



PS5 – S6-06



Анализ требований стандарта С37.118

А.Н. ПОКИДЫШЕВ¹, П.Н. КАЗАКОВ²
ООО «Парма»¹, ЗАО «РТСофт»²
Россия
pan@parma.spb.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

PMU, синхрофазор, С37.118, требования стандарта, испытания на соответствие.

1 ВВЕДЕНИЕ

В связи с широким распространением технологии WAMS в электроэнергетике все больше компаний предлагают на рынок собственные устройства для векторных измерений – PMU. В то же время нормативная база для создания PMU недостаточно проработана. Принятый стандарт С37.118-2005 [2] оказывается на практике бесполезным для разработчиков аппаратуры, поскольку не специфицирует характеристики PMU при динамических сигналах. Кроме того, он содержит в себе противоречивое (невыполнимое) требование для реального прибора. В докладе производится анализ существующего стандарта и проекта новой редакции стандарта С37.118 с точки зрения разработчиков PMU, а также даются некоторые замечания и предложения по его дополнению.

В первой части работы приводится замечание по существующему стандарту на векторные измерения. Затем обсуждается проект новой версии стандарта [1]. К нему формулируются замечания и предложения. В приложение помещено исследование свойств мгновенной частоты и скорости изменения частоты, на результаты которого в основном тексте делаются ссылки.

2 ЗАМЕЧАНИЕ ПО УТВЕРЖДЁННОМУ СТАНДАРТУ С37.118-2005

Рассмотрим требования действующего стандарта С37.118-2005 с формальной точки зрения. В разделе 5.3, таблица 3 [2] приведены условия испытаний прибора на соответствие стандарту. Рассмотрим требования для уровня соответствия 1. На странице 9 первый абзац сверху [2]: "Effects of the influence quantities shall be considered cumulative, and the TVE shall not exceed the error listed for the given compliance level under any combination of influence quantities shown in Table 3." Это, в частности, означает, что, наряду с сигналом частоты $F_{nominal} + 5\text{Гц}$, на вход прибора может поступать сигнал с частотой, на бесконечно малую величину отличающуюся от $F_{nominal} + F_s/2$ (out-of-band interfering signal). При $F_s = 10\text{Гц}$ (из ряда темпов передачи, которые должен обязательно поддерживать стандартный PMU) - это $F_{nominal} + 5\text{Гц}$. Таким образом, при испытаниях создаются условия, которые не может пройти никакой прибор. Никакой канал измерения не сможет разделить "полезный сигнал" и "помеховый сигнал", бесконечно близко находящийся к нему по частоте (см. например на стр.68-69 в [3]).

3 ОБСУЖДЕНИЕ ПРОЕКТА СТАНДАРТА

3.1 Определение синхрофазора. Формирование требований

Рассмотрим свойства преобразования входного непрерывного сигнала в синхрофазор. Реальная и мнимая компоненты синхрофазора входят в принимаемый сигнал линейно:

$$x(t) = X_r(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) - X_i(t) \cdot \sin(2\pi f_0 t).$$

Линейный тракт преобразования можно задать разными (эквивалентными) способами. Например, в частотной области - парой частотных характеристик АЧХ и ФЧХ. Или, во временной области: либо импульсной функцией, либо переходной характеристикой. Таким образом, ничего сверх ЧХ, или импульсной функции, или переходной характеристики не требуется для однозначного задания канала преобразования непрерывного сигнала в синхрофазор.

Для того, чтобы отсутствовали наложения, синхрофазор должен быть сформирован из части электрического сигнала, ограниченного в частотной полосе шириной F_s (темп передачи сообщений) и с центром в номинальной частоте системы f_0 , т.к. синхрофазор получается проецированием на эту опорную частоту (см. рис.1). Составляющие спектра непрерывного сигнала из областей, окрашенных в красный цвет, не должны оказывать (заметного) влияния ни на измерения синхрофазора, ни на частоту, ни на скорость изменения частоты.

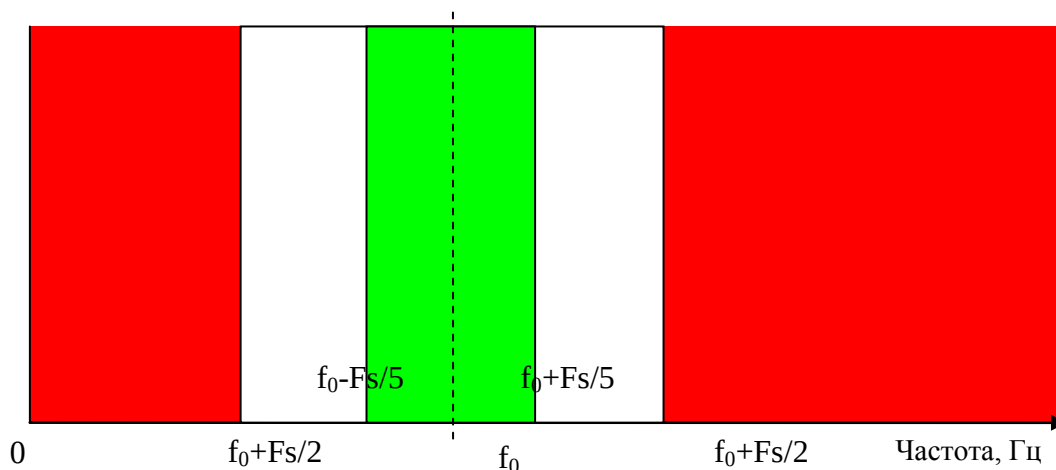


Рис. 1: Частотные области спектра непрерывного сигнала и передаточной функции PMU

На практике невозможно осуществить частотную избирательность с полным подавлением частей внутри областей подавления и неискажённой передачей оставшейся части сигнала. Кроме того, невозможно практически осуществить прямоугольные границы между полосами подавления и пропускания [3]. Поэтому разработчики стандарта подразумевают тщательное тестирование частотных характеристик (ЧХ) прибора в относительно узкой окрестности номинальной частоты (зелёная область на рисунке 1): см. [1], п.5.5.3, строка для Signal frequency range; Modulation frequency range в таблице 5; п.5.5.5, Ramp range в таблице 7. А также тщательное тестирование АЧХ в области подавления - [1] таблица 4, строки Harmonic Distortion и Out-of-band interference.

Для разработчиков было бы удобнее иметь спецификации на тракт канала преобразования либо только во временной, либо только в частотной области. Но в стандарте приведены требования и к ЧХ, и к переходной характеристике, и к функциям от временных откликов, которые получены в ответ на непрерывные сигналы специальной формы.

3.2 Требования для достижения унифицированного прибора

Однозначно в частотной области тракт преобразования можно было бы задать, например, следующим образом:

- I. АЧХ в зоне пропускания должна быть постоянна.
- II. ФЧХ в зоне пропускания должна быть линейна.
- III. Форма АЧХ в переходных зонах должна быть задана в стандарте.

IV. ФЧХ в переходной зоне должна быть задана либо линейной, либо её ход должен быть описан.

Характеристики (I-IV) должны быть заданы с точностью, обеспечивающей ограничение погрешностей в заданных пределах для синхрофазора, частоты и скорости измерения частоты.

I. АЧХ в зоне подавления должна гарантировать такое подавление, чтобы составляющие спектра непрерывного сигнала из этих зон не оказывали заметного влияния ни на синхрофазор, ни на частоту, ни на скорость изменения частоты.

ФЧХ в зонах подавления не имеет значения.

3.3 Анализ испытаний, проводимых по стандарту

В предыдущих пунктах была обоснована достаточность тестирования ЧХ для проверки соответствия прибора. Проанализируем, насколько тесты стандарта покрывают тестированием выделенные области (полнота). И насколько они дублируют друг друга (избыточность).

Испытания стационарными сигналами описаны в п.5.5.3 [1]. Испытания чистыми синусоидальными сигналами похожи на снятие АЧХ и ФЧХ: задаётся синусоида, на выходе получается её амплитуда и фаза. Таким образом тестируются ЧХ в полосе пропускания. При испытаниях с участием гармоник или внеполосной помехи, по измеренным TVE, а также FE и RFE (см. Приложение) можно судить о достаточности величины подавления этих «возмущений» в областях подавления (см. рис.1).

Испытания модулированными сигналами даны в п.5.5.4 [1]. Сигнал с фазовой модуляцией и сигнал с амплитудно-фазовой модуляцией имеют бесконечный дискретный спектр, часть спектра попадёт в полосу подавления. Поэтому этот сигнал будет незначительно искажён в синхrofазорном представлении, и в большей степени, если больше частота модуляции. Но ощутимей будет искажена частота, и больше - скорость изменения частоты такого сигнала. Этот эксперимент дублирует тестирование ЧХ при испытаниях стационарными сигналами.

Испытания линейно частотно-модулированными (ЛЧМ) сигналами описаны в п.5.5.5 [1]. Спектр ЛЧМ сигнала $x(t) = X_m \cos[\omega_0 t + \pi R_f t^2]$, в котором мгновенная частота меняется за время наблюдения в диапазоне от 50 ± 5 Гц со скоростью $R_f = 1$ Гц/с, показан на рис.2. Такой сигнал тестирует ЧХ сразу во всей полосе пропускания. Этот эксперимент дублирует испытания РМУ стационарными сигналами в полосе пропускания, но не охватывает тестированием ЧХ в области подавления.

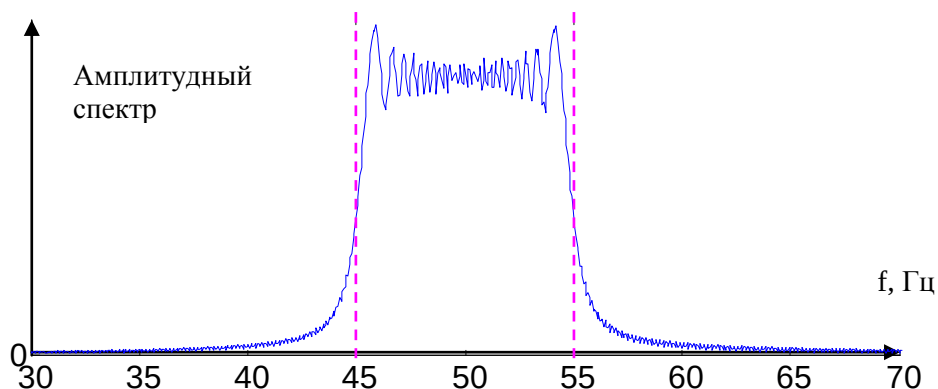


Рис. 2: Форма спектра ЛЧМ-сигнала

Испытания ступенчатыми воздействиями описаны в п.5.5.6 в [1]. Ступенчатые воздействия имеют широкий спектр. Ступенчатое воздействие по фазе интенсивней, чем спектр ступенчатого воздействия по амплитуде. Поэтому тестирование сигналом ступенчатым воздействием по амплитуде можно исключить из списка испытаний. Переходный процесс как отклик на ступенчатое воздействие подходит для исследования соответствия ЧХ в переходной области. Но в стандарте контролируется не вся переходная характеристика, а набор её

параметров. Остаётся непояснённым вопрос о достаточности заданных в стандарте ограничений на эти параметры для определения ЧХ в переходной зоне однозначно (с нужной точностью) и об их непротиворечивости другим требованиям.

3.4 Свойства синхрофазоров

Принципиально, что синхрофазор – условное понятие (и величина), т.к. требует договорённости о процедуре его получения. Синхрофазор формируется из части широкополосного электрического сигнала энергосистемы: если интергармоника (часть сигнала энергосистемы) попала в полосу пропускания – то она участвует в формировании синхрофазора. Если она попала в полосу подавления – она относится к помехе. Если же она попала в переходную полосу, тогда: каков её вклад в синхрофазор – определяется договорённостью.

На синхрофазор не влияют гармоники и интергармоники с частотами вне диапазона $F_{\text{nominal}} \pm F_s/2$. НЧ части при малых F_s не попадают в этот диапазон пропускания, и соответственно не влияют на синхрофазор. Например, влияние аperiodических составляющих будет либо подавлено, либо искажено (в зависимости от темпа передачи F_s); а влияние свободных составляющих с собственными частотами выше $F_{\text{nominal}} + F_s/5$ будет также либо искаженным, либо подавленным.

При увеличении темпа передачи вплоть до $2 \cdot F_{\text{nominal}}$, можно охватить и НЧ область. Но здесь следует учитывать особенности синхрофазорного представления: НЧ медленно изменяющиеся компоненты станут быстро осциллирующими в синхрофазоре!

3.5 Замечания по проекту стандарта

В этом пункте сформулированы замечания к пунктам проекта стандарта [1]:

- a. В пункте 4.3 [1] оценивается влияние флуктуаций частоты дискретизации на погрешность в измерении частоты. При оценивании не учитывается, что мгновенная частота сигнала может иметь выбросы, намного превосходящие номинальную частоту по величине (см. Приложение).
- b. Из п. 5.4.1 в [1]: "Note that rates lower than 10/s are not subject to dynamic requirements ...". Это означает, что измерения класса М с темпами передачи меньше 10Гц требуется производить со спецификациями класса Р.
- c. В пункте 5.5.3, в таблице 3 [1] задаётся диапазон "Signal frequency range" для "Performance class M": " $\pm 2.0 \text{ Hz for } F_s < 10$ ". Очевидно несоответствие полосы системы и частоты сигнала для $F_s < 5\text{Гц}$. Пример: Пусть $F_s = 1\text{Гц}$. Тогда однозначно (без эффекта "наложения спектров") можно измерить только в диапазоне $f_0 \pm 0.5\text{Гц}$. А в стандарте – разрешается задать сигнал любой частоты из диапазона $f_0 \pm 2\text{Гц}$.
- d. Приборам класса точности Р разрешено иметь aliasing в измерениях. Это, однако, должно повлечь для этого класса приборов ужесточение требований к синхронизации и к ЧХ. Если не специфицировать частотные характеристики канала, то произвол разработчика относительно даже только одного параметра ЧХ - верхней частоты пропускания прибора будет и произволом в результатах прибора.
- e. В этом же пункте 5.5.3 [1], в таблице 4 задаются погрешности для частоты и скорости изменения частоты для стационарных условий испытаний. Для строк, относящихся к "Harmonic distortion" и для столбца "Error Requirements for compliance" для "Class M" для $20 \text{ Гц} < F_s \leq 60 \text{ Гц}$: $\text{RFE} = 6 \text{ Hz/s}$, а для $F_s \leq 20\text{Гц}$: $\text{RFE} = 2 \text{ Hz/s}$. Притом, что на входе задаётся сигнал со скоростью изменения частоты 1Гц/с. Неужели требуются измерения с такой огромной погрешностью? Другие примеры: В пункте 5.5.4, при испытаниях модулированными сигналами, TVE поднимается до 3%. Точность определения частоты ухудшается до 0.3 Гц для $20\text{Гц} < F_s \leq 60\text{Гц}$ и до 0.06 Гц для $F_s \leq 20\text{Гц}$. А точность определения скорости изменения частоты ухудшается до 30 Hz/s (!) для $20\text{Гц} < F_s \leq 60\text{Гц}$ и до 2 Hz/s для $F_s \leq 20\text{Гц}$!
- f. Испытания специальными сигналами во многих экспериментах [1] приводят к тому, что погрешность возрастает. Обычно же требования к прибору формулируются так, чтобы прибор гарантировал устойчивость характеристик при разных условиях.
- g. Многие испытания [1] проходят без помехового воздействия гармоник и интергармоник. Например, испытания модулированными сигналами. Но отсутствие гармоник и интергармоник в реальном сигнале – это, скорее, исключение.

- h. В п.5.5.5 [1] в испытательных сигналах образуются ступенчатые изменения частоты. Задаются в качестве требований также и время, в течение которого прибор должен отработать эти возмущения ("transition time"). " Note that the allowed TVE, FE, and RFE may be exceeded during a "transition time" after a sudden change is made to the signal frequency." И в таблице 8 задаётся максимальное допустимое "transition time". По мнению экспертов ступенчатых изменений частоты не бывает в электроэнергетике.
- i. В определении максимального перерегулирования ([1], рисунок 3) присутствует только величина положительного выброса (около установившегося значения). Выброс может быть также и около первоначального значения (отрицательный выброс). Можно ограничить область допустимых значений переходной функции также и снизу.
- j. На рисунках С.2 и С.7 [1] - неверный порядок получения прореженных частоты и скорости изменения частоты. Частота фильтрованного синхрофазора – не то же самое, что фильтрованная частота синхрофазора. Фильтрация дискретных рядов частоты, и скорости изменения частоты (для прореживания) не имеет смысла. На рисунке С.7 правильно показано, что перед децимацией надо фильтровать реальную и мнимую часть синхрофазора. Но, затем, нужно получить из фильтрованных реальной и мнимой части синхрофазора фазу, затем, дифференцируя её – получить частоту и скорость изменения частоты. С учётом задержки дифференцирующих фильтров выровнять полученные потоки и проредить их. Должно быть, в этом одна из причин ослабленных требований по частоте и по скорости изменения частоты в [1].
- k. Возможность создания прибора по "Reference model" не проверена в разделе С4 [1]. Ниже приводится таблица С1 из стандарта [1], дополненная вспомогательными полями – это таблица 1. Почти все рекомендованные фильтры не удовлетворяют требованию стандарта по допустимой задержке. Стандарт требует $(2-3)/F_s$ для всего прибора (последняя графа в таблице), а данные симметричные КИХ-фильтры имеют задержку не меньшую только для данного фильтра, приведённую в предпоследнем столбце таблицы 1. Кроме того, параметры некоторых фильтров не удовлетворяют требованиям стационарного теста стандарта ([1], п.5.5.4). В таблице 1 отмечены жёлтым такие параметры, с которыми фильтр явно не будет удовлетворять стандарту. "Cutoff frequency" – частота, на которой АЧХ равна 0.707. Следовательно, она не может быть меньше, чем диапазон для частоты в таблице 3 из [1].

Reporting Rate F_s		Cutoff Frequency F_{cutoff}	Passband (lesser of $F_s/5$ or 5Hz)	Filter Order N	Only LP filter latency, $(N/2)/f_s$	Required PMU reporting latency, $3/F_s$
50 Hz	10	1.920Hz	2	700	0,364583	0,3
	25	4.800Hz	5	280	0,145833	0,12
	50	8.850Hz	5	100	0,052083	0,06
	100	16.000Hz	5	44	0,022917	0,03
60Hz	10	1.920Hz	2	794	0,413542	0,3
	12	2.304Hz	2.4	660	0,34375	0,25
	15	2.880Hz	3	528	0,275	0,2
	20	3.840Hz	4	396	0,20625	0,15
	30	5.616Hz	5	238	0,123958	0,1
	60	10.320Hz	5	96	0,05	0,05
	120	18.960Hz	5	40	0,020833	0,025

Табл. 1: Таблица проекта стандарта с характеристиками фильтра, дополненная вспомогательными столбцами

4 ПРЕДЛОЖЕНИЯ В ПРОЕКТ СТАНДАРТА

4.1 Переформулировка требований

Требования к унифицированному прибору можно составить, выполнив следующее.

Точности синхрофазора, частоты и скорости изменения частоты можно пересчитать в требования к описанным в п. 0 ЧХ и к точности синхронизации по времени.

ЧХ для требований стандарта нужно сразу сформировать таким образом, чтобы переходная характеристика (во времени) обладала необходимыми свойствами. Требование по задержке однозначно определяет максимальную крутизну ФЧХ в области пропускания.

При формулировании требований к форме ЧХ следует учитывать, что в формировании формы ЧХ участвует наряду с цифровой и аналоговая часть. Необходимо убедиться в технической реализуемости требований канала.

Для того, чтобы добиться устойчивых точностей оценивания частоты, ЧХ в области подавления должны падать не медленнее, чем обратно пропорционально частоте, а для устойчивости оценки скорости изменения частоты нужно, чтобы ЧХ в области подавления падали не медленнее, чем по закону обратного квадрата частоты (см. Приложение).

Формулы (2) и (3) полезны при оценке требований к подавлению составляющих сигнала из области подавления. Пусть первая синусоида в (1) – это интересная часть сигнала, а вторая синусоида – это часть сигнала, которая не должна участвовать в синхрофазоре. Можно найти её вклад в искажение оценки мгновенной частоты. И через это – рассчитать необходимое подавление для достижения заданной точности частоты или скорости изменения частоты.

Требование к точности синхронизации рассчитывается на основе заданных максимальной скорости изменения сигнала, максимальной скорости изменения частоты и максимальной второй производной частоты. Флуктуации параметра прямо пропорциональны флуктуациям момента выборки через эти производные, как коэффициент пропорциональности. Для расчёта можно использовать соотношения, полученные в Приложении.

4.2 Методика испытаний

Для того, чтобы проверить канал преобразования непрерывного сигнала в синхрофазор, достаточно убедиться в достаточной синхронизации измерений и проверить точность реализации прибором ЧХ.

Подход к анализу на соответствие прибора стандарту в нынешней версии проекта стандарта [1] предлагает для проверки РМУ набор сигналов, являющихся обобщениями сигналов из реальной электроэнергетической практики.

Длительность, сложность испытаний можно существенно сократить, если придерживаться другого подхода: Тестировать прибор не "обобщёнными" сигналами, а сигналами, которые бы могли протестировать ЧХ прибора за минимальное число экспериментов и оценить характеристику флуктуаций периодов выборки.

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе сформулированы замечания к утверждённому стандарту и к новейшей редакции проекта стандарта. Также даны рекомендации по улучшению стандарта.

Используя результаты, изложенные в докладе, и развиг приведённый здесь подход, можно записать требования для стандарта, которые бы позволили разрабатывать унифицированные приборы.

Для завершения работы необходима проверка соответствия формулируемых требований условиям эксплуатации РМУ. Такие условия могут быть созданы, например, на электродинамической модели НИИПТ.

ПРИЛОЖЕНИЕ.

СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА ВОЗМОЖНОЙ ДИНАМИКИ ПРОИЗВОДНЫХ ФАЗЫ И ДЛЯ РАСЧЁТА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИХ ОЦЕНИВАНИЯ

Пусть входной сигнал представляет собой сумму двух синусоид с круговыми частотами ω_1 и $\omega_2 = \omega_1 + \Lambda$, а между частотой первой синусоиды и номинальной частотой сети имеется соотношение $\omega_1 = \omega_0 + \Theta$. Тогда входной непрерывный сигнал можно записать:

$$x(t) = a_1 \cdot \cos((\omega_0 + \Theta)t + \varphi_1) + a_2 \cdot \cos((\omega_0 + \Theta + \Lambda)t + \varphi_2). \quad (1)$$

Разложив его на проекции опорного сигнала номинальной частоты, можно найти компоненты синхрофазора:

$$\begin{aligned} X_r(t) &= a_1 \cdot \cos(\Theta t + \varphi_1) + a_2 \cdot \cos((\Theta + \Lambda)t + \varphi_2), \\ X_i(t) &= a_1 \cdot \sin(\Theta t + \varphi_1) + a_2 \cdot \sin((\Theta + \Lambda)t + \varphi_2) \end{aligned}$$

Рассмотрим сначала случай равенства амплитуд входящих синусоид $a_1 = a_2 = a$. Тогда, представим компоненты синхрофазора в виде:

$$\begin{aligned} X_r(t) &= a \cdot 2 \cdot \left(\cos\left(\Theta t + \frac{\Lambda t + \varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{-\Lambda t + \varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \right), \\ X_i(t) &= a \cdot 2 \cdot \left(\sin\left(\Theta t + \frac{\Lambda t + \varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{-\Lambda t + \varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \right). \end{aligned}$$

Видно, что в моменты времени, когда аргумент косинуса равен $\pi/2 + \pi k$, $k \in \mathbb{Z}$, и реальная и мнимая части становятся вместе нулями. Т.е. это событие повторяется с периодом $2\pi/\Lambda$. График сигнала (1) в окрестности такого момента времени приведён на рисунке 3. Видно, что если внутри интервалов 0.44–0.46, 0.46–0.48 и 0.48–0.50 с сигнал имеет некоторую первоначальную фазу, то в интервалах 0.50–0.52, 0.52–0.54 и 0.54–0.56 - уже противоположную.

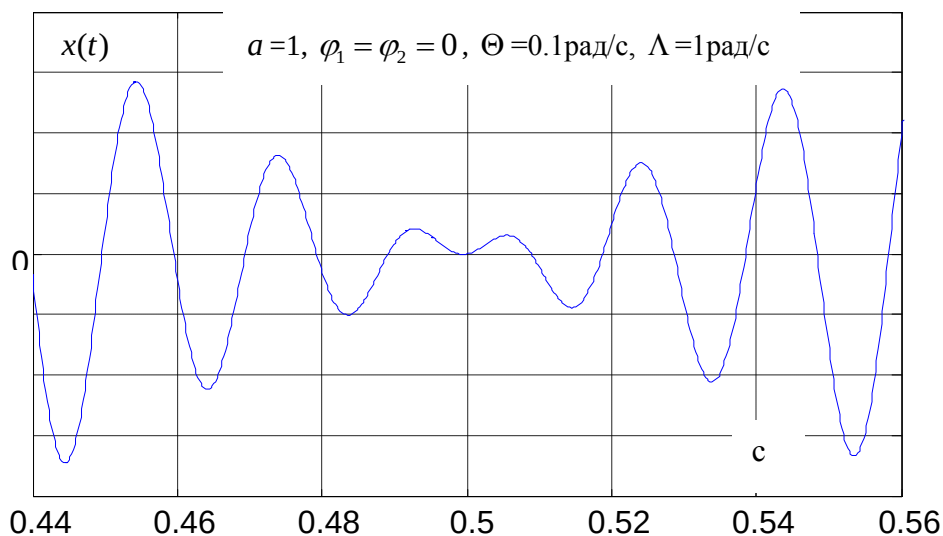


Рис. 3: Ступенчатое изменение фазы в непрерывном узкополосном сигнале

Сигнал непрерывен, квадратуры – тоже, а фаза испытывает ступенчатое изменение на 180 градусов. Естественно, частота в этот момент времени терпит выброс бесконечной величины и мгновенной длительности. Сигнал, состоящий из двух почти одинаковых по амплитуде синусоид, в электроэнергетике по-видимому редкость. Гораздо более вероятны сигналы с неравными по амплитуде синусоидами. Тогда фаза сигнала не терпит разрыва, а частота имеет выброс конечной величины и конечной длительности. После дифференцирования и упрощений получится:

$$\omega(t) - \omega_0 = \frac{\Theta + d \cdot (2\Theta + \Lambda) \cdot \cos(\Lambda t + \varphi_2 - \varphi_1) + d^2 \cdot (\Theta + \Lambda)}{1 + 2 \cdot d \cdot \cos(\Lambda t + \varphi_2 - \varphi_1) + d^2},$$

где $d = a_2 / a_1$. На рисунке 4 сверху приведён график мгновенной частоты для двух значений $d : 0.1$ и 0.01 (для простоты взято $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, $\Theta = 2\pi \cdot 0.1$ рад/с, а $\Lambda = 2\pi \cdot 1$ рад/с).

Мгновенная частота при малых d флуктуирует около частоты $\omega_0 + \Theta$ по почти синусоидальному закону:

$$\omega(t) - \omega_0 \approx d \cdot (2\Theta + \Lambda) \cdot \cos(\Lambda t + \varphi_2 - \varphi_1). \quad (2)$$

Здесь важно отметить прямую пропорциональность амплитуды флуктуаций от расстояния между составляющими сигнал $x(t)$ синусоидами по оси частот.

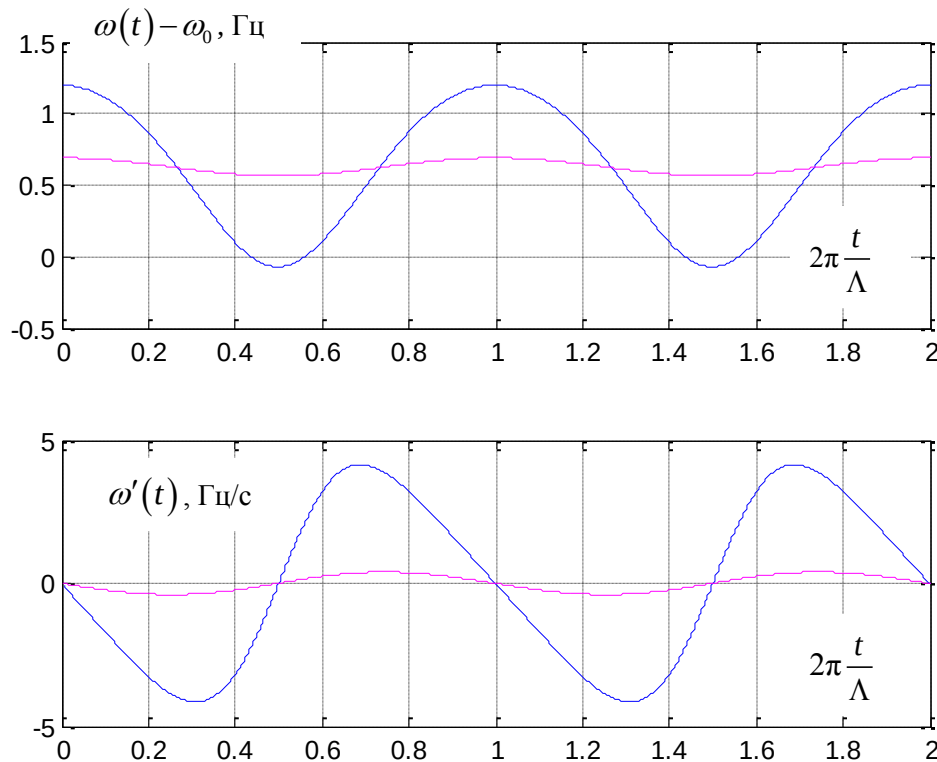


Рис. 4: Мгновенные частота и скорость изменения частоты

Поскольку Θ ограничена частотным диапазоном сигнала, то этот вклад в оценку частоты ограничен. А вот вклад, зависящий от расстояния между синусоидами Λ , линейно и неограниченно растёт с увеличением Λ .

Рассмотрим теперь вклад второй гармоники из (1) в величину мгновенной скорости изменения частоты. Проведя дифференцирование и упрощение, получим

$$\omega'(t) = \frac{(d^2 - 1) \cdot d \cdot \Lambda^2 \cdot \sin(\Lambda t + \varphi_2 - \varphi_1)}{(1 + 2 \cdot d \cdot \cos(\Lambda t + \varphi_2 - \varphi_1) + d^2)^2}.$$

На рисунке 4 снизу приведён график скорости изменения частоты за два периода $2\pi/\Lambda$ при тех же параметрах, что и график частоты.

При малых d флуктуации скорости частоты стремятся к синусоидальным:

$$\omega'(t) \approx -d \cdot \Lambda^2 \cdot \sin(\Lambda t + \varphi_2 - \varphi_1). \quad (3)$$

Эта приближённая формула позволяет увидеть квадратичную пропорциональность амплитуды флуктуаций от расстояния между синусоидами по оси частот.

Уместно заметить, что влияние перескоков фаз изучены для узкополосных случайных процессов [4], и для гауссовского узкополосного процесса дисперсия частоты не существует (равна бесконечности).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] PC37.118.1. Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. Draft 2.4. (C37.118-1_Draft 2.4.doc).
- [2] IEEE Std C37.118™-2005. IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.
- [3] Финк Л. М. Сигналы, помехи, ошибки ... Заметки о некоторых неожиданностях, парадоксах и заблуждениях в теории связи. М.: Радио и связь, 1984.
- [4] Тихонов В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов. – М.: Радио и связь, 1986.