

Методика сертификационных испытаний УСВИ

1. Область применения

Настоящая Методика должна применяться при проведении сертификационных испытаний УСВИ для проверки соответствия погрешностей измерений УСВИ указанного заявителем класса требованиям стандарта организации АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.020.011-2016 «Релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования» (далее – Стандарт).

2. Этапы подготовки и проведения сертификационных испытаний УСВИ

Сертификационные испытания УСВИ проводятся с использованием тестовой схемы, включающей программно-аппаратный комплекс моделирования энергосистем в режиме реального времени (ПАК РВ).

Сертификационные испытания должны содержать следующие этапы:

- сборка тестовой схемы;
- подключение УСВИ к тестовой схеме ПАК РВ;
- согласование заявителем схемы подключения УСВИ к тестовой схеме ПАК РВ;
- проведение сертификационных испытаний в объеме тестов для проверки указанного заявителем класса УСВИ;
- обработка результатов измерений и определение погрешностей измерений УСВИ;
- анализ результатов сертификационных испытаний.

3. Сборка тестовой схемы для проведения сертификационных испытаний УСВИ

3.1. Тестовая схема для проведения сертификационных испытаний УСВИ должна быть собрана в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1.

3.2. Требования к тестовой схеме

Тестовая схема для проведения сертификационных испытаний УСВИ должна включать:

- ПАК РВ, включающий устройства ввода-вывода сигналов через цифровые интерфейсы и/или аналоговые усилители напряжения и тока (полная погрешность TVE ПАК РВ не должна превышать 0,25 %);
- источник (-и) точного времени;
- анализатор векторных измерений;
- аналого-цифровое устройство сопряжения, обеспечивающего преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму в соответствии с требованиями стандарта IEC 61850-9-2-2011;
- тестируемый УСВИ;
- цифровой осциллограф с частотой дискретизации не менее 100 МГц и полосой пропускания не менее 60 МГц;

- мультиметр с классом точности не хуже 0,1.



Рисунок 1. Тестовая схема для проведения сертификационных испытаний УСВИ

3.3. Требования к источнику точного времени

Синхронизация УСВИ при проведении сертификационных испытаний производится от приемника сигналов глобальных навигационных систем, предоставленного заявителем.

Приемники сигналов точного времени должны быть установлены и подключены согласно указаниям соответствующих эксплуатационных документов. При проведении тестирования УСВИ должно быть обеспечено выполнение следующих требований по синхронизации времени:

- при установке антенны, ее подключении, выборе длины и типа кабеля необходимо следовать инструкциям производителя;
- допускается синхронизация нескольких УСВИ от одного приемника;
- точность синхронизации подаваемых на УСВИ сигналов от ПАК РВ должна быть не хуже 1 мкс¹.

3.4. Требования к функциям анализатора векторных измерений

Анализатор векторных измерений должен выполнять:

- сбор измерений с УСВИ, ПАК РВ и аналого-цифровых устройств сопряжения в режиме реального времени (в аналоговом и цифровом виде);
- обработку и архивирование СВИ;
- определение погрешностей измерений УСВИ в статических и динамических условиях;
- запись результатов измерений и расчетов в формате .csv;

¹Ошибка синхронизации времени, равная 1 мкс, приводит к появлению дополнительной погрешности измерения фазового угла, равной 0,018°, а ошибка в регистрации фазового угла на 0,57° к превышению допустимой величины TVE = 1 %. Поэтому при выборе и настройке оборудования системы обеспечения точного времени необходимо особое внимание уделить способу и корректной настройке оборудования синхронизации тестируемых УСВИ во время проведения тестовых испытаний (синхронизация разных типов УСВИ может быть реализована при помощи спутниковых антенн – приемников сигналов точного времени и т.д.).

- хранение собранной информации в базе данных СВИ в виде кольцевого архива;
- визуализацию истинных, измеренных и рассчитанных данных;
- создание установленной формы отчета.

3.5. Требования к программному обеспечению ПАК РВ

Программное обеспечение на рабочем месте технолога должно обеспечивать:

- задание топологии схемы;
- формирование сигналов с заданными параметрами;
- запись результатов измерений в формате .csv;
- взаимодействие с анализатором векторных измерений.

3.6. Требования к УСВИ

До начала проведения испытаний заявителем должно быть представлено руководство по эксплуатации, в котором должны быть указаны технические характеристики УСВИ, правила подключения УСВИ к вторичным цепям тока и напряжения, а также к источнику синхронизации времени.

Ответственным за исправное состояние, комплектацию, синхронизацию времени, наличие эксплуатационной документации и готовность УСВИ к проведению испытаний является заявитель.

4. Проведение сертификационных испытаний УСВИ

4.1. Сертификационные испытания проводятся в соответствии с программой испытаний, разработанной органом по добровольной сертификации и согласованной АО «СО ЕЭС».

4.2. Программа сертификационных испытаний должна включать тесты, приведенные в разделе 6.

4.3. Сценарии дополнительных тестов для получения характеристик УСВИ в условиях, приближенных к реальным процессам энергосистемы, приведены в разделе 7.

4.4. Характеристики УСВИ, полученные в результате выполнения дополнительных тестов, несут исключительно информативный характер и должны быть зафиксированы в отдельной таблице результатов тестирования УСВИ.

4.5. Вариации параметров входных сигналов должны производиться в каждом тесте в соответствии с условиями заданных сценариев.

4.6. До завершения серии испытаний, предусмотренных настоящей Методикой, изменение конфигурации УСВИ не допускается.

4.7. При необходимости повторения серии тестов, например, при проверке УСВИ при другом темпе передачи данных СВИ, переконфигурирование УСВИ производится заявителем после отключения УСВИ от ПАК РВ.

4.8. Определение TVE, FE, RFE, характеристик времени и величины перерегулирования.

4.8.1. Соответствие результатов испытаний требованиям Стандарта должно устанавливаться путем сравнения параметров синхронизированных векторов, полученных в ходе проведения основных тестов, с соответствующими истинными значениями и путем расчета полной погрешности измерения амплитуды и фазы вектора, а также значений частоты и скорости изменения частоты в соответствии со следующими определениями и формулами:

4.8.1.1. **Полная погрешность измерения вектора (TVE)** – величина, характеризующая отклонение амплитуды и фазы измеренного вектора от их заданных значений и вычисляемая по формуле:

$$\text{TVE} = \sqrt{\frac{(\hat{x}_r - x_r)^2 + (\hat{x}_i - x_i)^2}{x_r^2 + x_i^2}} \cdot 100\%, \text{ где}$$

\hat{x}_r – действительная часть измеренного вектора;

x_r – действительная часть истинного вектора;

\hat{x}_i – мнимая часть измеренного вектора;

x_i – мнимая часть истинного вектора.

4.8.1.2. **Погрешность измерения частоты (FE)** – абсолютная погрешность измерения частоты основной гармоники напряжения электрического тока в момент времени n , вычисляемая по формуле:

$$\text{FE} = |\hat{f}(n) - f(n)|, \text{ где:}$$

$\hat{f}(n)$ – измеренное в момент времени n значение частот;

$f(n)$ – истинное значение частоты в момент времени n .

4.8.1.3. **Погрешность измерения скорости изменения частоты (RFE)** – абсолютная погрешность скорости измерения частоты основной гармоники напряжения переменного тока в момент времени n , вычисляемая по формуле:

$$\text{RFE} = |\hat{df}(n)/dt - df(n)/dt|, \text{ где:}$$

$\hat{df}(n)/dt$ – измеренная в момент времени n скорость изменения частоты;

$df(n)/dt$ – истинное значение скорости изменения частоты в момент времени n .

4.8.2. Характеристики времени УСВИ (время отклика, время реакции), а также перерегулирование приведены на рисунке 2.

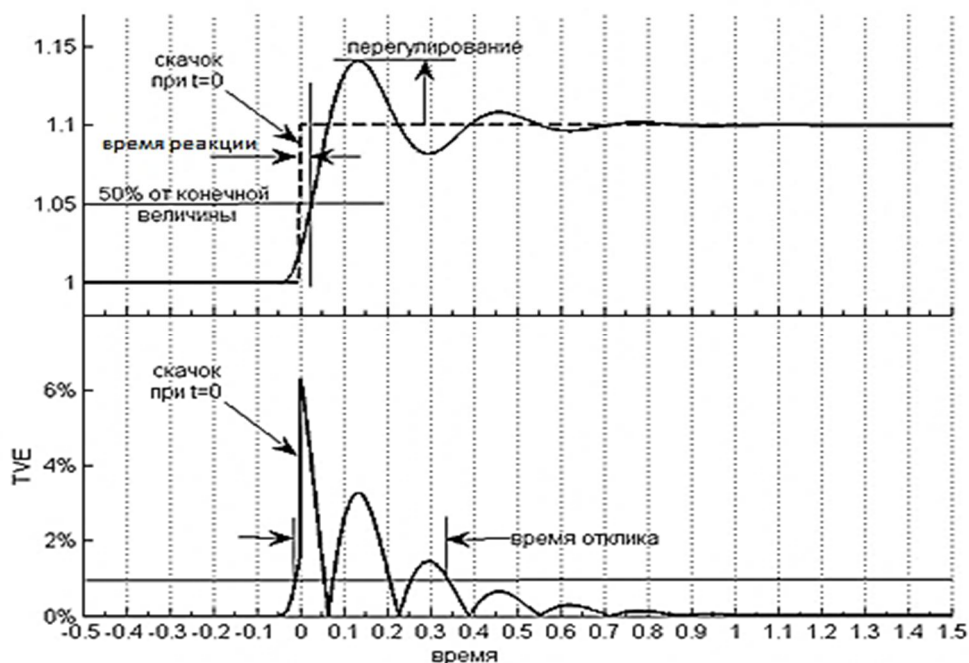


Рисунок 2. Характеристики времени УСВИ, перерегулирование

4.9. Критерием соответствия УСВИ требованиям Стандарта является соответствие погрешностей и характеристик УСВИ во всех основных тестах требованиям Стандарта для указанного заявителем класса УСВИ.

5. Состав и порядок испытаний

5.1. Описание правил проведения тестов

Темп передачи данных СВИ устанавливается перед каждой серией тестов. Величины погрешностей измерений УСВИ в динамических условиях при темпе передачи данных СВИ 10 кадров/с и менее не нормируются.

Для параметров сигналов, не варьируемых в соответствующем тесте, устанавливаются номинальные значения с коэффициентом гармонических искажений не более 0,2 %.

В дополнительных тестах настоящая Методика предусматривает определение точности УСВИ в условиях изменения параметров режима энергосистемы, близких к реальным, а также при наличии близкого к реальным случайного изменения этих параметров.

5.2. Правила определения погрешностей измерений УСВИ в статических условиях

Статическими условиями считаются условия, при которых параметры тестового сигнала остаются неизменными. Правила проведения тестов при определении погрешностей измерений УСВИ в статических условиях:

- амплитуда и частота сигналов должна быть постоянной в течение теста;
- длительность каждой ступени теста должна быть не менее 5 секунд;

- в течение каждого теста должны быть произведены измерения всех предусмотренных параметров и расчет их средних и максимальных значений, определено число выбросов и их максимальное значение;
 - должны быть использованы следующие модели сигналов:
 - модель сигнала напряжения $U(t) = U_m \cos(2\pi ft + \delta_U)$;
 - модель сигнала тока $I(t) = I_m \cos(2\pi ft + \delta_I)$;
- где U_m, I_m – амплитуда, δ – фазовый угол, f – частота входного сигнала.

5.3. Правила проведения тестов в динамических условиях

Динамическими условиями при тестировании УСВИ считаются условия, в которых один или несколько входных параметров изменяются по смоделированному закону.

Определение погрешностей измерений УСВИ в динамических условиях производится при:

- модуляции амплитуды и фазового угла сигнала;
- линейном изменении частоты;
- скачкообразном изменении амплитуды и фазы сигнала;
- экспоненциальном изменении частоты (дополнительный тест);
- моделировании однофазного короткого замыкания (дополнительный тест).

Для проведения тестирования УСВИ в динамических условиях используются сигналы, приведенные в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Модели сигналов для тестирования в динамических условиях

Тип испытаний		Модель сигнала	Примечание
Динамические условия	Модуляция сигнала	$x(t) = X_m [1 + k_x \cos(2\pi f_m t)] \cdot \cos[2\pi f_{ном} t + \delta + k_a \cos(2\pi f_m t - \pi)]$	k_x, k_a : коэффициенты модуляции амплитуды, фазы f_m : частота модуляции
	Скачкообразное изменение параметров	$x(t) = X_m [1 + k_x \mathbf{1}(t)]$	$\mathbf{1}(t)$: функция единичного скачка; k_x, k_a : коэффициент шага амплитуды и фазы
	Линейное изменение частоты	$x(t) = X_m \cos(2\pi f_{ном} t + \pi df t^2 + \delta)$	$f_{ном}$: номинальная частота df : скорость изменения частоты

Диапазоны параметров, в которых производится определение погрешностей измерений УСВИ, а также характер изменения параметров сигналов определены в сценариях для каждого теста.

6. Методы испытаний

6.1. Сценарии основных тестов УСВИ в статических условиях

6.1.1. Сценарий тестирования УСВИ при различных значениях частоты

Условия проведения теста:

а) задать сигнал $x(t) = X_m \cos(2\pi ft + \delta)$, в котором:

амплитуда напряжения $U = U_{\text{НОМ}} = 100/\sqrt{3}$ В,

амплитуда тока $I = I_{\text{НОМ}} = 1$ А,

$\delta = \text{const}, f = \text{const}$;

б) диапазон изменения частоты:

для УСВИ класса М – 45÷55 Гц;

для УСВИ класса Р – 46÷52 Гц;

в) изменять значение частоты сигнала от минимального до максимального значения с шагом 1 Гц и длительностью ступени установившегося режима не менее 5 с;

г) результаты расчетов погрешностей измерений УСВИ внести в таблицу 6.1.1;

Таблица 6.1.1. Погрешности измерений УСВИ при различных значениях частоты

Значение частоты, Гц	Погрешности измерений УСВИ (U_1 (I_1))										
	погрешность по модулю (%)		$\Delta\delta$ (°)		TVE (%)		FE (Гц)		RFE (Гц/с)		
	макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред	
f_{\min}											
...											
f_{\max}											

д) критерии проверки соответствия погрешностей измерений УСВИ:
 для класса М: $TVE \leq 1\%$, $FE \leq 0,001$ Гц, $RFE \leq 0,1$ Гц, $\Delta\delta \leq 0,1^\circ$;

для класса Р: $TVE \leq 1\%$, $FE \leq 0,005$ Гц, $RFE \leq 0,4$ Гц, $\Delta\delta \leq 0,1^\circ$.

6.1.2. Сценарий тестирования УСВИ при различных значениях амплитуды

Условия проведения теста:

а) задать сигнал $x(t) = X_m \cos(2\pi f_{\text{НОМ}} t + \delta)$,

в котором X_m :

$U_{\text{НОМ}} = 100/\sqrt{3}$ В, $I_{\text{НОМ}} = 1$ А,

$\delta = \text{const}, f_{\text{НОМ}} = 50$ Гц;

б) диапазон изменения амплитуды напряжения:

для УСВИ класса М – $(0,1 \dots 1,2)U_{\text{НОМ}}$,

для УСВИ класса Р – $(0,5 \dots 1,4)U_{\text{НОМ}}$,

диапазон изменения амплитуды тока – $(0,1 \dots 2)I_{\text{НОМ}}$,

шаг изменения – не более $0,25X_m$;

в) правила вариации параметра: амплитуда напряжения (тока) изменяется с заданным шагом от минимального до максимального значения, длительность ступени установившегося режима не менее 5 с;

г) принцип проведения теста: для каждого значения амплитуды напряжения (тока) сигнала определить погрешности измерений УСВИ (допустимо изменять амплитуды напряжения и тока одновременно встречно), результаты внести в таблицу 6.1.2;

Таблица 6.1.2. Погрешности измерений УСВИ при различных значениях амплитуды сигнала

Значение амплитуды сигнала (X_m)	Погрешности измерений УСВИ (U_1 (I_1))										
	погрешность по модулю (%)		$\Delta\delta$ (°)		TVE (%)		FE (Гц)		RFE (Гц/с)		
	макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сп	
U_{min} (I_{max})											
...											
U_{max} (I_{min})											

д) критерии проверки соответствия погрешностей измерений УСВИ:
 для класса М: $TVE \leq 1\%$, $FE \leq 0,001$ Гц, $RFE \leq 0,1$ Гц, $\Delta\delta \leq 0,1^\circ$;

для класса Р: $TVE \leq 1\%$, $FE \leq 0,005$ Гц, $RFE \leq 0,4$ Гц, $\Delta\delta \leq 0,1^\circ$.

6.1.3. Сценарий тестирования УСВИ при различных значениях фазового угла

Условия проведения теста:

а) задать сигнал $x(t) = X_m \cos(2\pi f_{ном}t + \delta)$,

в котором X_m :

амплитуда напряжения $U = U_{ном} = 100/\sqrt{3}$ В,

амплитуда тока $I = I_{ном} = 1$ А,

$f_{ном} = 50$ Гц;

б) диапазон изменения фазового угла напряжения (δU) и тока (δI): $[-\pi..+\pi]$ рад;

в) правила вариации параметра: значения фазового угла устанавливаются в соответствии с таблицей 6.1.3, длительность ступени установившегося режима – не менее 5 с;

г) принцип проведения теста: для каждого значения фазового угла определить погрешности измерений УСВИ, заполнить таблицу 6.1.3;

Таблица 6.1.3. Погрешности измерений УСВИ при различных значениях фазового угла

Вариация δ , рад		Погрешности измерений УСВИ (U_1 (I_1))									
		погрешность по модулю (%)		$\Delta\delta$ (°)		TVE (%)		FE (Гц)		RFE (Гц/с)	
		макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред
δ_U (δ_I)	$-2\pi/3$										
	$-\pi/2$										
	$-\pi/6$										
	0										
	$\pi/6$										
	$\pi/2$										
	$2\pi/3$										
	π										

д) критерии проверки соответствия погрешностей измерений УСВИ:
 для класса М: $TVE \leq 1 \%$, $FE \leq 0,001$ Гц, $RFE \leq 0,1$ Гц, $\Delta\delta \leq 0,1^\circ$;
 для класса Р: $TVE \leq 1 \%$, $FE \leq 0,005$ Гц, $RFE \leq 0,4$ Гц, $\Delta\delta \leq 0,1^\circ$.

6.1.4. Сценарий тестирования УСВИ при гармоническом искажении сигнала, $x_{test}(t) = x(t) + x_g(t)$

Условия проведения теста:

а) задать сигнал $x(t) = X_m \cos(2\pi f_{ном} t + \delta)$,

в котором X_m :

амплитуда напряжения $U = U_{ном} = 100/\sqrt{3}$ В;

амплитуда тока $I = I_{ном} = 1$ А;

$f_{ном} = 50$ Гц, $\delta = const$.

Добавить гармоническую составляющую (единичная гармоника)
 $x_g(t) = X_{gm} \cos(2\pi n f_{ном} t + \delta_g)$, где:

X_{gm} – амплитуда, $n f_{ном}$ – частота, n – целое число, δ_g – фазовый угол;

б) правила вариации параметра: параметры гармонической составляющей изменяются в соответствии с таблицей 6.1.4, шаг изменения $n = 1$, длительность ступени 5 с;

в) принцип проведения теста: для каждого набора параметров гармонической составляющей рассчитать погрешности измерений УСВИ, заполнить таблицу 6.1.4;

Таблица 6.1.4. Погрешности измерений УСВИ при гармоническом искажении сигнала

Вариация $x_g(t) = X_{gm} \cos(2\pi n f_{ном} t + \delta_g)$			Погрешности измерений УСВИ (U_1 (I_1))									
			погрешность по модулю (%)		$\Delta\delta$ (°)		TVE (%)		FE (Гц)		RFE (Гц/с)	
			X_{gm} (В)	δ_g (рад)	v	макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс
класс М: $-0,1U_{ном}$	0	2										
		...										

(U _{вн} < 110 кВ);	π/2	50										
		2										
-0,02U _{НОМ} (U _{вн} ≥ 110 кВ)	π/2	...										
		50										
класс P: 0,01U _{НОМ}												

г) критерии проверки соответствия погрешностей измерений УСВИ:
 для класса М: при $F_s \geq 25$: TVE ≤ 1%, FE ≤ 0,025 Гц, RFE не нормируется;
 при $F_s \leq 10$: TVE ≤ 1%, FE ≤ 0,005 Гц, RFE не нормируется;
 для класса P: TVE ≤ 1%, FE ≤ 0,005 Гц, RFE ≤ 0,4 Гц/с.

6.1.5. Сценарий тестирования УСВИ при интергармонических помехах, с частотами, близкими к основной, $x_{test}(t) = x(t) + x_{in}(t)$

Условия проведения теста (проводится только для УСВИ класса М):

а) задать сигнал $x(t) = X_m \cos(2\pi f t + \delta)$, в котором X_m :

$$U_{НОМ} = 100/\sqrt{3} \text{ В}; \quad I_{НОМ} = 1 \text{ А};$$

$$f_{НОМ} = 50 \text{ Гц}; \quad \delta = \text{const};$$

$$f = \{f_{НОМ} - 0,1F_s/2; f_{НОМ}; f_{НОМ} + 0,1F_s/2\}.$$

Добавить интергармоническое колебание $x_{in}(t) = X_{in m}(t) \cos(2\pi f_{in} t + \delta_{in})$, в котором:

амплитуда $X_{in m} = 0,1X_m$ для $U_{вн} < 110$ кВ; $X_{in} = 0,02X_m$ для $U_{вн} \geq 110$ кВ;

частота f_{in} изменяется в диапазонах $10 \leq f_{in} \leq f_{max}$ и $f_{min} \leq f_{in} \leq 2f_{НОМ}$ с шагом 5 Гц;

$$f_{min} = f_{НОМ} + F_s/2; \quad f_{max} = f_{НОМ} - F_s/2; \quad \text{фазовый угол } \delta_{in} = 0;$$

б) правила вариации параметра: параметры интергармонического колебания изменяются в соответствии с таблицей 6.1.5, длительность ступени 5 с;

в) принцип проведения теста: для каждого значения частоты входного сигнала и набора параметров интергармонического колебания определить погрешности УСВИ, заполнить таблицу 6.1.5;

Таблица 6.1.5. Погрешности измерений УСВИ при интергармоническом искажении сигнала

Вариация f и $x_{in}(t) = X_{in m}(t) \cos(2\pi f_{in} t + \delta_{in})$		Погрешности измерений УСВИ (U ₁ (I ₁))							
f (Гц)	f _{in} (Гц)	погрешность по модулю (%)		Δδ (°)		TVE (%)		FE (Гц)	
		макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред
1) f _{НОМ} - 0,1(F _s /2) 2) f _{НОМ} 3) f _{НОМ} + 0,1(F _s /2)	10..f _{max}								
	f _{min} ..2f _{НОМ}								

г) критерии проверки соответствия погрешностей измерений УСВИ:
 для класса М: $TVE \leq 1,3\%$, $FE \leq 0,01$ Гц, RFE не нормируется;
 для класса Р: погрешности не нормируются.

6.2. Сценарии основных тестов УСВИ в динамических условиях

6.2.1. Сценарий тестирования УСВИ при модуляции амплитуды

Условия проведения теста:

а) задать сигнал: $x(t) = X_m [1 + k_x \cos(2\pi f_m t)] \cos[2\pi f_{ном} t + \delta + k_a \cos(2\pi f_m t - \pi)]$,

в котором

k_x – коэффициент модуляции амплитуды; k_a – коэффициент модуляции фазы;

f_m – частота модуляции; $f_{ном}$ – номинальная частота, равная 50 Гц; $\delta = const$;

$X_m: U_{ном} = 100/\sqrt{3}$ В; $I_{ном} = 1$ А;

$k_x = 0,1$, $k_a = 0$, то есть $x(t) = X_m [1 + 0,1 \cos(2\pi f_m t)] \cos[2\pi f t + \delta]$;

б) правила модулирования амплитуды сигнала: частота модуляции изменяется в диапазоне $0,1 \leq f_m \leq 5$ Гц (для класса М) и $0,1 \leq f_m < 2$ Гц (для класса Р) в соответствии с таблицей 6.2.1. Длительность ступени – не менее 2 периодов модуляции;

в) принцип проведения теста: для каждого значения частоты модуляции определить погрешности УСВИ, заполнить таблицу 6.2.1;

Таблица 6.2.1. Погрешности измерений УСВИ при модуляции амплитуды

Вариация ($0,1 \leq f_m \leq 5$) Гц		Погрешности измерений УСВИ (U_1 (I_1))									
		погрешность по модулю (%)		$\Delta\delta$ (°)		TVE (%)		FE (Гц)		RFE (Гц/с)	
		макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред
U (I) $k_x = 0,1$ $k_a = 0$	0,1(М, Р)										
	0,3 (М, Р)..1,9 (М, Р) с шагом 0,2										
	2,5 (М)..5 (М) с шагом 0,5										

г) критерии проверки соответствия погрешностей измерений УСВИ:

для класса М: при $F_s \geq 25$: $TVE \leq 3\%$, $FE \leq 0,3$ Гц, $RFE \leq 14$ Гц/с;

при $F_s \leq 10$: $TVE \leq 3\%$, $FE \leq 0,12$ Гц, $RFE \leq 2,3$ Гц/с;

для класса Р: при $F_s \geq 25$: $TVE \leq 3\%$, $FE \leq 0,06$ Гц, $RFE \leq 2,3$ Гц/с;

при $F_s \leq 10$: $TVE \leq 3\%$, $FE \leq 0,03$ Гц, $RFE \leq 0,6$ Гц/с.

6.2.2. Сценарий тестирования УСВИ при модуляции фазы

Условия проведения теста:

а) задать сигнал: $x(t) = X_m [1 + k_x \cos(2\pi f_{\text{НОМ}} t)] \cos[2\pi f_{\text{НОМ}} t + \delta + k_a \cos(2\pi f_m t - \pi)]$,

в котором:

k_x – коэффициент модуляции амплитуды;

k_a – коэффициент модуляции фазы;

f_m – частота модуляции;

$f_{\text{НОМ}}$ – номинальная частота, равная 50 Гц;

$\delta = \text{const}$.

X_m : $U_{\text{НОМ}} = 100/\sqrt{3}$ В; $I_{\text{НОМ}} = 1$ А.

В данном тесте $k_x = 0$, $k_a = 0,1$, то есть $x(t) = X_m \cos[2\pi f_{\text{НОМ}} t + \delta + 0,1 \cos(2\pi f_m t - \pi)]$;

б) правила вариации параметра: частота модуляции изменяется в диапазоне

$0,1 \leq f_m \leq 5$ Гц (для класса М) и $0,1 \leq f_m < 2$ Гц (для класса Р) с шагом 0,2 Гц и 0,5 Гц (таблица 6.2.2.). Длительность ступени – не менее 2 периодов модуляции;

в) принцип проведения теста: для каждого значения частоты модуляции определить погрешности УСВИ, заполнить таблицу 6.2.2;

Таблица 6.2.2. Погрешности измерений УСВИ при модуляции фазового угла

Вариация f_m (Гц)		Погрешности измерений УСВИ (U_1 (I_1))									
		погрешность по модулю (%)		$\Delta\delta$ (°)		TVE (%)		FE (Гц)		RFE (Гц/с)	
		макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс с	сред	макс с	сред
U (I) $k_x = 0$ $k_a = 0,1$	0,1 (М, Р)										
	0,3 (М, Р)..1,9 (М, Р) с шагом 0,2										
	2,5 (М) ..5 (М) с шагом 0,5										

г) критерии проверки соответствия погрешностей измерений УСВИ:

для класса М: при $F_s \geq 25$: TVE $\leq 3\%$, FE $\leq 0,3$ Гц, RFE ≤ 14 Гц/с;

при $F_s \leq 10$: TVE $\leq 3\%$, FE $\leq 0,12$ Гц, RFE $\leq 2,3$ Гц/с.

для класса Р: при $F_s \geq 25$: TVE $\leq 3\%$, FE $\leq 0,06$ Гц, RFE $\leq 2,3$ Гц/с;

при $F_s \leq 10$: TVE $\leq 3\%$, FE $\leq 0,03$ Гц, RFE $\leq 0,6$ Гц/с.

6.2.3. Сценарий тестирования УСВИ при линейном изменении частоты

Условия проведения теста:

а) задать сигнал $x(t) = X_m \cos(2\pi f_{\text{НОМ}} t + \pi df t^2 + \delta)$, в котором:

$X_m: U_{\text{НОМ}} = 100/\sqrt{3}$ В; $I_{\text{НОМ}} = 1$ А;

$\delta = \text{const}$, $f_{\text{НОМ}}$ – номинальная частота, равная 50 Гц, $df/dt = 1$ Гц/с;

б) правила вариации параметра: частота изменяется в диапазоне $45 \leq f \leq 55$ Гц (для класса М) и $46 \leq f \leq 52$ Гц (для класса Р) с шагом 1 Гц;

в) принцип проведения теста: для каждого измерения с учетом интервала исключения, указанного в таблицах Б.3, Б.4 приложения Б к Стандарту, на котором погрешности не рассчитываются, определить погрешности УСВИ и заполнить таблицу 6.2.3;

Таблица 6.2.3. Погрешности измерений УСВИ при линейном изменении частоты

Начальная частота f (Гц)	df/dt (Гц/с)	Погрешности измерений УСВИ (U_1 (I_1))									
		погрешность по модулю (%)		$\Delta\delta$ (°)		TVE (%)		FE (Гц)		RFE (Гц/с)	
		макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред
45 (М)	+1,0										
46..49 (М, Р)	+1,0										
50 (М, Р)	-1,0										
	+1,0										
51, 52 (М, Р)	-1,0										
53, 54 (М)	-1,0										
55 (М)	-1,0										

г) критерии проверки соответствия погрешностей измерений УСВИ:

для класса М: $TVE \leq 1\%$, $FE \leq 0,01$ Гц, $RFE \leq 0,2$ Гц/с;

для класса Р: $TVE \leq 1\%$, $FE \leq 0,01$ Гц, $RFE \leq 0,4$ Гц/с.

6.2.4. Сценарий тестирования УСВИ при скачкообразном изменении амплитуды

Условия проведения теста:

а) задать сигнал $x(t) = X_m [1 + k_x \mathbf{1}(t)] \cos[2\pi f_{\text{НОМ}} t + k_a \mathbf{1}(t)]$, в котором:

$\mathbf{1}(t)$ – единичный скачок;

k_x – весовой коэффициент скачка амплитуды;

k_a – весовой коэффициент скачка фазы, $k_a = 0$;

$X_m: U_{\text{НОМ}} = 100/\sqrt{3}$ В; $I_{\text{НОМ}} = 1$ А; $f_{\text{НОМ}} = 50$ Гц;

б) принцип проведения теста: для каждого значения k_x определить характеристики и погрешности УСВИ, заполнить таблицу

6.2.4. В таблице указывается максимальное значение погрешности, полученное при обработке последовательности из 10 импульсов. Длительность одного импульса не менее 1 с, восстановительный интервал времени перед скачком не менее $7/F_s$;

Таблица 6.2.4. Результаты тестирования УСВИ при скачкообразном изменении амплитуды

Вариация k_x	Погрешности измерений (U_1 (I_1)) и характеристики УСВИ									
	TVE (%)		FE (Гц)		RFE (мГц/с)		Т _{реакции} (мс)		Перерегулирование (%)	
	макс	сред	макс	макс	макс	сред	макс	сред	макс	сред
+5%										
-5%										
+10%										
-10%										

в) критерии проверки погрешностей измерений УСВИ: значения TVE, FE, RFE в соответствии с таблицами Б.3, Б.4 приложения Б к Стандарту.

6.2.5. Сценарий тестирования УСВИ при скачкообразном изменении фазового угла

Условия проведения теста:

а) задать сигнал $x(t) = X_m [1 + k_x \mathbf{1}(t)] \cos[2\pi f_{\text{НОМ}} t + k_a \mathbf{1}(t)]$, где:

$\mathbf{1}(t)$ – единичный скачок;

в котором X_m : $U_{\text{НОМ}} = 100/\sqrt{3}$ В; $I_{\text{НОМ}} = 1$ А;

k_x – весовой коэффициент скачка амплитуды, $k_x = 0$;

k_a – весовой коэффициент скачка фазы;

$f_{\text{НОМ}}$ – номинальная частота, равная 50 Гц;

б) принцип проведения теста: для каждого значения k_a определить характеристики и погрешности УСВИ, заполнить таблицу 6.2.5. В таблицу заносится максимальное значение погрешности, полученное при обработке последовательности из 10 импульсов. Длительность одного импульса не менее 1 с, восстановительный интервал времени перед скачком не менее $7/F_s$;

Таблица 6.2.5. Результаты тестирования УСВИ при скачкообразном изменении фазового угла

Вариация k_a	Погрешности измерений (U_1 (I_1)) и характеристики УСВИ									
	TVE (%)		FE (Гц)		RFE (мГц/с)		Т _{реакции} (мс)		Перерегулирование (%)	
	макс	сред	макс	макс	макс	сред	макс	сред	макс	сред
$+\pi/18$										
$-\pi/18$										
$+\pi/9$										
$-\pi/9$										

в) критерии проверки погрешностей измерений УСВИ: значения TVE, FE, RFE в соответствии с таблицами Б.3, Б.4 Приложения Б к Стандарту.

7. Сценарии дополнительных тестов УСВИ

7.1. Сценарии дополнительных тестов УСВИ при добавлении шума

В качестве дополнительных тестов с целью оценки величин погрешностей измерений УСВИ должны быть проведены тесты в соответствии с пунктами 6.1.1, 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4, 6.1.5, 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3, 6.2.4,

6.2.5 при добавлении в модели эталонных сигналов тестов модели шума. При моделировании белого шума должны использоваться математическое ожидание и дисперсия при нормальном распределении случайного процесса.

Цель проведения тестов: оценочное определение погрешностей измерений УСВИ в условиях изменения параметров электрического режима, близких к реальным.

В модель сигналов напряжения и тока необходимо включить модель шума, наблюдаемого в режимных параметрах, при этом модели сигналов напряжения и тока с учетом шума должны иметь следующий вид:

$$\mathbf{x}(t) = X_m \cos(2\pi ft + \delta + \mathbf{n}_\delta(t)) + \mathbf{n}_{u(i)}(t),$$

где $\mathbf{n}_\delta(t)$, $\mathbf{n}_u(t)$, $\mathbf{n}_i(t)$ – уровни шума.

При проведении тестов с добавлением шума должна быть использована следующая модель шума: $\mathbf{n}(t) = \mathbf{n}_0(t) + \mathbf{n}_n(t)$,

где $\mathbf{n}_0(t)$ – тренд, математическое ожидание шума,

$\mathbf{n}_n(t)$ – случайная составляющая, характеризуемая дисперсией.

Модель шума фазы должна иметь вид $\mathbf{n}_0(t) = \Delta\delta \sin(2\pi \Omega_\delta t)$,

где $\Delta\delta = 0,05$ рад – амплитуда колебания фазового угла; $\Omega_\delta = 0,0025$ Гц – частота колебания частоты;

$\mathbf{n}_\delta(t) = \sigma_\delta \mathbf{n}_\delta(t)$, где $\sigma_\delta = 0,01$ рад – среднеквадратическое отклонение случайной составляющей абсолютной фазы, $\mathbf{n}_\delta(t)$ – белый шум.

Модель шума напряжения (шум разный по фазам): $\mathbf{n}_0(t) = \Delta U \sin(2\pi \Omega_U t)$,

где $\Delta U = 0,05$ В – амплитуда колебания амплитуды напряжения;

$\Omega_U = 0,01, 0,04$ Гц – частота колебания амплитуды напряжения;

$\mathbf{n}_{U(t)} = \sigma_U \mathbf{n}(t)$,

где $\sigma_U = 0,01$ В – среднеквадратичное отклонение случайной составляющей напряжения, $\mathbf{n}_U(t)$ – белый шум.

Модель шума тока: $\mathbf{n}_0(t) = \Delta I \sin(2\pi \Omega_I t)$,

где $\Delta I = 0,001$ А – амплитуда колебания амплитуды тока,

$\Omega_I = 0,01$ Гц – частота колебания амплитуды тока,

$\mathbf{n}_I(t) = \sigma_I \mathbf{n}_I(t)$, где $\sigma_I = 0,01$ А – среднеквадратичное отклонение случайной составляющей тока, $\mathbf{n}_I(t)$ – белый шум.

7.2. Сценарий дополнительного теста УСВИ при линейном изменении частоты

Цель проведения теста: оценочное определение погрешностей измерений УСВИ в условиях изменения параметров электрического режима, близких к реальным.

Условия проведения теста:

а) задать сигнал $x(t) = X_m \cos(2\pi f_{\text{НОМ}} t + \pi df t^2 + \delta + k_\delta n_\delta(t) + k_{u,i} n_{u,i}(t))$,

где:

X_m : $U_{\text{НОМ}} = 100/\sqrt{3}$ В; $I_{\text{НОМ}} = 1$ А; $\delta = \text{const}$;

k_δ и $k_{u,i}$ – коэффициенты, определяющие присутствие шума, причем $k_\delta = k_{u,i} = 0$ при отсутствии шума; $k_\delta = k_{u,i} = 1$ при наличии шума;

df – скорость изменения частоты;

б) правила вариации параметра: частота изменяется линейно (рисунок 7.1), начиная с $f_{\text{НОМ}}=50$ Гц до 46 Гц с указанной в таблицах 7.2а, 7.2б скоростью изменения частоты;

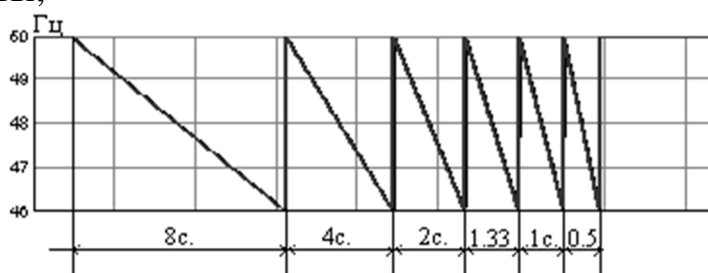


Рисунок 7.1. Правила линейного изменения частоты

в) принцип проведения теста: установить $k_\delta = k_x = 0$ и, изменяя в соответствии с условиями проведения теста частоту входного сигнала, определить погрешности УСВИ (с учетом интервала исключения (большее из $(2/F_s, 2/f_{\text{НОМ}})$, на котором погрешности не рассчитываются). Повторить тест при добавлении шума (правила моделирования сигнала с шумом приведено в пункте 7.1) и заполнить таблицы 7.2а, 7.2б;

Таблица 7.2а. Погрешности измерений УСВИ при линейном изменении частоты

Вариация параметров		Погрешности измерений УСВИ (U_1 (I_1)))							
$\Delta F=4$ $t_{\text{измен.}f}$ (с)	df (Гц/с)	погрешность по модулю U_1 (%)		$\Delta\delta$ (°)		TVE (U_1) (%), без шума		TVE (U_1) (%), с шумом	
		макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред
8	0,5								
4	1								
2	2								
1,33	3								
1	4								
0,5	8								

Таблица 7.2б. Погрешности измерений УСВИ при линейном изменении частоты

Вариация параметров		Погрешности измерений УСВИ							
$\Delta F=4$ $t_{\text{измен.}f}$ (с)	df (Гц/с)	FE (Гц), без шума		FE (Гц), с шумом		RFE (мГц/с), без шума		RFE (мГц/с), с шумом	
		макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред
8	0,5								
4	1								
2	2								
1,33	3								

1	4								
0,5	8								

7.3. Сценарий дополнительного теста УСВИ при нелинейном изменении частоты

Цель проведения теста: оценочное определение погрешностей измерений УСВИ в условиях изменения параметров электрического режима, близких к реальным.

Условия проведения теста:

а) задать сигнал $x(t) = +k_{u,i}n_{u,i}(t)$, где

X_m : $U_{ном} = 100/\sqrt{3}$ В; $I_{ном} = 1$ А; $\delta = const$; df – скорость изменения частоты;

$df = \Delta F(1 - \exp(-\frac{t}{T_e}))$, где T_e постоянная времени, k_δ и $k_{u,i}$ – коэффициенты, определяющие присутствие шума, $k_\delta = k_{u,i} = 0$ при отсутствии шума; $k_\delta = k_{u,i} = 1$ при наличии шума;

б) правила вариации параметра для теста 1: характер измерения частоты показан на рисунке 7.2, частота изменяется с $f_{ном} = 50$ Гц до заданной в таблицах 7.3а, 7.3б величины с постоянной времени $T_e = 1$ с. При этом после возврата частоты к значению $f_{ном}$ обязательно наличие восстановительного интервала времени длительностью не менее $7/F_s$ (для УСВИ класса М), $2/F_s$ (для УСВИ класса Р);

в) правила вариации параметра для теста 2: характер изменения частоты показан на рисунке 7.3, частота изменяется с $f_{ном} = 50$ Гц до 46 Гц с постоянной времени T_e , заданной в таблицах 7.3в, 7.3г. При этом после возврата частоты к значению $f_{ном}$ обязательно наличие восстановительного интервала времени длительностью не менее $7/F_s$ (для УСВИ класса М), $2/F_s$ (для УСВИ класса Р);

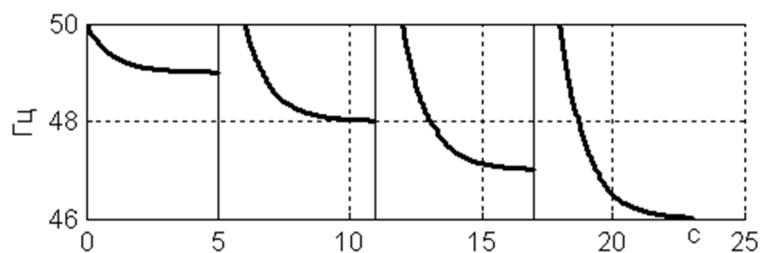


Рисунок 7.2. Характер изменения частоты в тесте 1

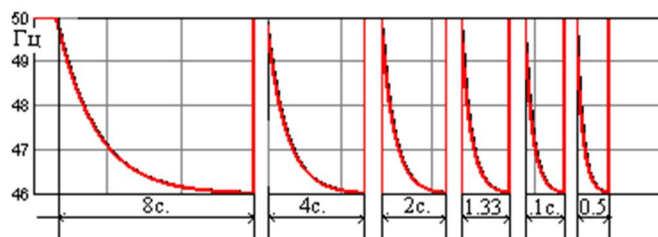


Рисунок 7.3. Характер изменения частоты в тесте 2

г) принцип проведения теста: установить $k_\delta = k_x = 0$ и, изменяя в соответствии с условиями тестов значение частоты входного сигнала,

определить погрешности измерений УСВИ. Повторить тест при добавлении шума (правила моделирования сигнала с шумом приведено в пункте 7.1). Результаты зафиксировать в таблицах 7.3а, 7.3б, 7.3в, 7.3г.

Таблица 7.3а. Погрешности измерений УСВИ при нелинейном изменении частоты (тест 1)

Изменяемый параметр		Погрешности измерений УСВИ (U_1 (I_1)))							
f (Гц)	ΔF (Гц)	погрешность по модулю (%)		$\Delta\delta$ (°)		TVE (%)		TVE (%) с шумом	
		макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред
49	1								
48	2								
47	3								
46	4								

Таблица 7.3б. Погрешности измерений УСВИ при нелинейном изменении частоты (тест 1)

Изменяемый параметр		Погрешности измерений УСВИ (U_1 (I_1)))							
f (Гц)	ΔF (Гц)	FE (Гц)		FE (Гц) с шумом		RFE (Гц/с)		RFE (Гц/с) с шумом	
		макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред
49	1								
48	2								
47	3								
46	4								

Таблица 7.3в. Погрешности измерений УСВИ при нелинейном изменении частоты (тест 2)

Изменяемый параметр			Погрешности измерений УСВИ (U_1 (I_1)))							
	$t_{\text{измен.}f}$ (с)	$T_{e,c}$	погрешность по модулю (%)		$\Delta\delta$ (°)		TVE (%)		TVE (%) с шумом	
			макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред
$\Delta F = 4$	8	1,6								
	4	0,8								
	2	0,4								
	1,33	0,166								
	1	0,2								
	0,5	0,1								

Таблица 7.3г. Погрешности измерений УСВИ при нелинейном изменении частоты (тест 2)

Изменяемый параметр			Погрешности измерений УСВИ (U_1 (I_1)))							
	$t_{\text{перех.проц.}}$ (с)	T_e (с)	FE (Гц)		FE (Гц) с шумом		RFE (Гц/с)		RFE (Гц/с) с шумом	
			макс	сред	макс	сред	макс	сред	макс	сред
$\Delta F = 4$	8	1,6								
	4	0,8								
	2	0,4								
	1,33	0,166								
	1	0,2								
	0,5	0,1								

8. Требования к представлению результатов тестирования УСВИ

Результаты тестирования УСВИ должны быть сведены в таблицы 8.1 – 8.4 и представлены для каждого устройства в графической форме отдельно для основных и дополнительных тестов.

Непревышение пределов допускаемых погрешностей отмечается знаком «+».

Превышение пределов допускаемых погрешностей отмечается знаком «-».

Табличные значения результатов тестов для каждого устройства должны быть приложены к протоколу на цифровом носителе информации.

Таблица 8.1. Итоговые результаты тестирования УСВИ в статических условиях

Тип УСВИ	Класс	Тестирование в статических условиях														
		изменение амплитуды			изменение фазового угла			изменение частоты			гармонические искажения			интергармонические помехи		
		TVE	FE	RFE	TVE	FE	RFE	TVE	FE	RFE	TVE	FE	RFE	TVE	FE	RFE
№ 1																

Таблица 8.2. Итоговые результаты тестирования УСВИ в динамических условиях

Тип УСВИ	Класс	Тестирование в динамических условиях													Примечание
		модуляция по амплитуде			модуляция по углу			модуляция по амплитуде и углу			линейное изменение частоты				
		TVE	FE	RFE	TVE	FE	RFE	TVE	FE	RFE	TVE	FE	RFE		
№ 1															

Таблица 8.3. Итоговые результаты тестирования УСВИ в динамических условиях

Тип УСВИ	Класс	Тестирование в динамических условиях										Примечание	
		скачкообразное изменение амплитуды сигнала					скачкообразное изменение амплитуды сигнала						
		TVE	FE	RFE	σ	T _{реакции}	TVE	FE	RFE	σ	T _{реакции}		
№ 1													

Таблица 8.4. Итоговые результаты тестирования УСВИ в дополнительных тестах

Тип УСВИ	Класс	Тестирование в дополнительных тестах									Примечание
		линейное изменение частоты, $f = \text{const}$			экспоненциальное изменение частоты, тест 1			экспоненциальное изменение частоты, тест 2			
		TVE	FE	RFE	TVE	FE	RFE	TVE	FE	RFE	
№ 1											