ЭС к новым фазовым значениям, определяемым новыми значениями перетоков мощности. По окончании переходного процесса (примерно 2,5 с) при новом установившемся процессе фазовые линии практически параллельны. Максимальное установившееся отклонение относительного фазового угла достигает - 17° (рис. 7,б).

Любой переходный процесс состоит из вынужденного и свободного движения. В данном случае вынужденное движение определяется возмущающим воздействием и характеризует новые фазовые соотношения, соответствующие новым перетокам. Свободное движение определяет, каким образом происходит переход из одного состояния в другое, т.е. вид переходного процесса.

Текущее перераспределение перетоков мощности вызывает медленное изменение взаимного расположения линий фазы. Внезапное возмущение вызывает резкое изменение фазы нескольких ЭС, расположенных вблизи источника возмущения.

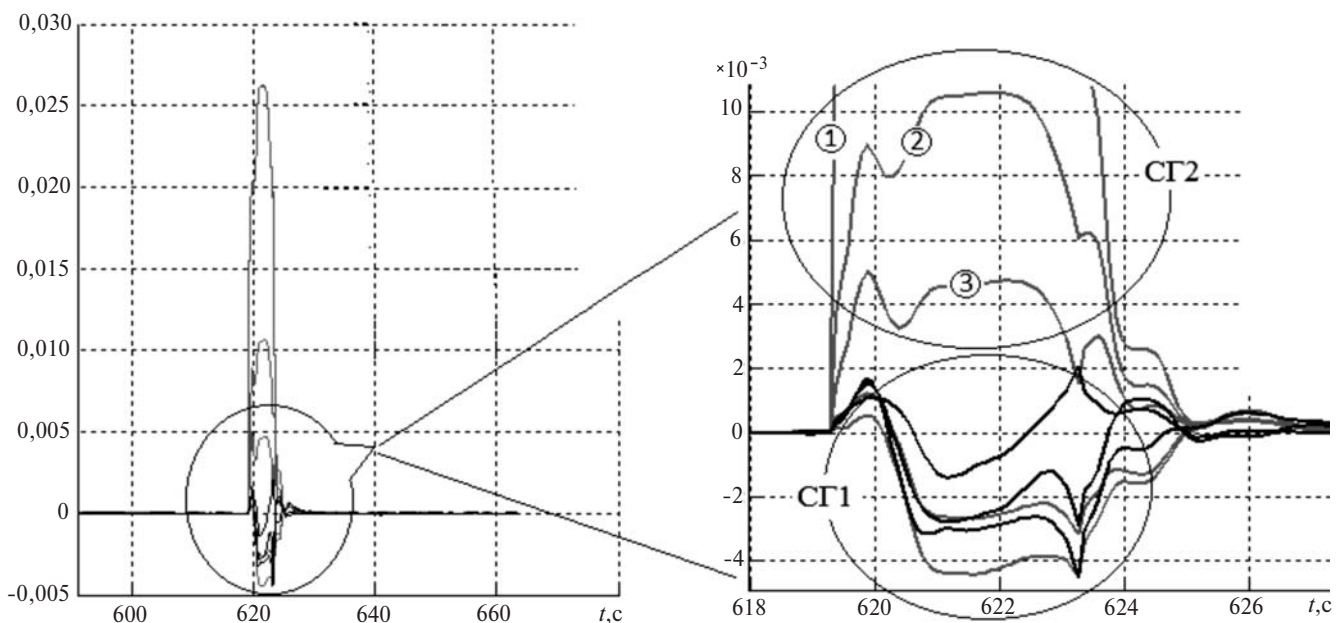


Рис. 6. Использование АКФ(0) и ВКФ(0) для определения момента возмущения и состава синхронных групп (цифрами отмечены корреляционные функции наиболее возмущенных ЭС)

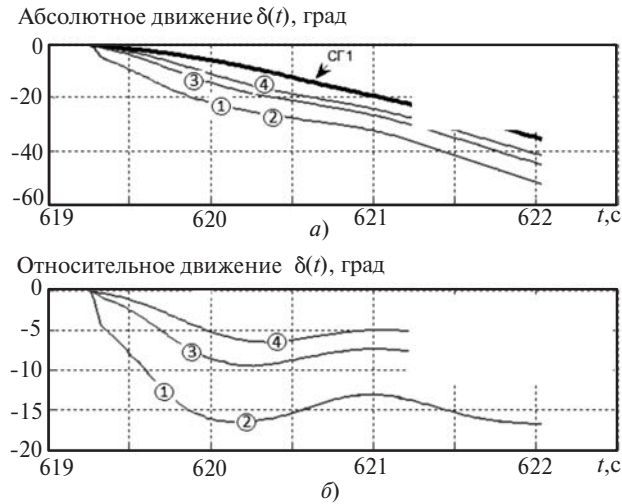


Рис. 7. Движение составляющих кратковременной синхронной группы СГ2: 1 – ЭС1 (блок № 4); 2 – ЭС1 (блок № 3); 3 – ЭС2; 4 – ЭС3

Как уже отмечалось, изменение фазовых углов хорошо отслеживается при использовании производных этих процессов, абсолютного скольжения, т.е. отклонение частоты в данной точке относительно синхронной частоты. Автоматически определяется момент возмущения и группа возмущенных объектов. Параметры переходных процессов определяются и уточняются с накоплением данных, при использовании расширяющегося окна обработки до оптимального значения и его дальнейшем скольжении по набору данных.

Многомашинная автоматически регулируемая система является системой, в которой существуют сложные переходные процессы, определяемые сочетанием отдельных аperiодических или колебательных составляющих (затухающих, если система статически устойчива) [4]. Для определения качества переходных процессов в таких системах необходимо решать десятки алгебраических и дифференциальных уравнений, коэффициенты которых зависят от состояния всех ЭС в каждый момент времени. Анализ данных СМНР позволяет оценить качество переходного процесса и определить свойства электрической системы по параметрам форм колебаний в переходном процессе, возникающем в начале возмущения. Колебательная часть данного процесса достаточно точно представляется либо одной затухающей синусоидальной составляющей, либо суммой двух затухающих синусоидальных составляющих.

Для исследуемых процессов (в данном случае для взаимного движения ЭС1 и ЭС2, ЭС3) энергетический спектр определяется с помощью быстрого преобразования Фурье. На рис. 8 видны две колебательные составляющие. Использование окна наблюдения, равного 3 с, позволяет обеспечить

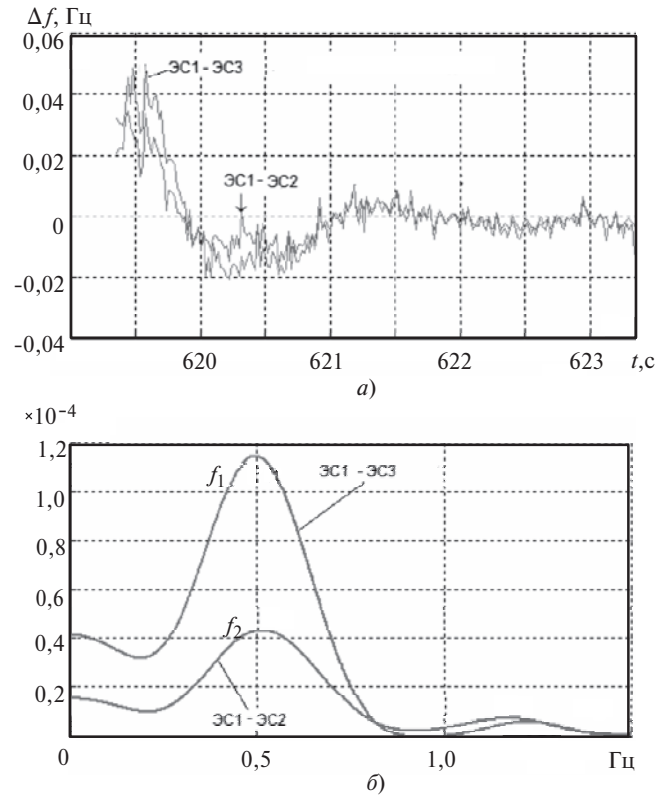


Рис. 8. Оценка частотного состава переходного процесса взаимного скольжения

разрешающую способность 1/3 Гц. Во взаимном движении ЭС1 и ЭС2 две колебательные составляющие более близки по мощности, чем в другой паре объектов ЭС1 и ЭС3, частота в обоих случаях близка по значению.

Оценка параметров взаимного фазового движения и взаимного скольжения проводится при использовании двух моделей переходного процесса. Далее рассматривается худший случай соотноше-

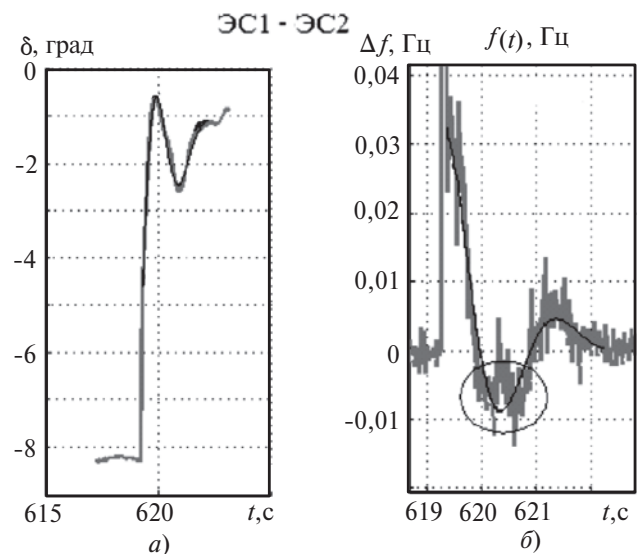


Рис. 9. Оценка параметров взаимного скольжения при двух аппроксимациях колебательного процесса

ния мощности двух колебательных составляющих, оцениваются параметры взаимного движения ЭС1 и ЭС2.

В первую модель переходного процесса включается одно синусоидальное затухающее колебание с частотой  $f_1$ . Вторая модель содержит два синусоидальных затухающих колебания. В обоих случаях восстановленные переходные процессы показаны на рис. 9; процессы практически неразличимы. Влияние высокочастотной составляющей с частотой  $f_2$  заметно лишь в области, выделенной окружностью. Оценки параметров колебательной составляющей с частотой  $f_1$ , получаемые при использовании одномерной модели, представляют усредненную оценку двух колебательных процессов с учетом мощности каждой составляющей и приближаются к оценкам параметров колебательного сигнала с частотой  $f_1$  двухчастотного переходного процесса.

Процесс оценки параметров целесообразно проводить в течение всего переходного процесса, поскольку параметры объектов нестационарны. Длительность затухающего переходного процесса может оцениваться следующими тремя способами.

По значениям относительного скольжения каждого возмущенного объекта определяется время, в течение которого измеряемый процесс затухает до значения, сравнимого со среднеквадратическим отклонением (по данным исследования квазистационарного режима).

По оценке постоянной времени затухания колебания относительного (абсолютного или взаимного) скольжения каждого возмущенного объекта вычисляется оценка длительности данного процесса, длительность переходного процесса приблизительно равна трем постоянным времени затухающего колебания.

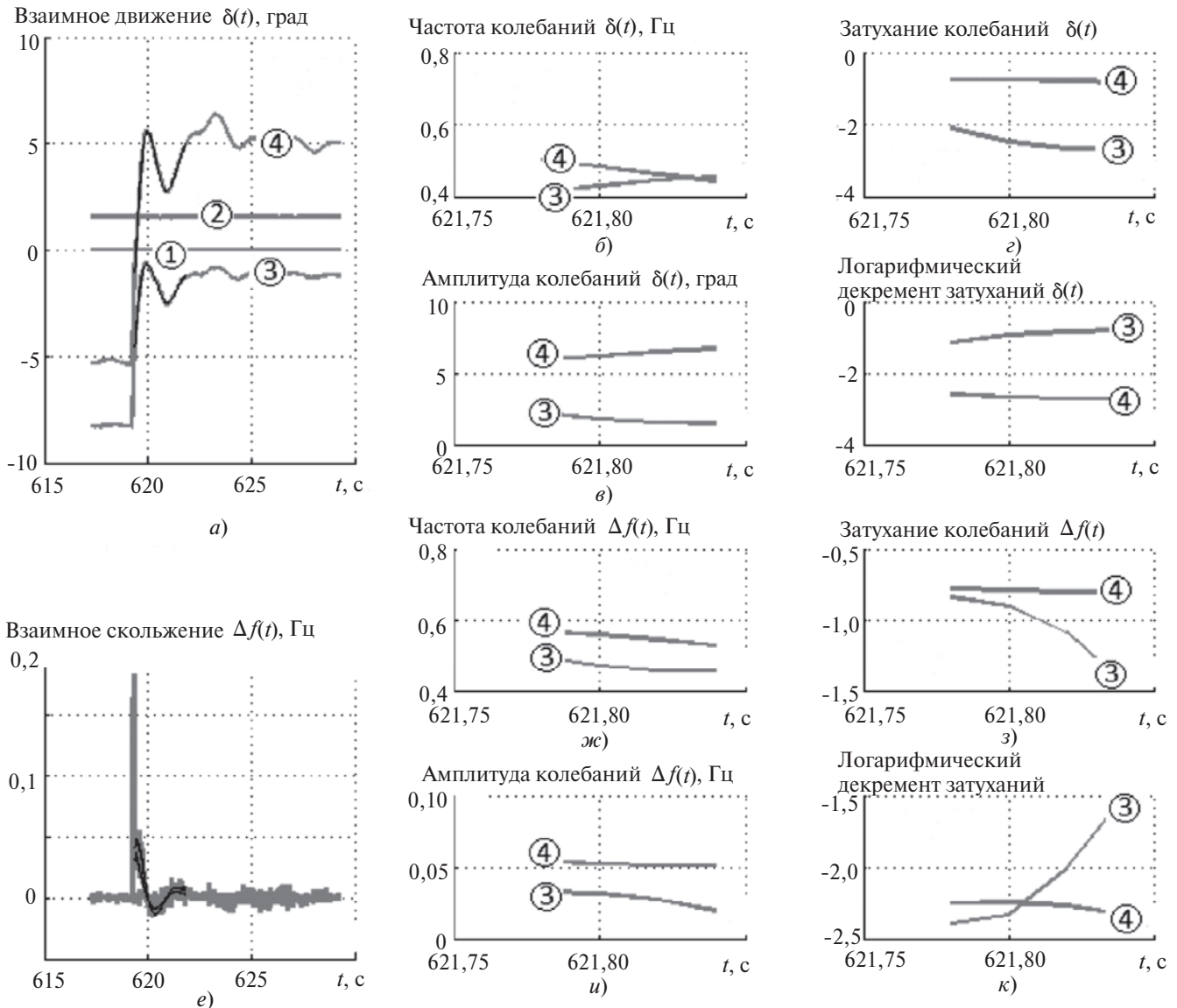


Рис. 10. Оценка параметров взаимного движения объектов 2, 3 и 4 относительно объекта 1

По сравнению скорости изменения абсолютно-го скольжения (ускорения) с некоторым заданным порогом, зависящим от среднеквадратического отклонения скольжения.

Пример определения параметров колебательных составляющих переходного процесса взаимного движения ЭС, имеющих однотипное движение при данном возмущении, относительно максимально возмущенного объекта при использовании одночастотной модели переходного процесса представлен на рис. 10. Определяются параметры переходного процесса, вызванного отключением блока (рис. 10,а, горизонтальная линия, совпадающая с осью абсцисс, описывает движение объекта относительно самого себя). Измерения СМПП на объектах 1 и 2 практически совпадают, поскольку находятся на одной ЭС. Оценивались параметры взаимного движения  $d(t)$  и взаимного скольжения  $Df(t)$ , представленные затухающими синусоидальными сигналами. Затухающий синусоидальный сигнал характеризуется: амплитудой (рис. 10,в,  $u$ ), частотой (рис. 10,б,  $ж$ ), постоянной затухания (рис. 10,г,  $з$ ). Обобщенной характеристикой затухающего синусоидального сигнала является логарифмический декремент затухания, который показывает, во сколько раз уменьшится амплитуда колебаний за один период  $T$  [4] (рис. 10,д,  $к$ ).

Оценки проводились расширяющимся до некоторого оптимального значения окном, они дают наиболее стабильный результат оценивания вследствие получения усредненных значений с накоплением все большего числа данных.

**Заключение.** Проведенный анализ спектрального состава измерений фазовых углов, полученных устройствами СМПП при малых и больших возмущениях в ЭЭС, подтвердил существование низкочастотных колебаний в системе. Оценки параметров составляющих квазистационарного режима, полученные по описанному алгоритму, позволяют определить ЭС с наименьшим запасом статической устойчивости.

При переходных процессах, вызванных большими возмущениями, рассмотрено поведение ЭС, расположенных в различных сколь угодно удален-

ных друг от друга точках. Показаны способы определения синхронных групп ЭС, характеризующихся одинаковой реакцией на возникающие большие возмущения, и рассмотрены алгоритмы получения оценок параметров абсолютного, относительного и взаимного движения (скольжения) этих групп и отдельных ЭС при переходных процессах.

Эти параметры необходимы для оценки качества электромеханических колебаний, Они позволяют выявить источник возмущений и спрогнозировать дальнейшее развитие переходных процессов. Разработанные алгоритмы позволяют реализовать своевременное оптимальное управляющее воздействие в нужном сечении для предотвращения развития аварии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов Ю.А., Жуков А.В., Мацкевич И.Е. Перспективы применения векторной регистрации параметров в управлении режимами ЕЭС России. — Доклад на XX конф. «Релейная защита и автоматика энергосистем 2010», Москва, 1—4 июня 2010 г.
2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 1985.
3. Шахтарин Б.И., Ковригин В.А. Методы спектрального оценивания случайных процессов. — М.: Горячая линия -Телеком, 2011.
4. Литкенс И.В., Пуго В.И. Колебательные свойства электрических систем. — М.: Энергоатомиздат, 1988.

[31.05.12]

*Авторы: Жуков Андрей Васильевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1977 г. В 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию «Совершенствование систем технологического управления сетями сверхвысокого напряжения энергообъединений» в МЭИ. Заместитель директора по управлению режимами ЕЭС ОАО «СО ЕЭС».*

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

*Расщепляев Антон Игоревич окончил Институт электроэнергетики МЭИ (ТУ) в 2011 г. Специалист I категории ОАО «СО ЕЭС».*