

Прогнозирование и анализ аварийных событий в ЕЭС России с использованием синхронизированных векторных измерений

А.Ф. ДЬЯКОВ, А.В. ЖУКОВ, А.И. РАСЩЕПЛЯЕВ, Т.Г. КЛИМОВА
ОАО «СО ЕЭС», НИУ «МЭИ»

Россия
air@so-ups.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Синхронизированные векторные измерения, СМПР, относительное движение, низкочастотные колебания, мониторинг, прогнозирование аварийных событий

1 ВВЕДЕНИЕ

Система мониторинга переходных режимов (СМПР) 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].

Устройства синхронизированных векторных измерений (далее - PMU – phasor measurement unit) выдают большое количество параметров, описывающий электроэнергетический режим. В данной работе проводились исследования только фазового угла. Сначала рассматривался квазистационарный режим, при которых определялись слабые места (претенденты на выпадение из синхронизма), затем - возможные возмущения. В результате исследований был разработан алгоритм мониторинга низкочастотных колебаний путем формирования синхронных групп генераторов и дальнейшего прогнозирования аварийных ситуаций.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Разработанный алгоритм был отлажен с использованием измерений фазовых углов, полученные с помощью векторных измерительных преобразователей СМПР, установленных в некоторых узлах ЕЭС России. На рис. 1 а) приведен пример измерений фазовых углов при отключении блока ЭС1. 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 частоты скольжения) всех объектов обратно пропорционально электрическому расстоянию между объектами и точкой возмущения. Анализ абсолютного, относительного и взаимного движений (скольжений) позволит выделить группы генераторов (синхронных групп (СГ)), отделившихся от ЭЭС.

В статье [2] СГ рассматривается как совокупность объектов, работающих с частотой, разбиение на группы происходит при расхождении частот, о длительности этого расхождения не говорится. Понятие одна частота подразумевает квазидинаковую частоту, т.е. все генераторы, входящие в группу, имеют почти одинаковые частоты, связанные между собой.

В дальнейшем рассмотрении предполагается, что синхронной группой является группа ЭС, одинаково реагирующая на возмущения, при этом частота меняется в одну сторону практически одновременно, изменение превышает заданный порог (требует согласования понятие практически одновременно, поскольку в разной степени все объекты реагируют на возмущение, что видно на рис.1.в,2.в,3.в).

Возникновение синхронных групп в энергосистеме возможно при значительных возмущениях. В рассматриваемом переходном процессе до и после возмущения изменения фазового угла происходят практически параллельно (рис.1,б), плановое перераспределение потоков мощности вызывает медленное изменение взаимного расположения линий фазы. При сравнении расположения фазовых линий до и после возмущения можно оценить визуально перераспределение мощности.

Большие возмущения [3] вызывают существенные изменения фазы нескольких ЭС, расположенных вблизи источника возмущения. Для выявления внеплановых возмущений целесообразно использовать скорость изменения фазы, т.е. производную фазы, абсолютное скольжение (рис.1.в)). При резком изменении структуры сети существенно проявляется электромагнитная составляющая изменения частоты, отмечена пунктиром на рис.1.в).

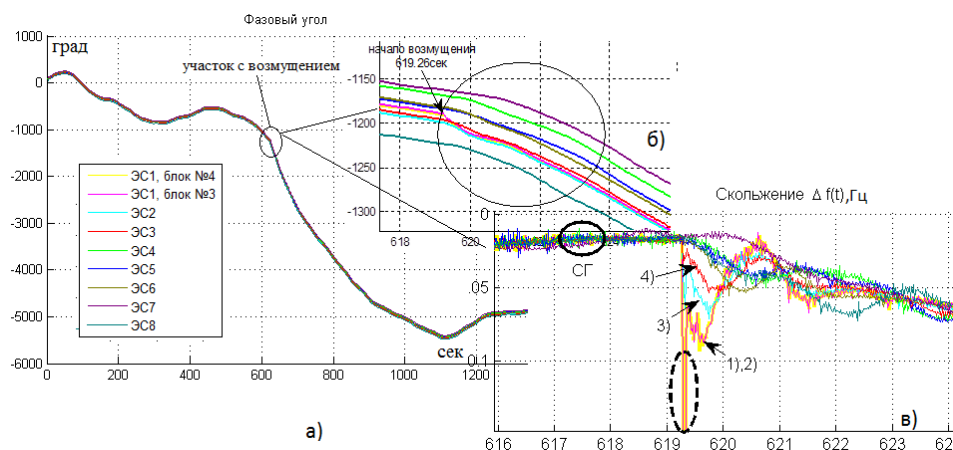


Рис.1: Поведение фазовых углов (а) и скольжения (б) при отключении блока станции

Целесообразно исследовать абсолютное, относительное и взаимное движение как в квазистационарном режиме (при малых возмущениях), так и при переходных процессах (при больших возмущениях).

Массив измерений фазовых углов представляет собой конечные выборки временных рядов. 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 временного ряда) представляет собой общую систематическую линейную или нелинейную компоненту, изменяющуюся во времени. Периодическая составляющая - это повторяющиеся компоненты. Оба эти вида регулярных компонент часто присутствуют в ряде одновременно.

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

Периодические составляющие временного ряда анализируются методами спектрального анализа, использующие 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 $X(j\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-jn\omega}$ представляет собой оценку спектральной плотности, на основе которой вычисляется оценка энергетического спектра исследуемого процесса. Интеграл от энергетического спектра определяет энергию анализируемой части временного ряда или усредненную мощность (при делении на длину окна обработки N) [4].

Значение автокорреляционной функции (АКФ) в нулевой момент также определяет оценку энергии анализируемой части временного ряда. Взаимная корреляционная функция

(ВКФ) двух выборок данных, относящихся к взаимодействующим объектам, позволяет определить влияние взаимодействующих объектов друг на друга.

Для анализа квазистационарного режима используются выборки значений абсолютных скольжений, полученных при дифференцировании фазовых углов векторов напряжений в некоторых узлах ЭЭС (рис.2). Для удобства визуального рассмотрения все значения абсолютных скольжений смещены друг относительно друга на 0.01 Гц по вертикали (рис.2, а). Нижняя выборка расположена без смещения.

При анализе рис. 2 видно, что все зависимости имеют тренд одного направления, что характеризует синхронность работы рассматриваемой группы генераторов. [3].

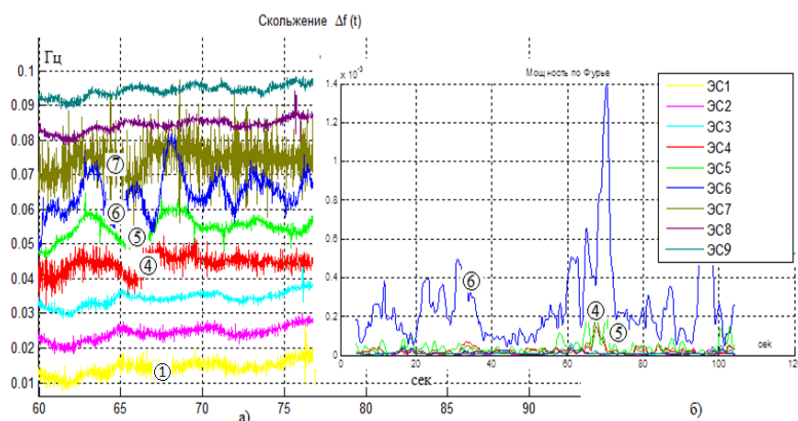


Рис.2: Анализ квазистационарного режима

Отмечается значительное 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. Количественной характеристикой высокочастотного шума является оценка его дисперсии.

Количественная оценка периодической составляющей временного ряда, представляющего абсолютное скольжение частот в узлах ЭЭС, определяется мощностью этой низкочастотной составляющей 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 (4,б)). Наибольшую мощность колебательной составляющей имеет процесс 6, относящийся к станции ЭС6. Низкочастотный спектр любого процесса в рассматриваемых данных имеет переменный во времени состав спектральных составляющих разной мощности.

При сравнении рассчитанной мощности колебательной составляющей квазистационарного процесса абсолютного скольжения с заданным порогом определяются объекты с недопустимыми колебаниями частоты, а также анализ квазистационарного режима позволяет выявить объекты с наименьшим запасом устойчивости и проанализировать возможность нарушения динамической устойчивости при больших возмущениях.

Анализ процессов при больших возмущениях.

В примере анализируемых данных (рис.1), после дифференцирования проявляются существенные скачки абсолютного скольжения, вызванные отключением (подключением) блоков на станциях. На рис.1.в показано изменение абсолютного скольжения всех объектов при некотором большом возмущении. На данном рисунке видно формирование синхронных групп - однонаправленное изменение абсолютного скольжения всех объектов (изменение тренда одного знака), но значительно различаются колебательные составляющие изменения скольжения объектов. Три ЭС имеют достаточно существенное отклонение частоты от средней частоты остальной инерционной (синхронной) группы объектов.

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

На рис.3 показан еще один способ определения момента возмущения и состава синхронных групп при использовании автокорреляционной и взаимных корреляционных функций всех измерений.

Значение автокорреляционной функции в нулевой момент времени определяет энергию процесса. Энергия колебательной составляющей абсолютного скольжения резко увеличивается в момент возмущения (рис.3), это проявляется в АКФ(0), кривая 1, рис.3. 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 СМРР, поставленных на объектах этой станции. На рис.3 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 1,2,3) СГ2 и остальные мало изменившие поведение объекты СГ1

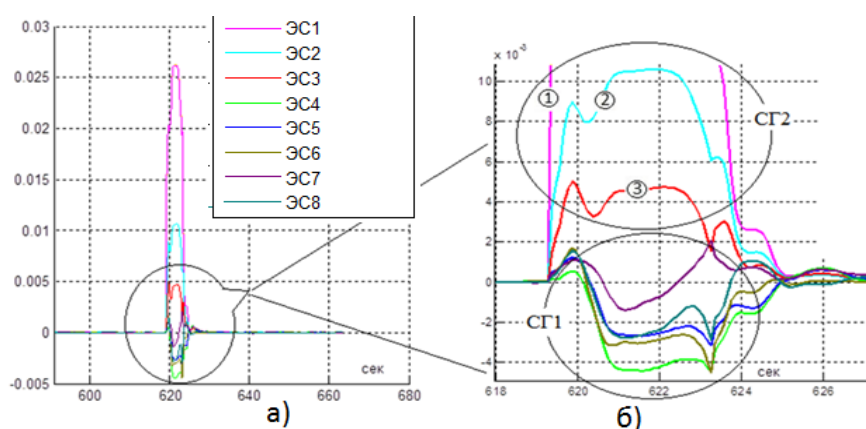


Рис.3: Использование АКФ и ВКФ для определения момента возмущения и состава синхронных групп.

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.4.

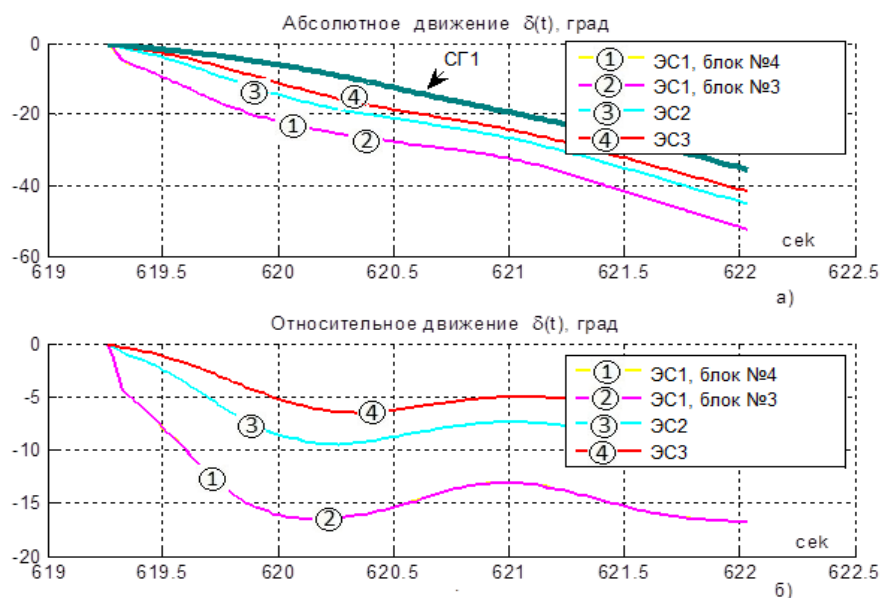


Рис.4: Движение составляющих кратковременной синхронной группы СГ2.

На рис.4, 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 градусов, это видно из рис.4, б).

Любой переходной 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. Как уже отмечалось, изменение фазовых углов хорошо отслеживается при использовании производных этих процессов, абсолютного скольжения, т.е. 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 аperiodических или колебательных составляющих (затухающих, если система статически устойчива) [5]. 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 СМРП позволяет оценить качество переходного процесса абсолютного, относительного и взаимного движения и определить свойства электрической системы по параметрам форм колебаний в переходном процессе, возникающего в начале возмущения. Колебательная часть этих процессов достаточно точно представляется либо одной затухающей синусоидальной составляющей, либо суммой двух затухающих синусоидальных составляющих.

По оценке параметров относительного движения возможно прогнозирование времени переходного процесса и максимальное отклонение фазы (рис. 5). Видно, что в первые 2,2 сек. определилось, что весь переходной процесс будет длиться 3,5 сек. А максимальное спрогнозированное отклонение фазы будет близко к реальному. Т.е. есть некая возможность прогнозировать дальнейшее развитие события по оценкам параметров относительного движения.

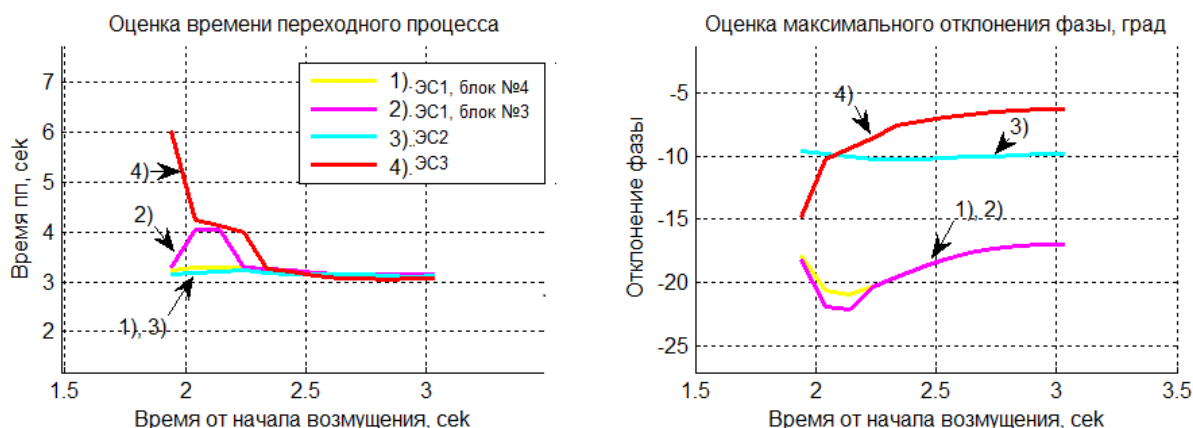


Рис.5: Оценка времени переходного процесса и максимального отклонения фазы. Возмущение, рассмотренное выше, не привело к асинхронному режиму.

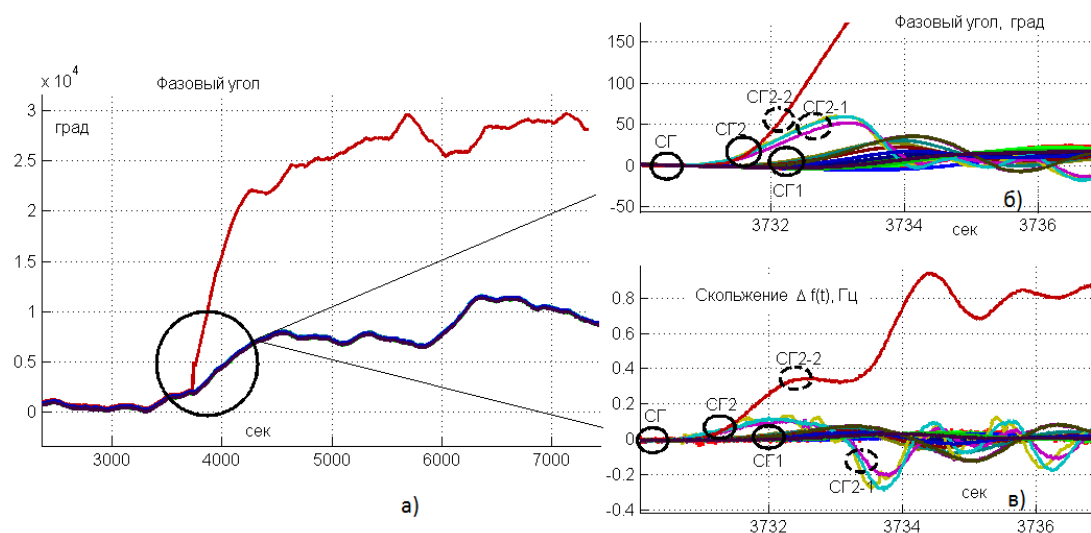


Рис.6. Поведение фазовых углов и скольжения при плавном выходе из синхронного режима

На рис.6 показано появление асинхронного хода одной из станций при плавных изменениях параметров. На рис.6.б,в показано разделение единой группы сначала на две синхронные группы СГ1 и СГ2, а затем от СГ2 отделяется один объект. Именно этот объект имеет наибольшую колебательность в квазистационарном режиме (рис. 7). Таким образом, использование данных анализа квазистационарного режима позволяет определить объекты-претенденты на выпадение из синхронизма. На рис. 8 видно, что ЭС6 находилась на некотором удалении от источника главного возмущения, ее движение началось несколько позже остальных и тем не менее ЭС6 отделилась от основной синхронной группы СГ2.

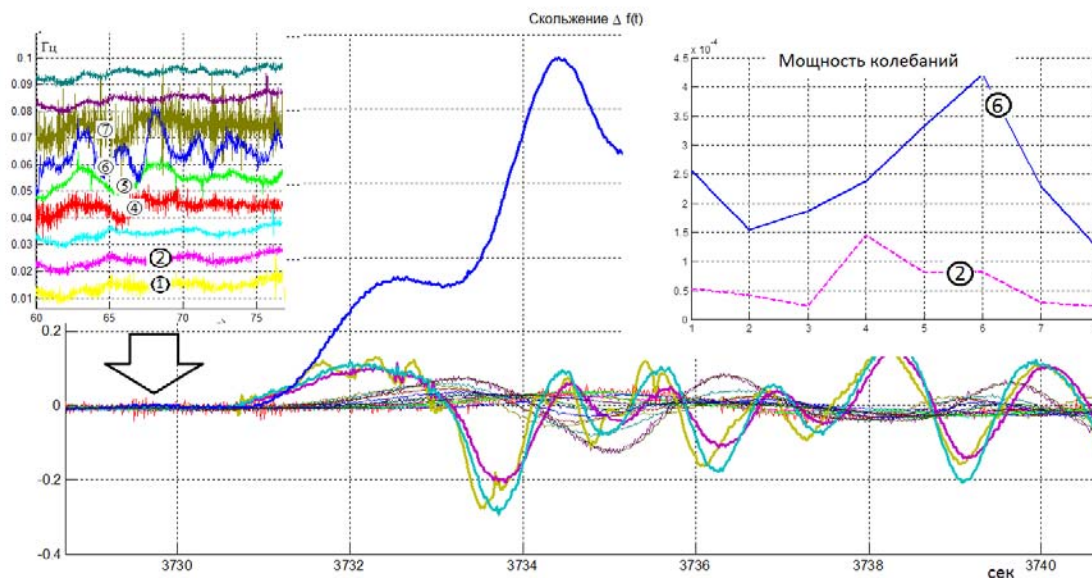


Рис.7: Анализ квазистационарного режима.

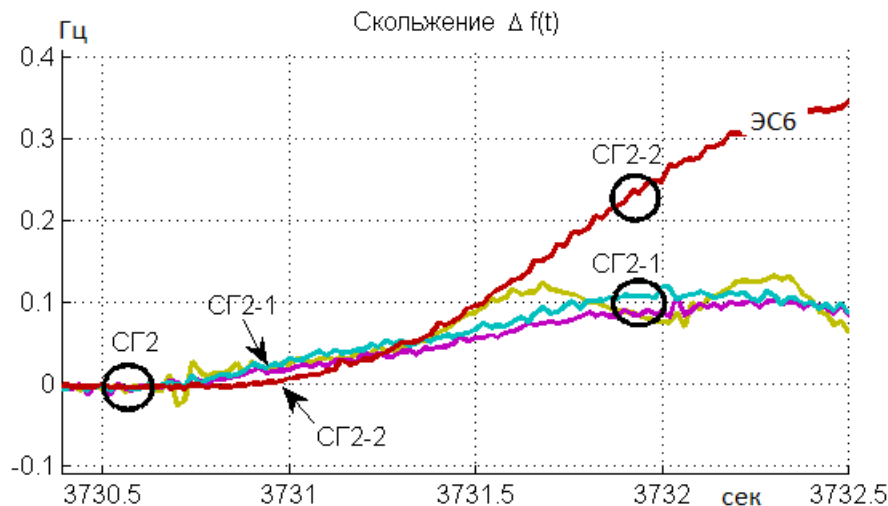


Рис.8: Вторичное формирование синхронных групп (процесс рис.3).

Из всей группы рассматриваемых объектов можно автоматически выделить возмущенные объекты и при оценке параметров абсолютных фазовых углов прогнозировать развитие событий. На рис.9 показан пример оценки параметров абсолютного движения и прогноз поведения. Оценка параметров проводилась при использовании 30 выборок (0,6 с.) и 40 выборок (0,8 с.), реальные процессы 1 и 4, представлены на рис.9 точками. Сплошными линиями показано спрогнозированное развитие абсолютного движения, основанное на полученных оценках. Прогноз 1, 3 относится к первому процессу, прогноз 1 основан на оценках с использованием окна в 40 точек, а прогноз 3 – окна в 30 точек. Для процесса 4 прогнозы с использованием разных окон совпадают.

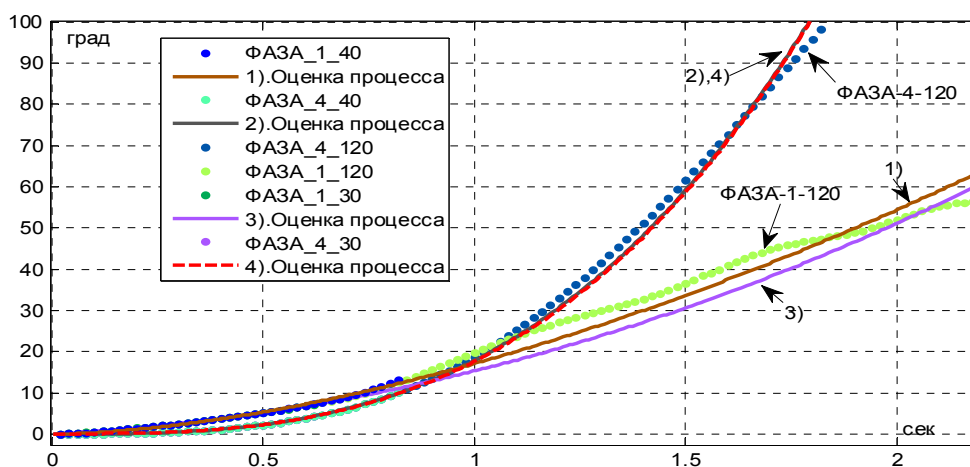


Рис.9: Оценка параметров абсолютного движения и прогноз поведения. Следует отметить достаточно точное прогнозирование поведения процессов.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ спектрального состава измерений фазовых углов, полученных устройствами СМРП при различных возмущениях в ЭЭС, который подтвердил существование низкочастотных колебаний в системе.

Описан алгоритм получения оценок параметров составляющих квазистационарного режима. К параметрам квазистационарного режима относятся: мощность нестационарного процесса изменения фазового угла и скольжения, их математическое ожидание (или тренд),

среднеквадратическое отклонение и параметры основных низкочастотных колебательных составляющих.

При переходных процессах, вызванных большими возмущениями, рассмотрено поведение ЭС, расположенных в различных сколь угодно удаленных друг от друга точках. Показаны способы определения синхронных групп ЭС, характеризующихся одинаковой реакцией на возникающие большие возмущения.

Рассмотрены алгоритмы оценок параметров абсолютного, относительного и взаимного движения (скольжения) синхронных групп и отдельных ЭС при переходных процессах. К оцениваемым параметрам относятся: комплексная амплитуда и частота основной синусоидальной составляющей, входящей в абсолютный угол (скольжение), постоянная времени затухания и логарифмический декремент затухания (величина, определяющая степень затухания колебания за время, равное периоду этого колебания и характеризующая степень демпфирования электромеханических колебаний) данной основной синусоидальной составляющей. Эти параметры необходимы для оценки качества электромеханических колебаний [5].

Показана возможность использования оценок параметров абсолютного, относительного и взаимного движения для прогнозирования развития событий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ю.А. Куликов, А.В. Жуков, И.Е. Мацкевич, Перспективы применения векторной регистрации параметров в управлении режимами ЕЭС России. Доклад на XX конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем 2010», 01-04.06.2010.
- [2] А.Ф. Дьяков, Н.И. Зеленохат, Новая концепция создания автоматизированной системы управления переходными режимами в объединенных энергосистемах // Известия академии электротехнических наук Российской Федерации. -2009. -№ 3(5). С. 1-11.
- [3] Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. - М.: Высшая школа, 1985.-536 с.
- [4] Шахтарин Б.И., Ковригин В.А. Методы спектрального оценивания случайных процессов. - М.: Горячая линия-Телеком, 2011. 255 с.
- [5] И.В. Литкенс, В.И. Пуго, Колебательные свойства электрических систем. - М.: Энергоатомиздат, 1988-216с.