

Статистические свойства частоты в Единой энергетической системе

СМИРНОВ С.С., ОСАК А.Б.

Длительные измерения частоты на интервалах 0,02 с, используемые в системе мониторинга переходных процессов, позволили определить статистические свойства изменения частоты в электрической системе. Предложены алгоритмы фильтрации режимного шума и обнаружения появления низкочастотных колебаний. Оценены статистические свойства колебаний частоты с периодом до 10 с, 1 мин, 30 мин и более. Оценены вероятности выхода изменений частоты за предельные значения. С вероятностью 95% частота изменяется в пределах ± 32 мГц и качество поддержания частоты напряжения соответствует российскому и европейским стандартам по режимам работы энергосистем.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электроэнергетическая система, электрическая энергия, качество, частота напряжения

Стабильность частоты в Единой энергетической системе (ЕЭС) является показателем качества работы энергосистемы и отражает динамику баланса мощности генераторов и потребителей. Мощность нагрузок непрерывно изменяется. На плановый суточный график изменения мощности нагрузок и генераторов и накладываются случайные составляющие, связанные с коммутацией генераторов и нагрузок, с действием системы автоматического регулирования частоты и активной мощности (АРЧМ). Требования к АРЧМ определены в стандарте Системного Оператора (СО), отвечающего за режимы ЕЭС [1], а значения показателей качества поддержания частоты на шинах потребителей определены в [2]. Требования СО к качеству регулирования частоты определены из условия экономической и надежной работы агрегатов электростанций и являются более жесткими, чем в стандарте [2], допускающем отклонение частоты до 200 мГц длительно. В соответствии со стандартом СО частота измеряется для интервала 1 с, а в соответствии с [2]—20 с.

Для регулирования частоты используется планирование режима генерации на станциях, первичное регулирование за счет регуляторов скорости турбин, автоматическое вторичное регулирование за счет станционных систем регулирования частоты и мощности, централизованных устройств ЕЭС и объединенных диспетчерских управлений (ОДУ)

The results obtained from long-term measurements of frequency carried out at 0.02 s intervals, used in the system for monitoring transients, made it possible to determine the statistical properties of frequency variation in the electric power system. Algorithms for filtering operational noise and revealing low-frequency oscillations are proposed. The statistical properties of frequency oscillations with periods of up to 10 s, 1 min, 30 min, and more than 30 min are evaluated. The probabilities of frequency deviations beyond the limiting values are estimated. A conclusion is drawn that the frequency varies within the range of 32 mHz with a probability of 95% and that the quality of maintaining the power frequency is in compliance with the Russian and European standards on the operating conditions of power systems.

Key words: electric power system, electric energy, quality, voltage frequency

и третичное регулирование за счет резервных мощностей остановленных агрегатов.

Нормативные требования к первичному регулированию в России следующие [1]: зона нечувствительности турбоагрегатов не более 0,15 Гц (0,3%), гидрогенераторов — 0,03 Гц (0,06%); значение статизма регуляторов скорости 4—6%.

Эти требования обеспечивают распределение мощности между агрегатами для паровых турбин с точностью 6—7%, гидротурбин — 1,2%. Для электростанций, участвующих в нормированном первичном регулировании ширина зоны нечувствительности 0,02 Гц при точности уставки частоты $\pm 0,01$ Гц, что соответствует мертвой зоне не более $\pm 0,02$ Гц.

В нормальном режиме отклонение частоты от 50 Гц должно находиться преимущественно в зоне ± 20 мГц и не превышать ± 50 мГц. В настоящее время большинство станций в ЕЭС/ОЭС осуществляют первичное регулирование в пределах возможностей по настройке первичных регуляторов, обеспечивающих реакцию генераторов на аварийные отклонения частоты свыше 0,2 Гц. На отклонения частоты в нормальном режиме эксплуатации ЕЭС/ОЭС (в пределах 200 мГц) генераторы реагируют случайным образом. Соответственно, крутизна частотной характеристики I энергосистемы в целом неустойчива — изменяется от 10 до 30 ГВт/Гц. В среднем значение I при отключении генераторов

составляет 22,7 ГВт/Гц. Расчетному возмущению 1200 МВт соответствует изменение частоты на 53 мГц. Системным оператором должны регистрироваться изменения частоты при возникновении небаланса ± 700 МВт (31 мГц). Для обеспечения длительной работы агрегатов при отклонении частоты на ± 200 мГц необходим резерв на изменение мощности на $\pm 5\%$ при мертвой зоне ± 75 мГц и $\pm 8\%$ при мертвой зоне ± 20 мГц.

Вторичное регулирование в ЕЭС/ОЭС централизовано. Центральный вторичный регулятор находится в Москве. С его помощью осуществляется регулирование частоты. Остальные вторичные регуляторы, с учетом коррекции по частоте, регулируют перетоки мощности в межсистемных связях и ограничивают перетоки в заданных сечениях [3].

В настоящее время в ЕЭС развернута система мониторинга переходных процессов (СМПР), в которой проводится измерение частоты в каждой из фаз за время 0,02 с. Это позволяет оценить быстрые изменения частоты с периодом 1–10 с, характерные для низкочастотных колебаний при коммутациях в системе и возникновении колебательной неустойчивости режимов. Значения частоты в различных узлах системы отличаются на значение низкочастотных колебаний, обусловленных электромеханическими переходными процессами с частотой 0,1–1 Гц. Поэтому оценку изменений частоты на интервалах 1 мин и более можно выполнить по результатам измерений в любом узле сети, в том числе в распределительной сети.

В последние годы было реализовано нормированное первичное регулирование частоты на большом числе станций и увеличено число станций автоматического вторичного регулирования, что привело к улучшению качества регулирования частоты. Продолжительность переходных процессов, связанных с работой вторичного регулирования, составляет несколько минут. При коммутациях мощности частота в энергосистеме должна быть восстановлена за время не более 15 мин, а среднее значение отклонения частоты за 30 мин должно быть не более 10 мГц [1]. Фактическое качество работы АРЧМ можно оценить с использованием статистического анализа изменения частоты на длительных интервалах времени [4].

Для статистического анализа были использованы две серии измерения частоты, проведенные в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН в 2010 г. с 13 апреля по 16 июня и в 2011 г. с 6 апреля по 16 мая. Для измерений использовался измерительный преобразователь СМПР МИП-02 производства ЗАО РТСофт (Россия) и измерительный комплекс фирмы LEM TOPAS 1019 (Австрия). Измерялись значения час-

тоты напряжения на интервале 0,02 с с точностью 1 мГц и шагом 0,1 мГц. В TOPAS 1019 измерялись также средние, минимальные и максимальные значения для интервалов 1 мин, которые удобны для анализа процессов на интервалах сутки и более.

Измерения показали, что электромагнитные процессы в системе приводят к появлению режимного шума в измерении электромеханических процессов. Поэтому необходима фильтрация измеренных значений частоты.

Фильтрация режимного шума. Непрерывные изменения напряжения, обусловленные электромагнитными процессами в сети, приводят к появлению шума, превышающего 1 мГц в измерении частоты на интервале 0,02 с. В преобразователях МИП-02 частота измеряется для каждой из фаз. На рис. 1,а приведен пример регистрации частоты фаз на интервале 1 с. Имеется значительная разность частот для фаз, достигающая 60 мГц. Если на все три входа измерителя МИП-02 подать одно и то же напряжение, то разность в измерениях частоты исчезает (рис. 1,б). Это доказывает, что шум связан с изменением мгновенных значений напряжения фаз.

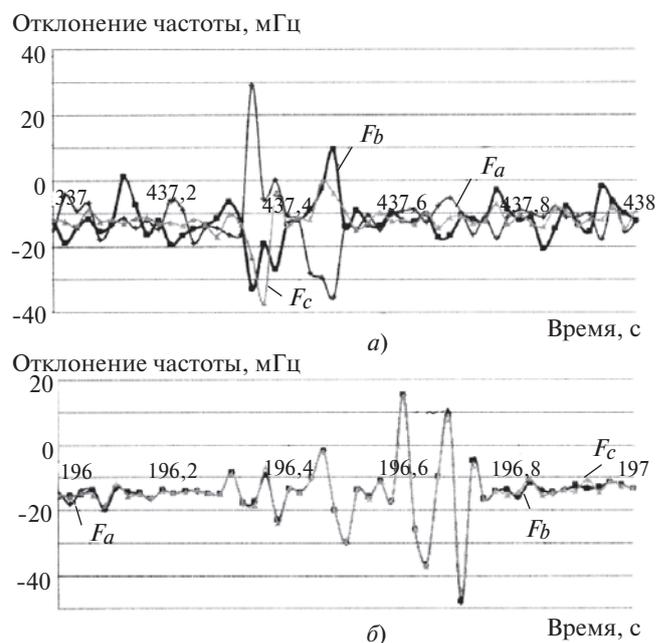


Рис. 1. Регистрация частоты на интервале 1 с измерителем МИП 01: а – подключены три напряжения; б – подключено одно напряжение; F_a (♦), F_b (■), F_c (▲) – частота напряжения фаз А, В, С

Усреднение частоты за 1 с в соответствии с [1] позволяет значительно уменьшить режимный шум, но не позволяет определить значения низкочастотных колебаний с периодом 0,2–1 с, которые опасны для системы. Необходима фильтрация измерительного шума, обеспечивающая измерение низкочастотных колебаний.

В измерении частоты отмечаются коммутационные выбросы до 100 мГц и более и колебания с частотой 10–25 Гц и амплитудой до 18 мГц, связанные с непостоянством формы напряжения. Для фильтрации коммутационных выбросов можно использовать медиану из пяти точек. Для фильтрации колебаний из-за непостоянства напряжения – усреднение девяти измерений. Для синхронизации значений медианы, среднего значения и входного сигнала используются скользящие окна, значениям которых присваивается время соответствующее середине окна.

На рис. 2 приведен режим с коммутацией и последующими низкочастотными колебаниями. Предложенный вариант фильтрации позволил отфильтровать выброс значением 104 мГц, связанный с коммутацией, и сохранить изменения, связанные с низкочастотными колебаниями с периодом 1,2 и амплитудой 40 мГц.

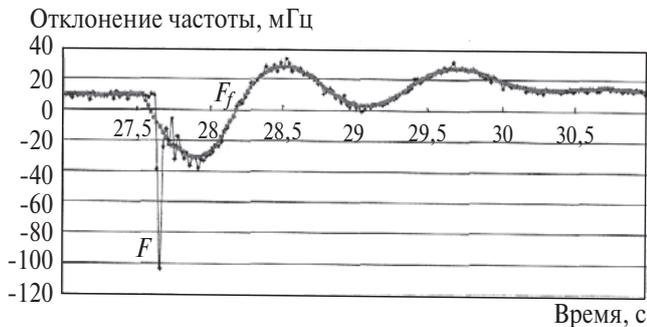


Рис. 2. Фильтрация режимного шума с использованием медианы из пяти значений и усреднения девяти значений: F – измерение; F_f – фильтрация

В табл. 1 приведены результаты статистического анализа разности измеренных частот по фазам для исходных измерений, для измерений после фильтрации шума и для средних значений за 1 с. Для вероятности 95% разность для исходных измерений равна 10,98 мГц, после фильтрации – 2,29 мГц, после усреднения за 1 с – 0,39 мГц.

Обработка измерений показывает, что с вероятностью 95% разность средних значений частоты за 1 с для фаз менее 0,4 мГц. Допустимая точность

измерений для 1 с в соответствии с [1] равна 1 мГц. Поэтому для измерения средних значений за 1 с может использоваться любая фаза.

Статистический анализ изменения частоты за сутки. При статистическом анализе режима за сутки (24 ч, 4200000 измерений) массив измерений разбивается на 144 интервала по 10 минут по 30 000 измерений в каждом интервале. Интервалы маркируются по времени окончания интервала измерения в минутах. Например, интервалу F70 соответствует время измерений с 60-й мин по 70-ю от начала суток.

Для каждого 10-минутного интервала проводится фильтрация измерений для устранения режимного шума, связанного с электромагнитными процессами. После фильтрации для каждого 10-минутного интервала определяются: среднее значение, стандартное отклонение, наибольшее и наименьшее отклонения, соответствующие вероятности 95%, максимальное и минимальное значения, размах изменения частоты за 10 мин, и проводится маркировка интервалов по отклонению частоты более ± 50 мГц и размаху изменений частоты за 10 мин более 80 мГц. Затем проводится статистический анализ изменения параметров распределения за 144 интервала и формируется таблица статистических свойств распределения значений за сутки.

Статистические параметры для 23 апреля 2010 г. приведены в табл. 2. С вероятностью 95% значения не превосходят: верхнее 30,7 мГц, нижнее -33,6 мГц, размах 76 мГц. Имеются возмущения режима, приводящие к снижению частоты на -53,3 мГц. Данные табл. 1 показывают на значительный диапазон изменения статистических параметров для разных 10-минутных интервалов.

Для анализа строится график изменения средних, максимальных и минимальных значений (рис. 3), на котором видны интервалы с отклонением частоты за ± 50 мГц. Для трех интервалов минимальные отклонения были менее -50 мГц.

Для выявления интервалов со значительными изменениями частоты используется график размаха

Таблица 1

Значение параметра	Разность частот в фазах по результатам 30000 измерений за 10 мин, мГц								
	Измерения			Фильтрация			Среднее за 1 с		
	$b-a$	$c-d$	$a-c$	$b-a$	$c-d$	$a-c$	$b-a$	$c-d$	$a-c$
Стандартное отклонение	5,53	4,29	5,15	1,01	0,92	0,91	0,18	0,17	0,15
Наименьшее	-10,77	-8,47	-10,98	-2,29	-1,8	-1,66	-0,38	-0,33	-0,31
Наибольшее	11,81	8,39	9,82	1,75	1,94	1,97	0,39	0,32	0,3
Минимальное	-62,09	-40,65	-31,77	-5,58	-4,67	-7,22	-2,04	-1,16	-1,77
Максимальное	56,86	31,15	52,59	6,84	6,09	4,28	1,4	0,96	1,42

Таблица 2

Значение анализируемого параметра	Значения отклонений частоты для 144 интервалов по 10 мин, мГц			
	верхнее	нижнее	максимальное	минимальное
Среднее	6,42	-12,98	10,37	-17,94
Стандартное отклонение	16,81	6,49	21,57	5,62
Верхнее	30,73	2,84	34,52	-3,94
Нижнее	-6,52	-33,64	-0,92	-41,91
Максимальное	40,68	12,25	47,82	7,04
Минимальное	-13,78	-43,34	-10,31	-53,35

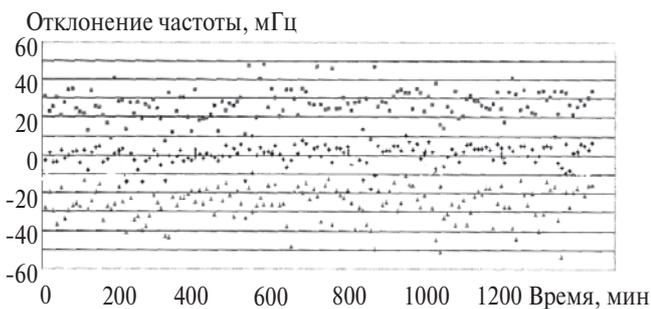


Рис. 3. Изменения значений частоты за сутки: ♦ — среднее; ■ — максимальное; ▲ — минимальное

колебаний частоты (рис. 4). Для 5 интервалов размах превысил 80 мГц, что соответствует изменению баланса мощности на 1816 МВт. Для этих интервалов необходим углубленный анализ.

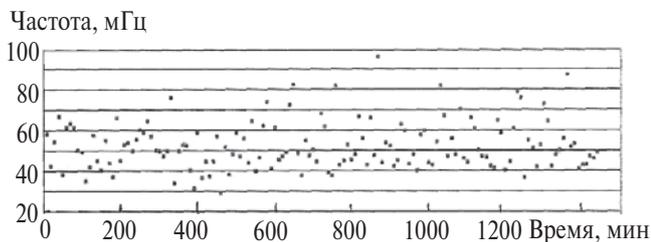


Рис. 4. Размах колебаний частоты на интервалах 10 мин

Для визуального анализа изменения частоты для каждого из 144 интервалов строится график изменения частоты за 10 мин (пять графиков на одном рисунке). Пример графиков приведен на рис. 5, из которого видно наличие низкочастотной составляющей (0,11–0,14 Гц) в изменении частоты и большого диапазона изменений частоты под действием вторичного регулирования на интервале 10 мин. Для интервала F580 размах изменения составил 73 мГц. Характер изменений частоты индивидуальный для каждого интервала и является случайным.

Для выявления колебания частоты с периодом 0,5–5 с для каждого интервала по 10 мин проводится расчет изменения частоты для скользящего окна 5 с. Определяются параметры распределения и строится график (см. рис. 6 и табл. 3). Средние значения находятся в пределах 8–10 мГц, верхние значения – 12–15 мГц, максимальные – 15–25 мГц.

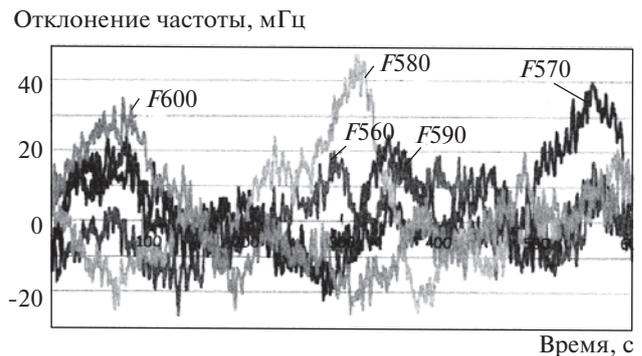


Рис. 5. Графики изменения частоты на интервалах 10 мин

Маркируются интервалы с размахом значений за 5 с более 30 мГц. Для интервала F1310 максимальное изменение составило 58 мГц. На рис. 2 приведен график изменения частоты для этого режима, из которого видно, что были зарегистрированы низкочастотные колебания с периодом 1,2 с.

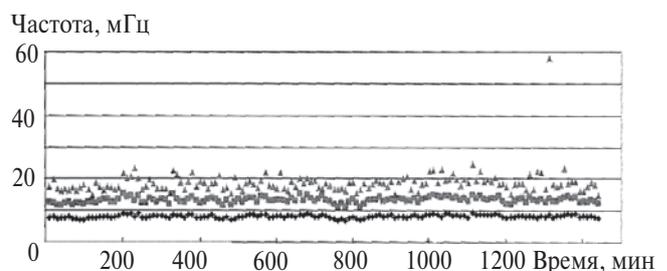


Рис. 6. Размах изменения частоты за 5 с: ♦ — среднее значение; ■ — верхнее; ▲ — максимальное

Для определения статизма энергосистемы по частоте при скачкообразном изменении мощности в соответствии со стандартом СО [1] измеряется изменение частоты за 30 с от момента изменения мощности как разность среднего значения мощности с 10 по 30 с после изменения мощности и среднего значения за 30 с до изменения мощности. Так как момент изменения мощности неизвестен, то используется скользящее окно 60 с, в котором рассчитывается изменение частоты за 30 с. Для каждого 10-минутного интервала определяются минимальные и максимальные значения и строятся графики минимальных и максимальных значений

Таблица 3

Значение оцениваемого параметра	Значения размаха частоты за 5 с для 144 интервалов, мГц					
	среднее	стандартное отклонение	верхнее	нижнее	максимальное	минимальное
Среднее	8,22	0,49	9,04	7,36	9,32	6,84
Верхнее	13,28	0,88	14,65	11,79	15,20	10,97
Максимальное	18,75	3,85	22,67	15,56	58,08	14,85

(рис. 7). Интервалы, в которых изменения за 30 с выходят за ± 30 мГц, маркируются и анализируются. Предельное значение 30 мГц превышено для пяти интервалов. Для интервала F580 это значение 39,2 мГц (896 МВт).

Изменение частоты, мГц

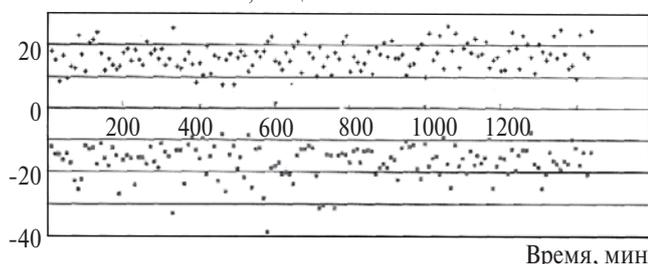


Рис. 7. Максимальные и минимальные отклонения частоты за 30 с

Формируется массив средних значений частоты за интервалы 1 с, который используется для диспетчерских служб и для каждого 10-минутного интервала рассчитываются средние значения, стандартные отклонения, верхние и нижние значения, максимальные и минимальные значения и строятся соответствующие графики. Маркируются интервалы с выходом минимальных или максимальных значений за пределы ± 50 мГц и размаха изменений частоты за 80 мГц.

Для более подробного отображения динамики изменения частоты за сутки используются дискретные одномоментные интервалы. Для этих интервалов формируются массивы средних, максимальных и минимальных значений. Для выявления интервалов со значительными изменениями частоты за 1

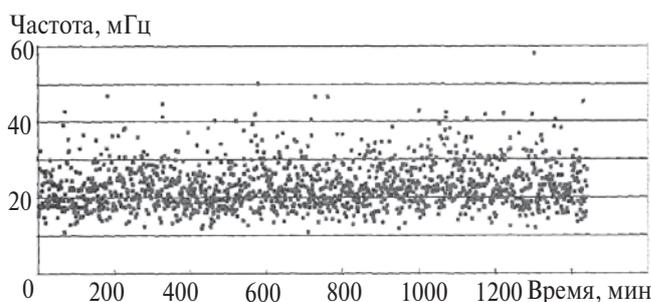


Рис. 8. Размах изменения частоты за 1 мин

мин рассчитывается размах изменения частоты за 1 мин как разность максимального и минимального значений (рис. 8). Статистические параметры режима для интервалов 1 мин приведены в табл. 4. Отклонения средних значений частоты за 1 мин выходят за 50 мГц в двух измерениях, а размах выходит за 40 мГц в 20 измерениях. Для интервалов, имеющих маркер, проводится углубленное исследование режима частоты.

Анализ изменения частоты на длительных интервалах на основе регистрации параметров за 1 мин. Если действие системы первичного регулирования оценивается в секундах (до 30 с), то действие системы вторичного регулирования оценивается в минутах. В течение 15 мин (не более) должна быть восстановлена частота, а среднее значение отклонения частоты за 30 мин не должно быть более ± 10 мГц. Для анализа используется регистрация в комплексе TAPAS 1019 за одномоментный интервал средних, максимальных и минимальных значений. Единичное измерение частоты соответствует интервалу 0,32 с. Размах изменений частоты опреде-

Таблица 4

Значение параметра распределения для 1440 измерений	Значения отклонений частоты для 1440 измерений продолжительностью 1 мин, мГц			
	среднее	минимальное	максимальное	размах
Среднее	-0,07	-11,38	11,35	22,72
Стандартное отклонение	10,88	10,97	11,39	5,84
Верхнее	18,02	6,32	31,36	35,32
Нижнее	-20,81	-32,16	-10,22	14,64
Максимальное	33,79	21,90	47,82	58,08
Минимальное	-39,19	-53,35	-26,20	10,80

Таблица 5

Параметр распределения для всего интервала анализа	Значения отклонений частоты для одномоментных измерений, мГц					Среднее отклонение	
	среднее	минимальное	максимальное	размах	изменение за 1 мин	за 10 мин	за 30 мин
Среднее	-0,60	-5,63	4,41	10,04	0,00	-0,60	-0,61
Стандартное отклонение	13,37	13,51	13,56	5,15	8,56	9,01	6,69
Верхнее	26,00		31,20	22,50	17,00	18,60	14,41
Нижнее	-27,20	-32,70		2,80	-16,90	-18,76	-13,04
Максимальное	50,00		56,50	51,60	49,10	34,36	26,04
Минимальное	-55,10	-62,00		0,40	-42,60	-36,36	-26,48
Размах	105,10					70,73	52,52

ляется как разность максимального и минимального значений. Для выявления небаланса мощности рассчитываются также изменения частоты за 1 мин как разность двух средних значений за 1 мин.

Для оценки динамики вторичного регулирования частоты рассчитываются средние значения для скользящих окон шириной 10 и 30 мин.

Расчетными нарушениями режима являются:

выход максимальных или минимальных значений на интервале 1 мин за пределы ± 50 мГц;

выход средних значений за 1 мин за пределы ± 30 мГц;

то же за 10 мин за ± 20 мГц;

то же за 30 мин ± 10 мГц;

размах частоты на интервале 1 мин более 40 мГц;

изменение среднего значения за 1 мин более 30 мГц.

Анализ проводился на примере измерений с 6 апреля по 5 мая 2011г. продолжительностью 35 345 мин (24,5 суток). В табл. 5 приведены статистические оценки анализируемых величин.

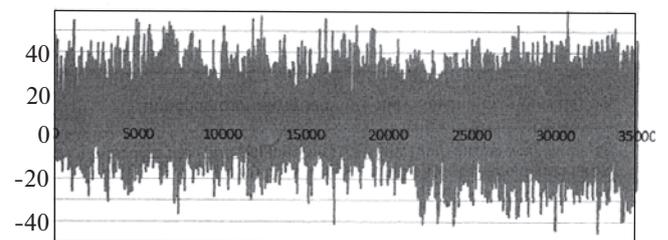
Минимальные значения средних значений для окон 1, 10, 30 мин составляют соответственно -55 , -36 и -26 мГц, максимальные 50, 34, 26 мГц. С вероятностью 95 % изменения среднего значения за 1 мин лежат в пределах $\pm 13,8$ мГц, за 10 мин ± 18 мГц, за 30 мин ± 17 мГц. Средние значения за 1 мин и 10 мин лежат в допустимых пределах. Средние значения для 30 мин превосходят допустимое значение равное ± 10 мГц. На рассматриваемом интервале имеются возмущения, приводящие к превышению допустимых значений. Моменты таких возмущений определяется при анализе временного графика.

Изменение средних значений приведено на рис. 9. Изменения имеют сложный характер, обусловленный как случайными изменениями мощно-

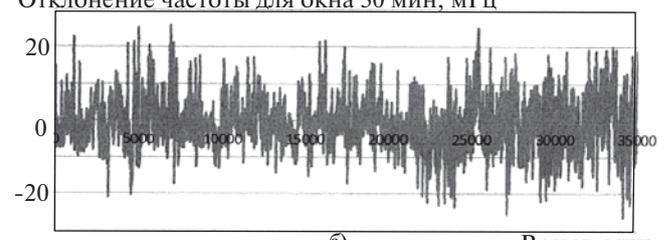
сти, так и работой систем первичного и вторичного регулирования. На рис. 10 приведены изменения среднего значения за 1 мин, определенные как разность средних значений для двух окон. Для 59 измерений изменение частоты превысило 30 мГц.

Использование синхронизированных скользящих окон шириной 1, 10, 30 мин позволяют разло-

Отклонение частоты для окна 1 мин, мГц



Отклонение частоты для окна 30 мин, мГц



Отклонение частоты, мГц

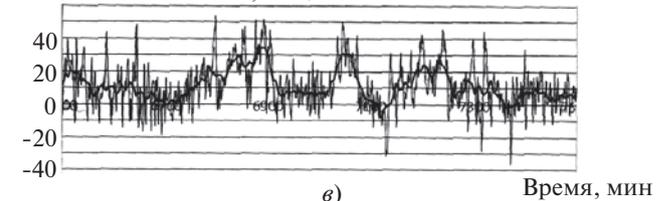


Рис. 9. Динамика средних значений для окон 1 мин (а); 30 мин (б) и совместный фрагмент изменений средних значений для окон 1, 10 и 30 мин (в)

жить процесс изменения на составляющие с разной скоростью изменения. Синхронизация окон происходит за счет присвоения значению окна времени средней точки окна. Текущее значение частоты

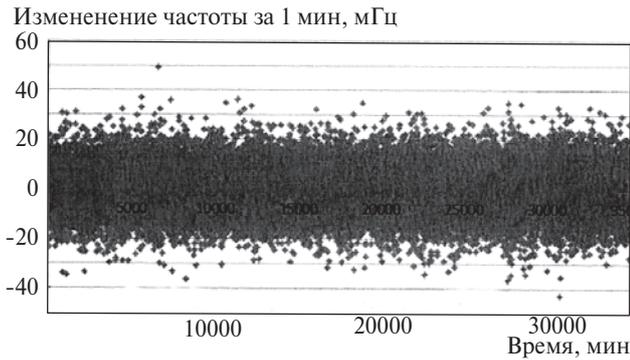


Рис. 10. Измерение среднего значения за 1 мин

ты является суммой быстрых F_6 , средних F_{cp} , медленных F_M изменений частоты и среднего значения за 30 мин F_{30M} :

$$F = F_6 + F_{cp} + F_M + F_{30M}; F_6 = F - F_{1M};$$

$$F_{cp} = F_{1M} - F_{10M}; F_M = F_{10M} - F_{30M},$$

где F_{1M} ; F_{10M} ; F_{30M} – средние значения для скользящих окон шириной 1 мин, 10 мин, 30 мин соответственно.

Соответствующие характеристики составляющих изменения частоты отражены в табл. 6.

Высокочастотные изменения для вероятности 95% оцениваются значением ± 12 мГц, средние – ± 18 мГц, медленные – ± 12 мГц, средние для 30 мин – ± 14 мГц. Медленные изменения и изменения с периодом более 30 мин обусловлены работой

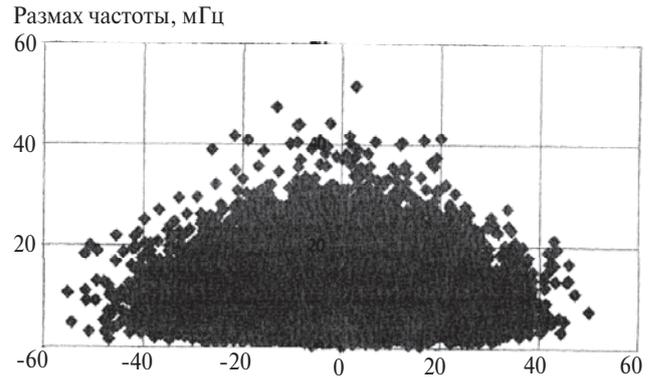


Рис. 11. Зависимость размаха колебаний частоты от среднего значения за 1 мин

вторичного регулирования частоты и могут быть существенно уменьшены.

На рис. 11 отражена зависимость размаха быстрых изменений частоты от среднего значения за 1 мин. При отклонениях среднего значения более 20 мГц отмечается значительное снижение размаха быстрых изменений в следствие работы нормированного первичного регулирования с мертвой зоной ± 20 мГц.

Число маркированных измерений отражено в табл. 8; число маркированных минут превысило 5% для среднего значения за 30 мин.

Необходимо или увеличить допустимое значение среднего значения отклонения частоты для интервала 30 мин или улучшить вторичное регулирование.

Таблица 6

Значение	Составляющие случайного процесса изменения частоты			
	быстрые	средние	медленные	среднее значение для окна 30 мин
Стандартное отклонение	2,78	9,01	5,44	6,69
Верхнее	11,90	17,82	11,34	14,41
Нижнее	-11,90	-17,61	-11,72	-13,04
Максимальные	29,00	42,95	22,74	26,04
Минимальные	31,40	-43,07	-24,01	-26,48

Таблица 7

Параметр	Число маркированных минут для интервала измерений в 35343 мин					
	Текущие значения	Размах 1 мин	Изменение среднего за 1 мин	Среднее		
				1 мин	10 мин	30 мин
Норма	± 50 мГц	40 мГц	30 мГц	± 40 мГц	± 20 мГц	± 10 мГц
Число маркированных минут	39	17	31	115	1302	4577
Число маркированных минут за 24 ч	1,59	0,69	1,27	4,69	53,14	186,82
Доля маркированных минут, %	0,11	0,05	0,09	0,33	3,69	12,97

Выводы. 1. При обработке измерений частоты напряжения на интервалах 0,02 с необходимо проводить фильтрацию режимного шума обусловленного электромагнитными процессами.

2. В изменениях частоты непрерывно присутствует составляющая 0,12–0,14 Гц амплитудой до 7 мГц, что связано с колебаниями мощности по одной из межсистемных связей.

3. С вероятностью 95% средние значения находятся в пределах: для интервала 0,32 с – ± 32 мГц, для 1 мин – ± 27 мГц, для 10 мин – ± 19 мГц, для 30 мин – ± 14 мГц.

4. Качество регулирования частоты в ЕЭС/ОЭС практически соответствует европейскому стандарту.

5. В изменениях частоты присутствуют составляющие, имеющие диапазон изменения для вероятности 95%, с периодом менее 1 мин (быстрые) ± 12 мГц, для периода 1–10 мин (средние) – $\pm 17,8$ мГц, с периода 10–30 мин (медленные) – 11,7 мГц и средние за 30 мин ± 14 мГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Оперативно-диспетчерское** управление в электроэнергетике. Регулирование частоты и потоков активной мощности в ЕЭС и изолированно работающих в энергосистемах России. Стандарт ОАО РАО «ЕЭС России», 2007.

2 **ГОСТ 13109–97.** Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения.

3. **Андреев А.В., Лившиц Г.Н., Машанский А.М. и др.** Иерархическая система автоматического регулирования частоты и потоков активной мощности ЕЭС России. – Электрические станции, 2010, №3.

4. **Smirnov S.** Measurement Results of Frequency and Exchange Power Fluctuations in Russian Power System.– Proc. of the 4th Intern. Workshop, Irkutsk (Energy Systems Institute), 13–17 July, 2009.

[26.12.11]

А в т о р ы: Смирнов Сергей Сергеевич окончил энергетический факультет Московского энергетического института в 1962 г. В 2001 г. в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН) защитил докторскую диссертацию « Методы исследования и нормализации режимов высших гармоник в сетях высокого напряжения». Ведущий научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.

Осак Алексей Борисович окончил энергетический факультет Иркутского государственного технического университета в 1998 г. Научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.