

Анализ требований стандарта С37.118-2011

А.Н. ПОКИДЫШЕВ
ООО "ПАРМА"
Россия
pan@parma.spb.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Стандарт С37.118, синхронные векторные измерения, синхрофазор, PMU, определение, требования, испытания на соответствие.

1 ВВЕДЕНИЕ

Во всём мире растёт применение измерений синхрофазоров для широкого спектра задач. В декабре 2011 года вышла новая версия стандарта IEEE С37.118 - [1], [2], назначение которого – обеспечение единства измерений синхрофазоров в устройствах синхронных векторных измерений (PMU). В настоящей работе анализируются измерительные, радиотехнические требования этого стандарта, содержащиеся в первой его части [1]. После работ [3], [4] где был проведён наиболее полный критический разбор этих требований, стали появляться и другие работы по этой теме (например [5], [6]), содержащие критику отдельных положений этого нормативного документа. Цель данного доклада - дополнить и пояснить замеченные ранее в [3] и [4] недостатки стандарта.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАНДАРТА

Важнейшей целью стандартизации является обеспечение единства измерений (проведение измерений с погрешностью, не превышающей установленные пределы), взаимозаменяемости технических средств. Хотя рассматриваемый стандарт является международным, установление соответствия содержания исследуемого стандарта требованиям отечественного "стандарта для стандартов" [7] может оказаться полезным.

Согласно [7], текст стандарта должен быть "точным, не допускающим различных толкований, логически последовательным, необходимым и достаточным в соответствии с его областью применения...". В стандарт включают: "требования, которые могут быть проверены объективными методами; инструкции (правила), регламентирующие эти методы; ...". Впрочем, "допускается использовать в стандарте для требований и инструкций (правил) повествовательную форму изложения, если из его наименования или заголовков разделов (подразделов) ясно, какие положения стандарта являются требованиями (инструкциями, правилами)." Т.е. существо этих требований – в разделении задающей, определяющей части и проверяющей.

Стандарт [1] внешне имеет такую структуру: определения и набор испытаний. В приложение исследуемого нормативного документа [1] входит также базовая модель, на которой должна быть продемонстрирована осуществимость требований стандарта.

2.1 Определения стандарта

Как и в прежней версии [8], стандарт содержит те же иллюстрации, примеры и формулы, совокупность которых не позволяет однозначно определить метод проецирования входного сигнала в синхрофазор [4]. Но введены определения девиации частоты и скорости изменения

частоты, как производные угла синхрофазора. Дальше по тексту стандарта следует описание процедур проверки. Здесь можно бы и остановиться в анализе этого документа, т.к. базовое понятие – "синхрофазор" - не определено. Это условное понятие невозможно достаточным образом определить элементарно [9], [10].

2.2 Испытания PMU на соответствие

Во введении [1] говорится, что сигнал в реальных условиях эксплуатации PMU может быть сложным, многокомпонентным (например, на шинах питания плавильных печей), и что эти компоненты должны фильтроваться. В версии стандарта 2005 года [8] помеха предполагается любой вне диапазона $f_0 \pm f_s/2$, в современной [1] – только синусоидальной в диапазоне от 10 Гц до $f_0 - f_s/2$ и от $f_0 - f_s/2$ до $2f_0$ (f_0 – номинальная частота сети, f_s – темп передачи синхрофазора).

В старом стандарте [8] точность не зависела от режима испытания: 1% TVE должен был быть обеспечен всегда. Сейчас требования стандарта [1] построены таким образом, что любая динамика полезного сигнала, любое обогащение сигнала (гармониками, интергармониками, свободными колебаниями сети), либо воздействие помехи приводит к ухудшению точности.

Анализируя в [1] состав испытаний PMU на соответствие, можно заметить, что все испытательные сигналы (за исключением ступенчатых), ограничены полосой $f_0 \pm f_s/5$. Такой набор сигналов не является достаточным для однозначной проверки тракта получения синхрофазора [4].

В результате исследования можно сформулировать выводы:

- Точность измерения прибором параметров зависит от вида сигнала
- Частотные характеристики прибора в переходных полосах не покрываются испытаниями
- Приборы подвергаются испытаниям внеполосной помехой только определённых частотных диапазонов
- Приборы класса Р (для защиты) не подвергаются испытаниям внеполосной помехой
- Приборы класса М (для мониторинга) для темпов передачи меньше 10 Гц не подвергаются испытаниям внеполосной помехой

Для пользователей этих приборов это означает:

- Точность измерения параметров PMU зависит от режима работы ЭЭС
- Единство измерений достигается только для ограниченного класса сигналов
- Приборы класса Р (для защиты) не защищены от помех
- Приборы класса М (для мониторинга) защищены только от помех определённых частотных диапазонов
- Приборы класса М при темпах передачи менее 10 Гц не защищены от помех

2.3 Базовая модель

Если принять базовую модель стандарта [1] как дополнение недостаточного определения синхрофазора, обнаруживается, что для класса М она сама не проходит испытания, приведённые в разделе 5.5.Measurement compliance [1].

В базовой модели (рис. С.1, С.2 и С.7 из [1]) основными задерживающими элементами являются низкочастотные (НЧ) фильтры, которых в тракте получения каждого из параметров (синхрофазор, частота и скорость изменения частоты) – два, включённых последовательно. Задержку всего прибора можно снизить, вычислив задержку одного фильтра и помножив её на два (Табл. 1). В свою очередь, задержка симметричного фильтра с конечной импульсной характеристикой длины N , рассчитывается $N/2/f_s$ для частоты дискретизации $f_s=960$ Гц.

Обязательные темпы передачи, Fs	Задержка прибора, мс	
	Требуемая по стандарту	По базовой модели, не менее
10 Гц	500	729
25 Гц	200	292
50 Гц	100	104

Табл. 1: Неудовлетворительное быстродействие базовой модели

Анализ помехозащищённости проще вести в спектральной области. Пусть PMU класса М настроено на темп передачи данных $F_s=50\text{Гц}$. В соответствии с [1] (строка "Out-of-band interference ..." таблицы 3 из п.5.5.5) на вход устройства может поступать симметричный трёхфазный испытательный сигнал, амплитудные спектры входного сигнала по каждой фазе (А, В или С) показан на Рис. 1 а. Часть спектра, относящаяся к полезному сигналу, показана зелёным цветом, а часть спектра, относящегося к помеховому сигналу, показана красным цветом.

Предположим, что в аналоговых трактах каждой фазы, а также при аналого-цифровом преобразовании, сигналы не терпят существенных искажений. Тогда на выходе смесителя фазы А будет комплексный сигнал $C_A(t) + j \cdot S_A(t)$. Спектр этого комплексного сигнала показан на Рис. 1 б. Малиновым цветом показана часть спектра, связанная с удвоенной частотой полезного сигнала. Эта часть – присущее данному способу обработки возмущение.

Далее, в базовой модели этот комплексный сигнал подвергается НЧ-фильтрации $F\{\dots\}$. Цель фильтрации – ослабление возмущающих компонент [1]. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) НЧ-фильтра показана на Рис. 2 а, а комплексный сигнал на его выходе $F\{C_A(t)\} + j \cdot F\{S_A(t)\}$ – на Рис. 2 б. Спектры комплексных сигналов в каналах фаз В и С будут такими же вследствие однотипности обработки.

Далее, в базовой модели вычисляется вектор напряжения прямой последовательности, и по нему вычисляется угол:

$$\hat{\phi}(t) = \text{angle}\left[F\{S_1(t)\}, F\{C_1(t)\}\right].$$

На Рис. 3а показан фрагмент реализации угла синхрофазора прямой последовательности, а на Рис. 3 б – частотный спектр этих колебаний.

В базовой модели [1] частота получается на выходе дифференцирующего фильтра третьего порядка, на вход которого подаётся полученный угол $\hat{\phi}(t)$. Амплитудно-частотная характеристика этого фильтра показана на Рис. 4а сплошной линией. Штрихпунктирной линией показана АЧХ идеального дифференцирующего фильтра. Спектр частоты показан на Рис. 4б.

В свою очередь, скорость изменения частоты в базовой модели получается после прохождения полученной мгновенной частоты через второй дифференцирующий фильтр [1] с АЧХ, показанной на Рис. 5а. В результате, спектр скорости изменения частоты имеет вид, показанный на Рис. 5б.

Далее, частота и скорости изменения частоты подвергаются ещё раз НЧ-фильтрации, в результате чего соответствующие спектры принимают вид Рис. 6.

Прореживание до темпа передачи 50Гц приводит к переносу спектральных линий, так что спектр частоты и скорости изменения частоты приобретёт вид Рис. 7 (а и б соответственно). Пунктирной линией синего цвета показан уровень помехи, допустимый по стандарту. Видно, что по критериям ошибки частоты и ошибки скорости изменения частоты базовая модель [1] не удовлетворяет требованиям стандарта (таблица 4 из [1]). Поэтому эта базовая модель не выполняет своё предназначение.

Синхрофазор прямой последовательности, вычисленный в одноимённом блоке на рис.2, будет иметь спектральный состав, показанный на Рис. 8 а, а после прореживания до темпа передачи 50Гц – показанный на Рис. 8 б. Пунктирной линией синего цвета показан уровень

помехи, допустимый по стандарту. Видно, что по критерию общей векторной ошибки (TVE) базовая модель удовлетворяет требованиям стандарта (таблица 3 из [1]).

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вышеизложенное позволяет заключить:

- Стандарт C37.118-2011 не обеспечивает единство измерений синхронизированных векторных параметров электрического режима
- Использование приборов, изготовленных в соответствии с этим стандартом, требует глубокого понимания их особенностей, в частности – учёта их очень условной помехоустойчивости
- Разработчики приборов PMU должны снабжать свои приборы документацией, восполняющей пробелы стандарта

Устранив замечания, изложенные в этой работе, а также используя результаты [3], [4], [9], можно переписать стандарт до достижения единства измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] C37.118.1-2011 - IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.
- [2] C37.118.2-2011 - IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems.
- [3] Покидышев А.Н., Башляев А.И. Технология векторного измерения параметров электрического режима на основе синхронных измерений // Труды научно-практической конф. "Метрология в современной электроэнергетике". (21 февраля) Москва, 2012 <http://www.ec-mc.ru/conference/materials/>
- [4] Покидышев А.Н. Технология измерения синхронизированных векторных параметров электрического режима // Сборник докладов XXI конференции "Релейная защита и автоматика энергосистем", Москва, 29-31 мая 2012 г.
- [5] Innocent Kamwa, S. M. Samantaray, Geza Joos. Compliance analysis of PMU Algorithms and Devices for Wide-Area Stabilizing Control of Large Power Systems // IEEE Transactions on Power Systems. Vol. PP, Issue 99, P.1-13.
- [6] Andrew J. Roscoe, Ibrahim F. Abdulhadi, Graeme M. Burt. Filters for M class Phasor Measurement Units // 2012 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (26-28 Sept.2012). P.1-6
- [7] ГОСТ Р 1.5–2002. ГСС РФ. Стандарты. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению
- [8] C37.118-2005 - IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.
- [9] Системы мониторинга переходных режимов в операционной зоне Филиала ОАО "СО ЕЭС" ОДУ Северо-Запада на базе модернизированного цифрового регистратора аварийных процессов (заключительный отчёт). Научно-технический отчёт о НИР. СПб: ООО "ПАРМА", 2011
- [10] Покидышев А.Н., Казаков П.Н. Анализ требований стандарта C37.118 // Сборник докладов 3-ей Международной науч.-тех. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», Санкт-Петербург, 30 мая – 3 июня 2011 г.

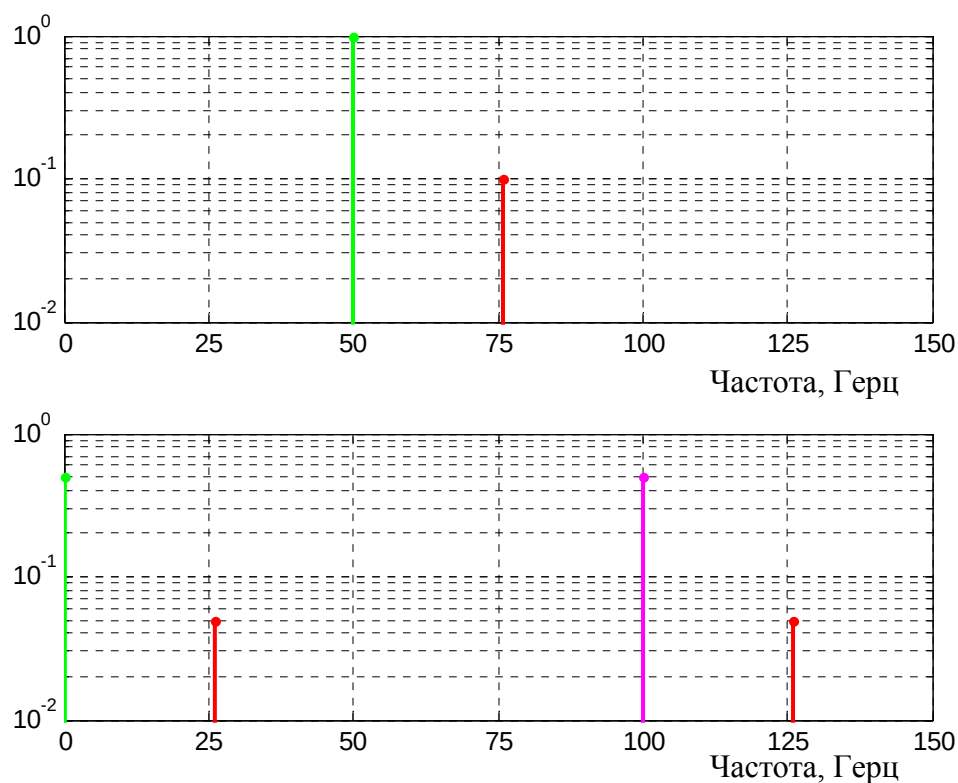


Рис. 1: Амплитудные спектры: а) входного сигнала, б) комплексного сигнала после смесителя

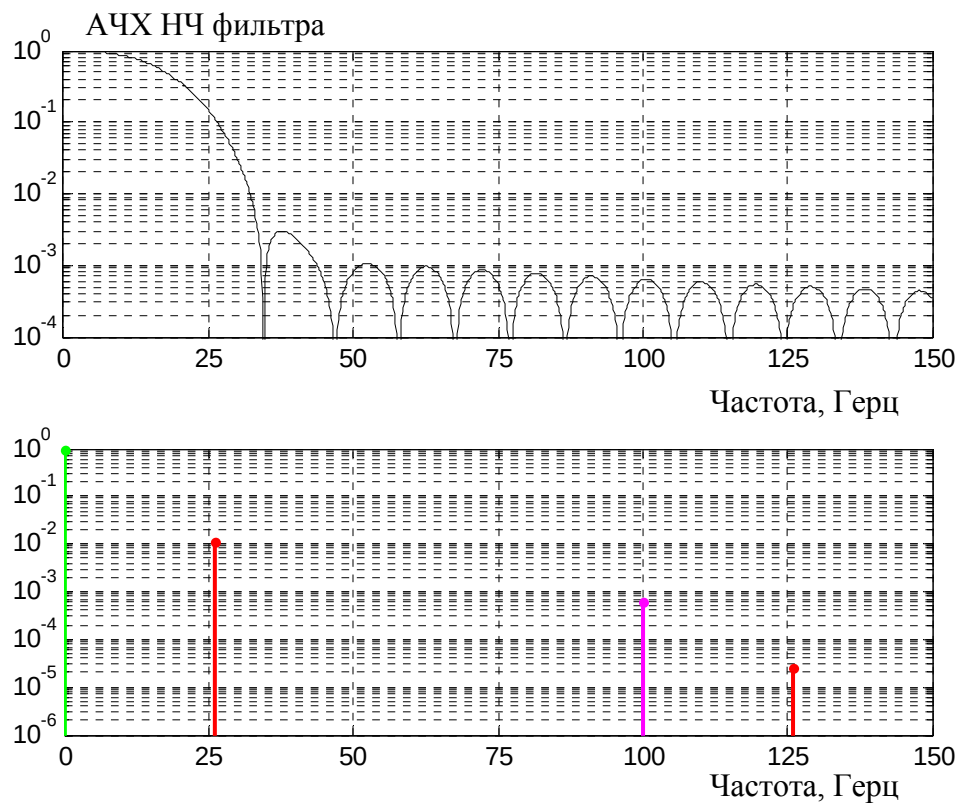


Рис. 2: а) АЧХ НЧ-фильтра, б) Амплитудный спектр сигнала после смесителя и НЧ-фильтрации

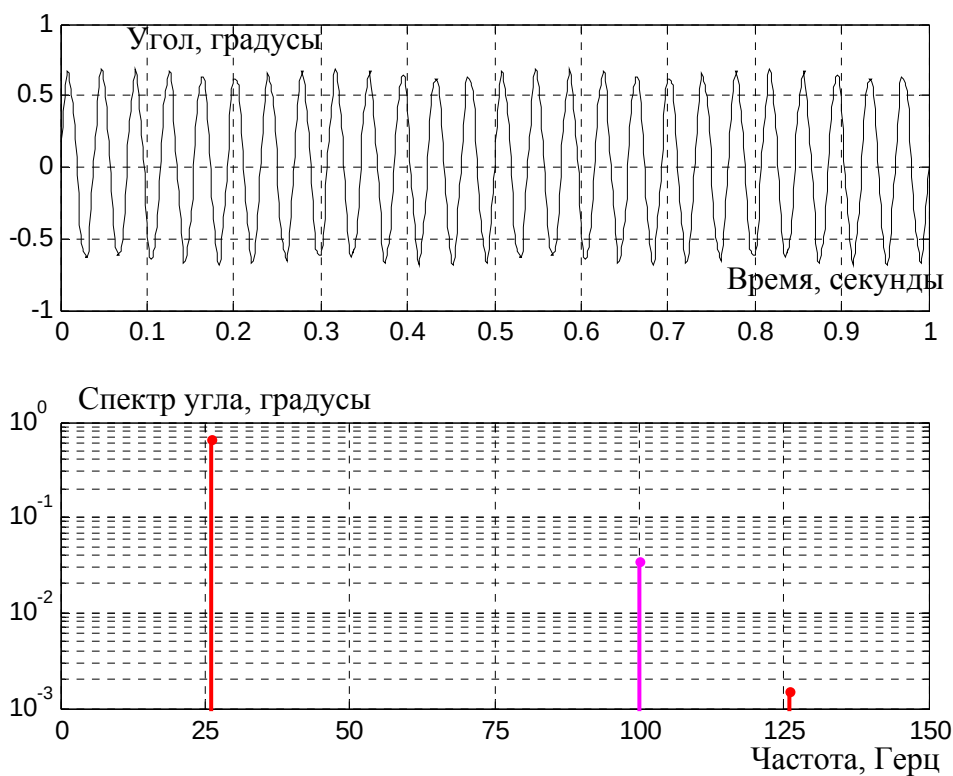


Рис. 3: а) Фрагмент реализации колебаний угла синхрофазора; б) Спектр колебаний угла синхрофазора после первого НЧ-фильтра

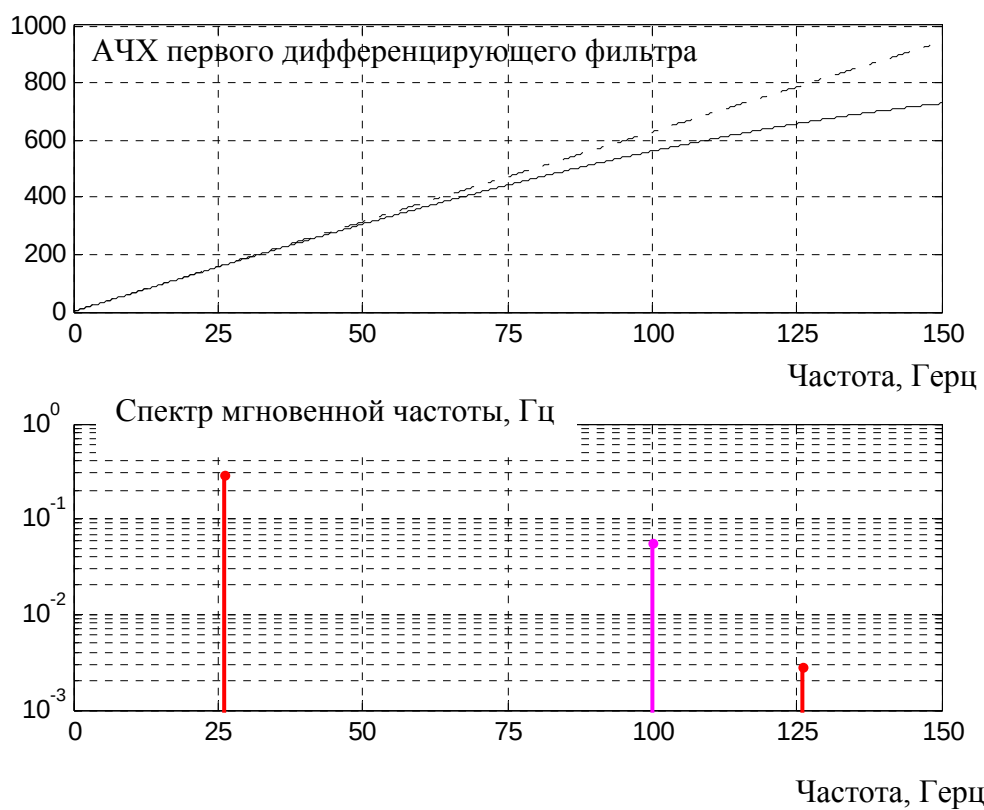


Рис. 4: а) АЧХ дифференцирующего 1-го фильтра, б) Спектр мгновенной частоты до НЧ-фильтра

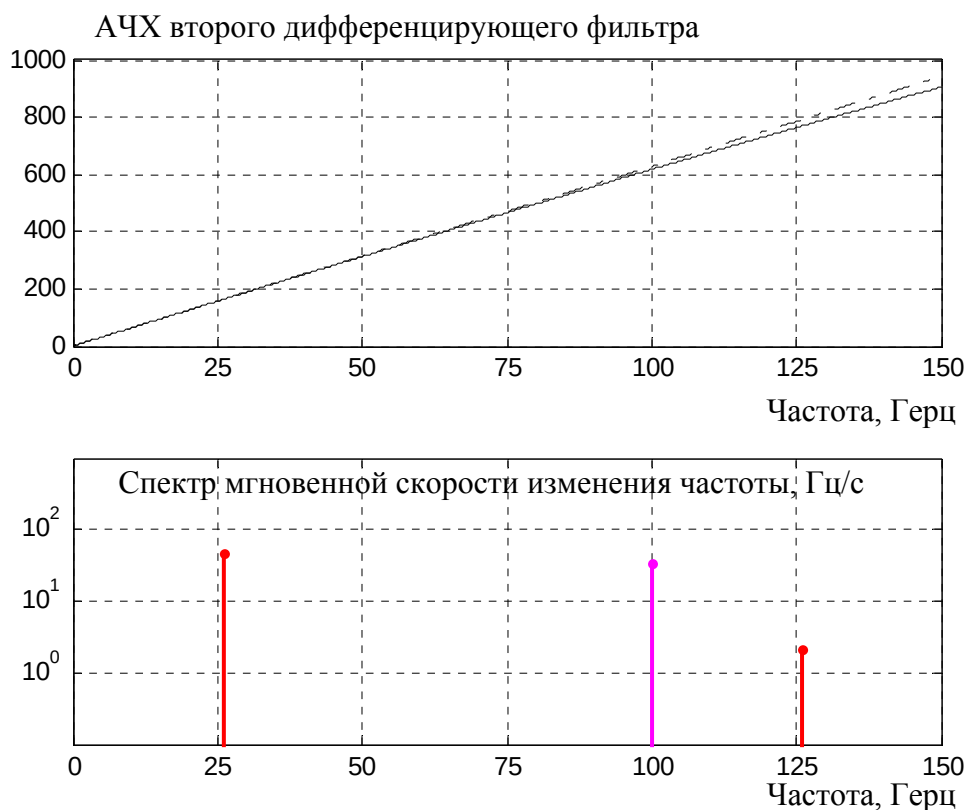


Рис. 5: а) АЧХ 2-го дифференцирующего фильтра, б) Спектр скорости изменения частоты до НЧ-фильтра

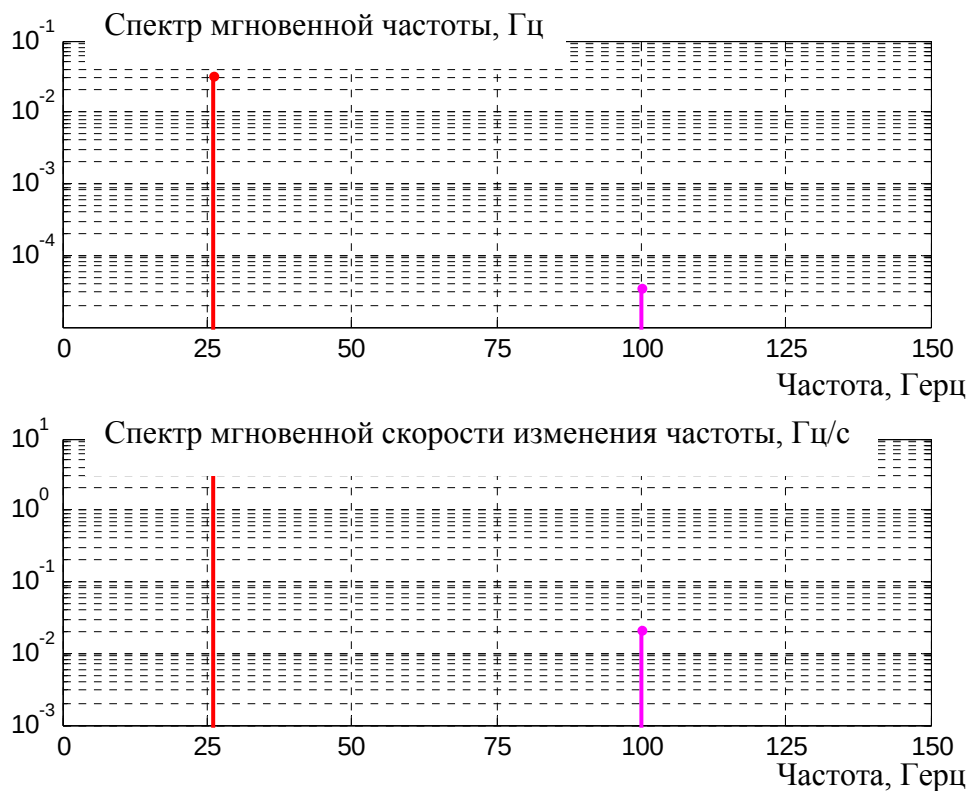


Рис. 6: Спектры после НЧ-фильтра, мгновенных: а) частоты, б) скорости изменения частоты

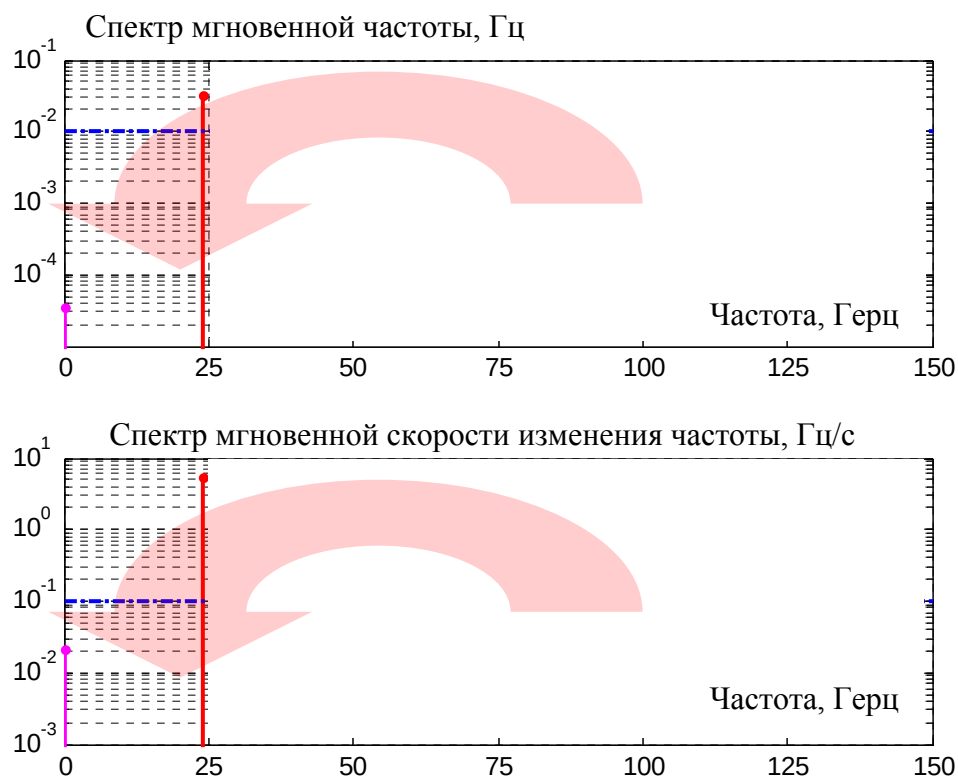


Рис. 7: Спектры мгновенных, после прореживания: а) частоты, б) скорости изменения частоты

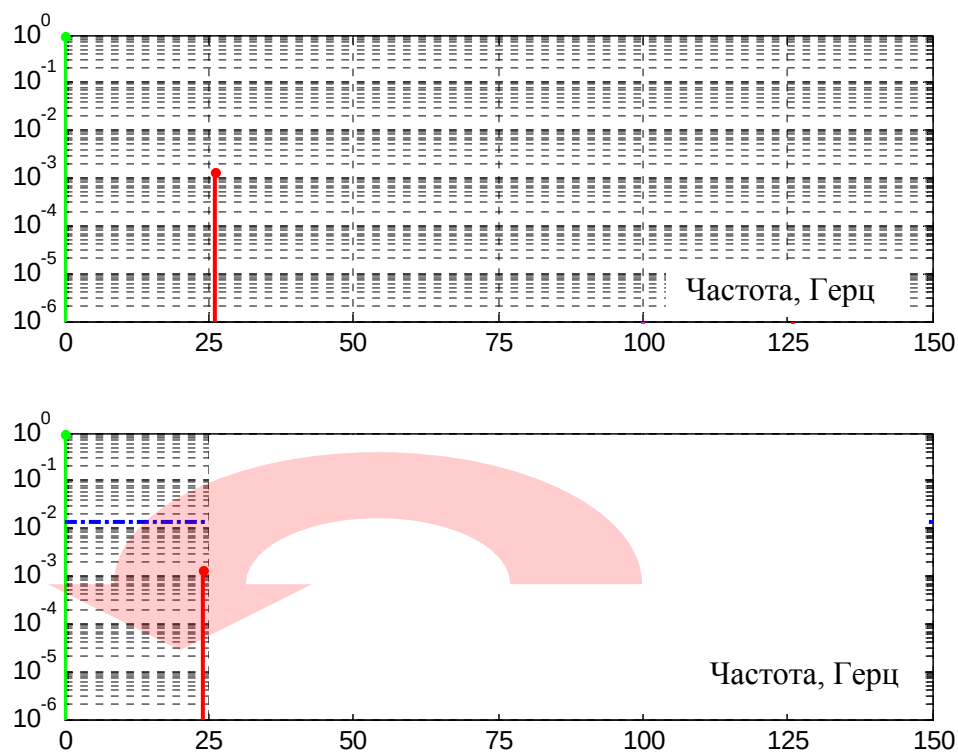


Рис. 8: Спектры синхрофазора: а) после второго НЧ-фильтра, б) после прореживания