

К.С. ПОЛУЛЯХ, к.т.н., проф., НТУ "ХПИ",

Л.А. МЕДВЕДЕВА, доц. НТУ "ХПИ"

И.И. ТОПОЛОВ, ст. преп. НТУ "ХПИ"

К АНАЛИЗУ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРИРУЮЩИХ АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЦИФРОВЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ

В работе выполнен анализ метрологических характеристик помехозащищенных интегрирующих вольтметров, в которых используются в качестве входных устройств интегрирующие преобразователи частотного или временного типа. Так как свойства интегрирующих вольтметров полностью определяются видом входного устройства, сравнительный анализ характеристик вольтметров выполнен на основе исследования схем входных устройств.

Ключевые слова: метрологические характеристики, помехозащищенные интегрирующие вольтметры.

Введение. К цифровым вольтметрам, которые принято называть интегрирующими относятся вольтметры двойного интегрирования, которые содержат входной интегрирующий преобразователь измеряемого напряжения в длительность импульса и вольтметр частотного преобразования с входным интегрирующим преобразователем в частоту [1, 2].

Затем выходные параметры интегрирующих преобразователей: частота и временной промежуток квантуются точно так, как это происходит в частотомерах или хронометрах.

Следовательно, интегрирующий вольтметр содержит два преобразователя: входной аналоговый интегрирующий преобразователь измеряемого напряжения в частоту или длительность импульса и квантующий преобразователь [1, 3].

Такие свойства интегрирующих вольтметров, как получение результата измерения пропорционального среднему значению измеряемого напряжения и возможность осуществления помехозащищенности реализуются входным интегрирующим аналоговым преобразователем, работа которого не связана с цифровым преобразованием.

Следовательно, сравнительный анализ метрологических характеристик вольтметров частотного и временного преобразования может быть выполнен на основе исследования свойств входных интегрирующих аналоговых преобразователей.

© Полулях К.С., Медведева Л.А., Тополов И.И., 2012

Общая характеристика интегрирующих вольтметров. В вольтметрах двойного интегрирования (ДИ) используются преобразователи напряжения в длительность импульса. Преобразователи напряжения в частоту применяются в вольтметрах частотного преобразования (ЧП).

При построении помехозащищенных интегрирующих вольтметров обычно используется процесс двухтактного интегрирования определенной последовательности измеряемого и образцового напряжений, называемый циклом [1]. Процесс, проходящий в течение цикла описывается уравнениями, которые используются для определения измеряемого напряжения через известное образцовое.

В течение выполнения цикла интегрирования происходит сравнение двух напряжений, зависящих соответственно от измеряемого и образцового параметров, что характерно для большинства измерительных устройств.

Отличие интегрирующих приборов, например, от компенсаторов или мостов, которые работают в статических режимах, состоит в том, что компенсация осуществляется в динамике, когда каждому этапу процесса измерения отводится строго определенный отрезок времени.

В процессе измерения в первом такте цикла интегрирования выполняется интегрирование входного напряжения u в течение некоторого постоянного времени $t_{инт}$. Результат интегрирования определяется вольтсекундной площадью $S = U_{ex1} \cdot t_{инт}$, пропорциональной приращению выходного напряжения интегратора.

Процесс преобразования, выполняемый интегратором, в общем случае характеризуется уравнением:

$$U_{вых}(t) = -\int_0^t \frac{U_{ex} dt}{RC} = -\frac{U_{excp} t}{RC} = -\frac{S}{RC}; \quad (1)$$

где $U_{excp} = -\int_0^t U_{ex} dt$ – среднее значение напряжения $U_{ex}(t)$ за время t ;

$U_{вых}(t)$ – функция выходного напряжения интегратора $U_{вых}$.

На рис. 1 и 2 показаны схемы интеграторов, а также временные графики напряжений $U_{ex}(t)$ и $U_{вых}(t)$ для вольтметров ДИ и ЧП.

Во втором такте проходит процесс обратного интегрирования входного напряжения U_{ex2} противоположной полярности до момента, когда приращение выходного напряжения уменьшится до исходного значения. Полученная во втором такте отрицательная вольтсекундная площадь – S_2

по абсолютной величине будет равна S_1 . Напряжения U_{ax1} и U_{ax2} состоят из измеряемого U_x и образцового E_0 напряжений. Поэтому используя уравнение $S_1 - S_2 = 0$ можно определить U_x через известное образцовое напряжение E_0 .

Следовательно, суммарная вольтсекундная площадь за цикл интегрирования, состоящий из прямого и обратного тактов, будет равна нулю.

Помехозащищенность интегрирующих приборов основана на выборе величины времени интегрирования измеряемого напряжения U_x , равного или кратного периоду помехи. Тогда вольтсекундная площадь напряжения помехи за время интегрирования U_x , будет равна нулю, поэтому не будет оказывать влияния на результат измерения.

В дальнейшем в качестве конкретного примера будем считать, что помеху создает сетевое напряжение, имеющие период $T_c = 1/50$ с, поэтому время интегрирования измеряемого напряжения U_x выбираем равным T_c :

$$t_{инт} = T_c. \quad (2)$$

График напряжения помехи показан на рис. 1,а.

Исходные данные для сравнения ДИ и ЧП. Сделаем расчеты параметров вольтметров ДИ и ЧП, на основании которых выполним сравнительный анализ величин параметров указанных вольтметров.

Как показано на графиках (рис. 1,а и 2,а) при одинаковом времени интегрирования напряжения U_x , равном $t_{инт} = T_c$, за время интегрирования U_x в вольтметре ДИ пройдет один цикл интегрирования, состоящий из прямого и обратного тактов. В вольтметре ЧП за это же время пройдет число двухтактных циклов равное количеству шагов квантования.

Для справедливого сравнительного анализа характеристик вольтметров необходимо выбрать равные условия с точки зрения характеристик приборов по точности измерения, уровню помехозащищенности, частотным показателям, номинальному значению измеряемого напряжения и другим параметрам.

Выберем исходный режим, соответствующий измерению номинального значения напряжения $U_x = U_{хи}$. В этом режиме параметры вольтметров наиболее близки, при уменьшении напряжения U_x сходство параметров уменьшается. Графически режимы работы вольтмет-

ров при $U_x = U_{xH}$ показаны на рис. 1,а и 2,а.

В качестве одинаковых параметров вольтметров ДИ и ЧП выберем следующие:

1. Номинальное значение измеряемых напряжений U_{xH} .

2. Значение номинального выходного напряжения интегратора $U_{выхH}$ выберем равным напряжению U_{xH} :

$$-U_{xH} = U_{выхH}. \quad (3)$$

Указанные параметры связаны уравнением (1).

3. Для обеспечения одинаковой точности обоих вольтметров примем одинаковые значения номинального числа шагов квантования N_{xH} .

4. Для получения близких частотных режимов номинальную частоту f_{xH} выходного напряжения интегратора вольтметра ЧП при $U_x = U_{xH}$ будем считать равной частоте квантующего напряжения $f_{кв}$ вольтметра ДИ.

5. Чтобы создать равные условия помехозащищенности примем одинаковую длительность интегрирования измеряемого напряжения $t_{инт} = T_c$.

При выбранных условиях найдем некоторые численные соотношения между параметрами приборов. Введем обозначения: $\Delta t = 1/f_{кв}$ – шаг квантования временного отрезка t_x , пропорционального измеряемому напряжению в вольтметре ДИ, равный периоду квантующей частоты:

$$\Delta t = \frac{t_{xH}}{N_{xH}} \quad (4)$$

$T_{xH} = 1/f_{xH}$ – период выходной частоты f_{xH} интегратора при измерении номинального значения напряжения U_{xH} :

$$T_{xH} = \frac{T_c}{N_{xH}}. \quad (5)$$

Так как $f_{xH} = f_{KB}$ приравняем периоды Δt и T_{xH} определяемые уравнениями (4) и (5):

$$\Delta t = \frac{t_{xH}}{N_{xH}} = T_{xH} = \frac{T_c}{N_{xH}}. \quad (6)$$

Последовательно найдем уравнения определяющие характеристики вольтметров ДИ и ЧП.

Основные уравнения вольтметра ДИ. Представим уравнение интегрирования напряжений в двух тактах вольтметра ДИ. Процесс интегрирования в каждом такте соответствует уравнению (1). Уравнения составлены на основании графиков данных на рис. 1,а. Результаты расчетов внесены в таблицу. Временные параметры выражены через период помехи T_c , равный времени интегрирования $t_{инт}$ измеряемого напряжения U_x .

Параметры, имеющие размерность напряжения определены через U_{xH} .

Определим временные характеристики вольтметра ДИ. За время измерения, $t_{изм}$ как следует из рис. 1,а, проходит один цикл интегрирования:

$$N_{ц} = 1 \quad (7)$$

Цикл интегрирования состоит из двух тактов: прямого и обратного интегрирования продолжительностью соответственно $t_{xH} = T_c$ и t_x как следует из (6).

Длительность цикла интегрирования равна времени измерения

$$t_{изм} = T_c + t_x.$$

Значение t_x можно найти используя пропорциональные отношения:

$$\frac{t_x}{t_{xH}} = \frac{U_x}{U_{xH}} = \frac{t_x}{T_c} = \frac{N_x}{N_{xH}} \quad (8)$$

Откуда получим значение t_x :

$$t_x = T_c \frac{N_x}{N_{xH}} \quad (9)$$

Таблица – Основные уравнения вольтметров ДИ и ЧП

Наименование параметров	Уравнения вольтметра ДИ и номера формул		Уравнения вольтметра ЧП и номера формул	
	Количество циклов за время измерения	1	7	N_x
Длительность цикла t_u	$t_u = T_c \left(1 + \frac{N_x}{N_{xH}} \right)$	10	$t_u = \frac{T_c}{N_x}$	29
Длительность прямого такта	T_c	11	$t_0 = T_{xH} \cdot \frac{T_c}{N_x} \cdot A$	29
Входное напряжение прямого такта	$-U_x$	11	$-(E_0 - U_x)$	22
Вольтсекундная площадь S_1 прямого такта	$-S_1 = -U_x \cdot T_c$	11	$-S_1 = -(E_0 - U_x) \cdot t_0$	22
Длительность обратного такта	$t_x = T_c \cdot \frac{N_x}{N_{xH}}$	9	$t_2 = \frac{T_c}{N_x} - \frac{T_c}{N_{xH}} A$	31
Входное напряжение обратного такта	E_0	12	U_x	23
Вольтсекундная площадь S_2 обратного такта	$S_2 = E_0 \cdot T_c \cdot \frac{N_x}{N_{xH}}$	12	$S_2 = U_x \cdot (T_x - t_0)$	23
Уравнение измерения	$U_x = \frac{E_0 \cdot \Delta t \cdot N_x}{T_c}$	13	$U_x = \frac{E_0 \cdot t_0 \cdot N_x}{T_c}$	25
Время измерения	$t_{изм} = T_c \left(1 + \frac{N_x}{N_{xH}} \right)$	10	$t_{изм} = T_c$	21
Длительность периодов счетных импульсов	$\Delta t = \frac{T_c}{N_{xH}}$	4	$T_x = \frac{T_c}{N_x}$	26
Отношение $A = \frac{U_{xH}}{E_0}$	$A = \frac{U_{xH}}{E_0} = 1$	16	$A = \frac{t_0}{T_{xH}} = \frac{U_{xH}}{E_0} < 1$	28
Шаг квантования ΔU	$\Delta U = \frac{U_{xH}}{N_{xH}}$	19	$\Delta U = \frac{U_{xH}}{N_{xH}}$	33
Постоянная времени RC	$RC = T_c$	20	$RC = \frac{T_c}{N_{xH}} (1 - A)$	34

Следовательно:

$$t_{изм} = T_c + t_{хн} \frac{U_x}{U_{хн}} = T_c \left(1 + \frac{N_x}{N_{хн}} \right) \quad (10)$$

Определим уравнения измерения вольтметра ДИ.

$$U_{вых} = -\frac{U_x \cdot T_c}{RC} = -\frac{S_1}{RC}; \quad (11)$$

$$-U_{вых} = \frac{E_0 \cdot t_x}{RC} = \frac{S_2}{RC}; \quad (12)$$

где $-S_1 = -U_x \cdot T_c$ и $S_2 = E_0 \cdot t_x$ соответственно вольтсекундные площади, относящиеся к прямому и обратному тактам; E_0 – образцовое напряжение.

Сложив уравнения (11) и (12) получим:

$$S_2 - S_1 = E_0 \cdot t_x - U_x \cdot T_c = 0$$

Откуда найдем уравнение измерения:

$$U_x = \frac{E_0 \cdot t_x}{T_c} = \frac{E_0 \cdot \Delta t \cdot N_x}{T_c} \quad (13)$$

Преобразование (13) выполнено на основании следующего уравнения:

$$t_x = \Delta t \cdot N_x \quad (14)$$

Определим уравнение измерения из (13) при номинальном значении напряжения $U_x = U_{хн}$:

$$U_{хн} = \frac{E_0 \cdot t_{хн}}{T_c} = \frac{E_0 \cdot \Delta t \cdot N_{хн}}{T_c} \quad (15)$$

Введем обозначение $A = U_{хн} / E_0$. Определим значение A , подставив в (15) величину $T_c = t_{хн}$ из (6):

$$\frac{U_{хн}}{E_0} = A = 1 \quad (16)$$

Для определения шага квантования ΔU представим уравнение измерения в общем виде:

$$U_{хн} = \Delta U \cdot N_{хн} \quad (17)$$

Сопоставив уравнения (15) и (17), можно сделать следующий вывод:

$$\Delta U = \frac{E_0 \cdot \Delta t}{T_c} \quad (18)$$

Подставив в (18) величины $T_c = \Delta t \cdot N_{xH}$ и $E_0 = U_{xH}$, найденные соответственно из уравнений (6) и (16), определим значение шага квантования ΔU измеряемого напряжения U_x :

$$\Delta U = \frac{U_{xH}}{N_{xH}} \quad (19)$$

Постоянную времени RC найдем из уравнения (11) или (12), подставив полученные соответственно из (3) и (16) значения $U_{\text{выхH}} = U_{xH}$ и $E_0 = U_{xH}/A$:

$$RC = T_c \quad (20)$$

Основные уравнения вольтметра ЧП. Таким же путем определим аналогичные параметры вольтметра ЧП. В соответствии с графиком, данным на рис. 2,а, найдем время измерения $t_{\text{изм}}$ согласно (6):

$$t_{\text{изм}} = t_{\text{инт}} = T_c \quad (21)$$

Длительность цикла интегрирования равна периоду частоты f_x , значение которого составляет величину T_x .

Продолжительности прямого и обратного тактов выражаются величинами соответственно t_0 и $T_x - t_0$.

Определим уравнения для интегратора в соответствии с выражением (1):

$$U_{\text{вых}} = -\frac{(E_0 - U_x) \cdot t_0}{RC} = -\frac{S_1}{RC}; \quad (22)$$

$$-U_{\text{вых}} = -\frac{U_x \cdot (T_x - t_0)}{RC} = \frac{S_2}{RC}; \quad (23)$$

где $-S_1 = -(E_0 - U_x) \cdot t_0$ и $S_2 = U_x \cdot (T_x - t_0)$ – вольтсекундные площади, соответствующие прямому и обратному тактам.

Сложив уравнения (22) и (23) получим:

$$S_2 - S_1 = U_x \cdot (T_x - t_0) - (E_0 - U_x) \cdot t_0 \quad (24)$$

Откуда найдем уравнение измерения:

$$U_{xH} = \frac{E_0 \cdot t_0}{T_x} = \frac{E_0 \cdot t_0 \cdot N_x}{T_c} \quad (25)$$

Преобразование (25) выполнено на основе уравнения:

$$T_x = \frac{T_c}{N_x}. \quad (26)$$

Определим уравнение измерения из (25) при номинальном значе-

нии напряжения $U_x = U_{xH}$:

$$U_{xH} = \frac{E_0 \cdot t_0}{T_{xH}} = \frac{E_0 \cdot t_0 \cdot N_{xH}}{T_c} \quad (27)$$

Введем обозначение $A = \frac{U_{xH}}{E_0}$. Определим значение A из уравнения (27):

$$\frac{U_{xH}}{E_0} = \frac{t_0}{T_{xH}} = \frac{t_0 \cdot N_{xH}}{T_c} = A < 1 \quad (28)$$

Неравенство $A < 1$ вытекает из того положения, что как видно из графика на рис. 2,а, длительность прямого такта t_0 всегда меньше продолжительности цикла, которая при U_{xH} равна T_{xH} .

Определим параметры циклов интегрирования вольтметра ЧП.

За время измерения T_c проходит число циклов, равное числу ступеней квантования N_x . Следовательно, длительность цикла интегрирования t_u будет:

$$t_u = \frac{T_c}{N_x} = T_x ; \quad (29)$$

где T_x – период повторения счетных импульсов, число которых за время измерения равно N_x .

Длительность прямого такта интегрирования в каждом цикле имеет значение t_0 , величину которого можно определить из (28):

$$t_0 = \frac{A \cdot T_c}{N_{xH}} = T_{xH} \cdot A . \quad (30)$$

Длительность t_0 – величина постоянная $t_0 = const$.

Продолжительность обратного такта t_2 определится из уравнения $t_u = t_0 + t_2$, следовательно:

$$t_2 = t_u - t_0 = T_x - t_0 = \frac{T_c}{N_x} - \frac{T_c \cdot A}{N_{xH}} . \quad (31)$$

Для определения шага квантования воспользуемся уравнением измерения в общем виде, представленном в (17).

Сопоставив уравнения (12) и (19), можно сделать следующий вывод:

$$\Delta U = \frac{E_0 \cdot t_0}{T_c} . \quad (32)$$

Подставив в (32) значения $E_0 = N_{xH} / A$ и $t_0 = T_{xH} \cdot A$ из (28) и $T_c = T_{xH} \cdot N_{xH}$ из (6) определим значения шага квантования ΔU измеряемого напряжения:

$$\Delta U = \frac{U_{xH}}{N_{xH}} \quad (33)$$

Значение постоянной времени RC найдем из уравнения (22) или (23), подставив полученную из (3) величину $U_{выхH} = -U_{xH}$, значения рассчитанных из (28) параметров $E_0 = U_{xH} / A$ и $t_0 = AT_c / N_{xH}$, а также номинальную величину периода $T_{xH} = T_c / N_{xH}$, найденную из (6). В результате получим:

$$RC = \frac{T_c}{N_{xH}} (1 - A) \quad (34)$$

Полученные уравнения параметров и их номера даны в таблице.

Порядок расчета параметров помехозащищенного интегрирующего вольтметра двойного интегрирования.

1. Длительность импульса на выходе формирователя строб импульса (ФСИ).

Как показано на схеме и графике рисунка 1 в прямом такте цикла интегрирования на выходе ФСИ возникает импульс постоянной длительности, управляющий продолжительностью процесса интегрирования. Длительность импульса, как показано в таблице, определяется уравнением (11) и равна T_c .

2. Значение образцового напряжения E_0 .

Согласно (16) величина образцового напряжения E_0 определяется уравнением:

$$E_0 = \frac{N_{xH}}{A};$$

где $A = 1$

3. Расчет значения квантующей частоты.

Квантующая частота определяется уравнением:

$$f_k = \frac{N_{xH}}{T_c}.$$

4. Постоянная времени RC .

Значение постоянной времени определяется уравнением (20):

$$RC = T_c.$$

При расчете задают один из параметров R или C и определяют второй.

5. Время измерения $t_{изм}$.

Длительность времени измерения зависит от измеряемой величины U_x и определяется уравнением (10):

$$t_{изм} = T_c \left(1 + \frac{N_x}{N_{xH}} \right).$$

Время измерения равно длительности цикла, состоящего из двух тактов.

Порядок расчета параметров помехозащищенного интегрирующего вольтметра частотного преобразования.

Сравнительные данные расчета вольтметров ДИ и ЧП даны в таблице.

1. Длительность импульса на выходе формирователя стробимпульсов.

Как показано на схеме и графике рисунка 2 в прямом такте цикла интегрирования на выходе ФСИ возникает импульс постоянной длительности, управляющий продолжительностью процесса интегрирования. Длительность импульса определяется уравнением (29) и равна:

$$t_0 = T_{xH} \cdot A = \frac{T_c}{N_{xH}} \cdot A.$$

2. Значение образцового напряжения E_0 .

Согласно уравнению (28) величина образцового определяется уравнением:

$$\frac{U_{xH}}{E_0} = \frac{t_0}{T_{xH}} = A < 1.$$

Значение A выбирается с соблюдением приведенного условия.

3. Расчет значения выходной частоты интегратора.

Выходная частота интегратора зависит от измеряемого напряжения и определяется уравнением:

$$f_x = \frac{1}{T_x} = \frac{N_x}{T_c}.$$

4. Постоянная времени RC .

Значение постоянной времени вычисляется из уравнения (34):

$$RC = f_x = \frac{T_c}{N_{xH}} (1 - A).$$

При расчете задается один из параметров R или C и определяют

второй.

5. Время измерения $t_{изм}$.

Время $t_{изм}$ согласно (21) определяется уравнением:

$$t_{изм} = T_c$$

Вывод: При выборе типа вольтметра для решения определенной задачи следует принимать во внимание, что максимальное время измерение вольтметра ДИ в 2 раза больше чем в вольтметре ЧП.

Постоянная времени в вольтметре ЧП почти в $N_{\text{ин}}$ раз меньше чем при двойном интегрировании, что может затруднить реализацию RC из-за малых значений параметров R и C .

Анализ показывает, что в вольтметрах ДИ и ЧП отличаются по величине такие параметры: $t_{изм}$, E_0 , RC , длительности импульсов на выходе формирователей строб-импульсов.

Период квантующих импульсов Δt вольтметра ДИ равен длительности прямого такта интегрирования t_0 вольтметра ЧП:

$$\Delta t = t_0 = const$$

Результат измерения пропорционален среднему значению измеряемого напряжения за время $t_{инт} = T_c$.

Следует отметить различие режимов работы частотных и временных входных преобразователей.

Частотный преобразователь работает непрерывно, а измерение происходит после импульса запуска (ИЗ) измерителя f_x (рис. 2,б).

При использовании временного преобразователя после импульса запуска одновременно начинает работать преобразователь и измеритель длительности импульса, процесс повторяется после следующего импульса запуска (рис. 1,б).

Список литературы: 1. В.С. Гутников Интегральная электроника в измерительных устройствах, Ленинград, Атомиздат. – 1988. – С. 305. 2. Е.М. Душин Основы метрологии и электрические измерения, Ленинград, Атомиздат. – 1987. – С. 479. 3. В.М. Чинков. Цифрові вимірювальні прилади, Харків, НТУ "ХПІ". – 2008. – С. 507.

Поступила в редколлегию 03.06.12

УДК 621.317.725.083.92

К анализу метрологических характеристик интегрирующих аналоговых преобразователей цифровых вольтметров / Полулях К.С., Медведев Л.А., Тополов И.И. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення

електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 146-159. Бібліогр.: 3 назв.

В роботі виконано аналіз метрологічних характеристик заводо захищених інтегрувальних вольтметрів, в яких використовуються в якості вхідних пристроїв інтегрувальні перетворювачі частотного або часового типу. Оскільки властивості інтегрувальних вольтметрів повністю визначаються видом вхідного пристрою, порівнювальний аналіз характеристик вольтметрів виконаний на основі дослідження схем вхідних пристроїв.

Ключові слова: метрологічні характеристики, перешкодозахищеність інтегруючі вольтметри.

In this paper we analyzed the metrological characteristics of interference-tolerant integrating voltmeters, in which integrating transducers of frequency or time type as input devices are used. Since the properties of integrating voltmeters are completely determined by the type of the input device, a comparative analysis of the characteristics of voltmeters based on the investigation of schemes of input devices is carried out.

Keywords: metrological characteristics, interference immunity, integrating voltmeters.