

Помехоустойчивость тераомметров на основе измерителей тока

Е. В. ЯКИМОВ, В. К. ЖУКОВ

Описаны результаты исследования известных схем тераомметров по критерию помехоустойчивости. Выбрана наиболее оптимальная по данному критерию схема, обеспечивающая время измерения не более 30 с. Дана оценка уровня воздействующих помех частотой 50 Гц. Диапазон измерения при экспериментах 1 МОм — 1000 ГОм.

Ключевые слова: тераомметр, помехоустойчивость, экспериментальная проверка, оптимальный режим.

The results of experimental research of the known teraohmmeter schemes on noise-immunity criterion are described. The most optimal on the given criterion scheme, providing the time of measurement not more than 30 s is chosen. The noise level of frequency 50 Hz is estimated. The range of measurement at experiments is from 1 MΩ to 1000 GΩ.

Key words: teraohmmeter, noise-immunity, experimental checking, optimal mode.

Проблема помехоустойчивости является практически одной из основных для тераомметров. Воздействие помех промышленной частоты 50 Гц вызывает погрешности измерения, а в случае превышения некоторого критического уровня нарушает нормальную работу прибора. При этом происходит смещение уровня постоянной составляющей выходного сигнала, вызванное искажением синусоидальной формы помехи, т. е. когда уровень полезного сигнала и сигнала помехи стремится превысить максимальное выходное напряжение. Как правило, решением проблемы может служить экранирование объекта исследования, но в ряде случаев его сложно выполнить.

Поиск теоретического метода определения оптимального режима работы тераомметров, при котором приборы не подвержены влиянию внешних помех, остается нерешенной задачей. Кроме того, нет количественной оценки уровня помех, воздействующих на измерительные приборы типа тераомметров, и физико-математического описания причин их возникновения. При использовании тераомметров для контроля сопротивления изоляции экранированного кабеля и конденсаторов возникает еще одна проблема: устранение влияния большой емкости исследуемого объекта, так как при этом либо излишне возрастает время измерения, либо прибор входит в неустойчивый режим работы.

Практически в единственной работе [1] по данной тематике рассмотрены причины возникновения помех промышленной частоты и структурные методы защиты от них. При этом описаны тераомметры, которые выполнены на основе измерителей тока [2] и содержат устройства, фильтрующие помехи непосредственно в первичном преобразователе. Но четкого вывода о том, какая из рассмотренных схем наиболее рациональна, сделать нельзя. Варианты схем помехоустойчивых тераомметров приведены также в [3, 4].

Для сравнительного анализа различных схем тераомметров по критерию помехоустойчивости были выполнены эксперименты. Исследовали три схемы: на одном операционном усилителе (ОУ) с конденсатором в цепи обратной связи (рис. 1); с повторителем напряжения на входе (рис. 2); с интегратором напряжения на входе (рис. 3).

В качестве основного чувствительного элемента использовали операционный усилитель M_1 типа TLC272CN ($I_{вх} < 1$ пА). Кроме оценки амплитуды помех U_n частотой 50 Гц, на выходе первичного преобразователя измеряли время установления $t_{уст}$ показаний на уровне 95 % и максимальное отклонение показаний ΔU при воздействии помех от движущихся вблизи прибора объектов (оператора). Воздействие оператора оценивали субъективно. Тем не менее, учитывая, что фиксировалось максимальное отклонение

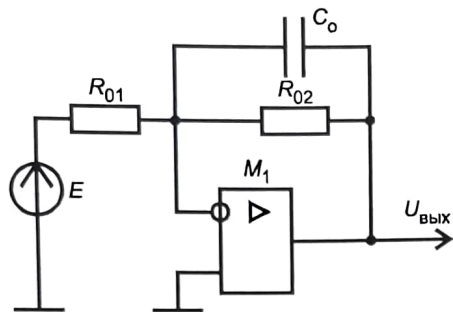


Рис. 1. Помехоустойчивый тераомметр с одним операционным усилителем и конденсатором в цепи обратной связи

показаний, можно считать условия исследования различных схем одинаковыми: максимальная скорость движения одного и того же человека примерно постоянна.

Усилитель M_1 типа TLC272CN имел напряжение питания ± 5 В, усилители M_2 и M_3 типа К140УД17Б — ± 15 В. Резисторы R_{01} , R_{02} типов КЛМ и КВМ имели допуски 5 — 20 %, остальные резисторы — до 5 %. Элементы исследуемых схем располагались на одной монтажной плате из стеклотекстолита, причем усилитель M_1 и резисторы R_{01} , R_{02} размещались на отдельных фторопластовых площадках.

В [1] приведены типовые структуры помехозащищенных тераомметров, в которых второй каскад тераомметра (по схемам на рис. 2 и 3 — на основе усилителя M_2) рассматривался как некоторый произвольный фильтр. В качестве примера показана схема тераомметра с пассивным резистивно-емкостным фильтром низких частот второго порядка. При проведении экспериментального исследования в рамках настоящей работы был выбран активный фильтр первого порядка, вырождающийся в интегратор при некоторых сочетаниях параметров элементов. Такой подход представляется оправданным, поскольку значительного улучшения свойств тераомметра при увеличении порядка фильтра достичь не удается: имеется пороговое значение инерционности, после которого в схеме либо не происходит существенных изменений, либо излишне возрастает время установления.

Результаты эксперимента. Первой была исследована схема с одним операционным усилителем, которая приведена на рис. 1. Сначала эксперимент был выполнен при емкости конденсатора $C_0 = 0$ (при отсутствии конденсатора). Следует отметить, что, как правило, приборы для измерения больших сопротивлений выполнены по данной схеме. Нормальная работа преобразователя возможна примерно до 100 МОм (при $R_x = R_{01}$ и $R_{02} = 10$ МОм), время установления при этом около 1 с, уровень помех на выходе преобразователя 0,6 В, вариация показаний от воздействия движения оператора $\pm 0,36$ %. При измерении сопротивлений бо-

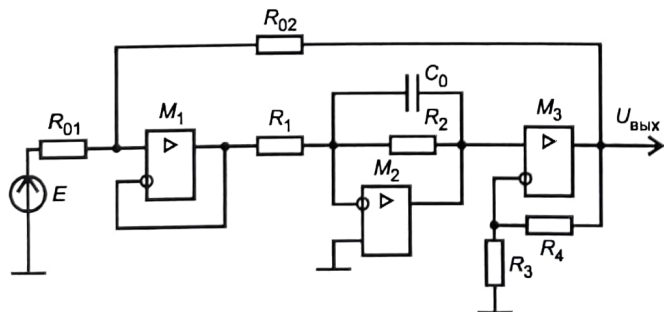


Рис. 2. Помехоустойчивый тераомметр с повторителем напряжения в первом каскаде

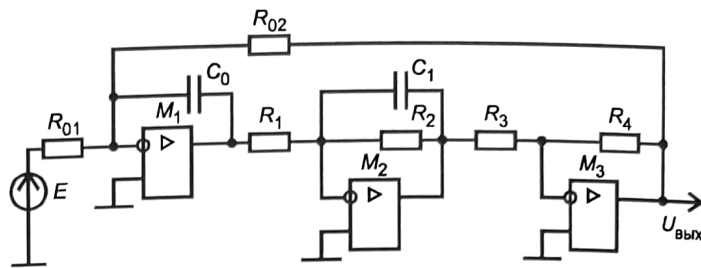


Рис. 3. Помехоустойчивый тераомметр с интегратором в первом каскаде

лее 100 МОм уровень помех превышает критический, и сигнал на выходе первичного преобразователя искажается.

Влияние помех на тераомметр можно охарактеризовать током помех на входе и представить при расчетах генератором тока, подключенным между инвертирующим входом операционного усилителя и общим проводом [1]. По результатам эксперимента амплитуда помехи частотой 50 Гц, воздействующей на преобразователь, достигает 60 нА (для вычисления достаточно поделить амплитуду напряжения помехи U_n на выходе усилителя на сопротивление в цепи обратной связи R_{02}).

В табл. 1 приведены характеристики тераомметра для различных сочетаний сопротивлений R_{01} и R_{02} при опорном напряжении $E = -5$ В.

Таблица 1

Результаты исследования тераомметра по схеме на рис. 1 при отсутствии конденсатора C_0 в цепи обратной связи

R_{01} , МОм	R_{02} , МОм	$U_{\text{вых}}$, В	U_n , В	ΔU , В	$t_{\text{уст}}$, с
1	1	5,0	0,25	5,0	менее 1
10	1	0,488	0,25	0,488	менее 1
100	10	0,554	0,6	0,552—0,556	менее 1
100	100	4,03	4 (уровень помех превышает критический)		
1100	100	0,562	6 (на границе насыщения)	0,47—0,56	—

При наличии конденсатора C_0 помехоустойчивость схемы, показанной на рис. 1 возрастает. В табл. 2 приведены характеристики схемы для различных сочетаний сопротивлений R_{01} , R_{02} и емкости C_0 , $E = -5$ В. Видно, что в данном случае возможна работа до значительно больших пределов ($R_x = R_{01} = 1000$ ГОм), чем по той же схеме при отсутствии конденсатора C_0 , но время установления при этом слишком велико (до 12 мин и выше).

Приходится идти на компромисс между уровнем ослабления помех и временем установления показаний, выбирая емкость конденсатора C_0 . При емкости $C_0 = 3200$ пФ, сопротивлениях $R_x = R_{01} = 1,1$ ГОм и $R_{02} = 100$ МОм время установления достигает 1 с, уровень помех на выходе преобразователя 125 мВ, вариация показаний от воздействия движений оператора $\pm 3,6$ %.

Вторая исследуемая схема тераомметра показана на рис. 2. Режимы работы тераомметра можно выбирать, изменяя емкость C_0 , а также коэффициенты передачи по постоянному току усилителей M_2 и M_3 (сопротивления $R_1 - R_4$); $E = -5$ В. Варианты данной схемы приведены в [1, 3]. Однако в схеме, описанной в [3], усилитель M_3 отсутствует, что эквивалентно для схемы на рис. 2 его работе в режиме повто-

Таблица 2

Результаты исследования тераомметра по схеме на рис. 1 с конденсатором C_0 в цепи обратной связи

C_0 , пФ	R_{01} , ГОм	R_{02} , ГОм	$U_{\text{вых}}$, В	$U_{\text{п}}$, В	ΔU , В	$t_{\text{уст}}$
18	82	8,9	0,5	0,75	0,0—1,0	менее 2 с 5 с
120	82	8,9	0,538	0,25	0,35—0,7	
560	82	8,9	0,538	0,1	0,51—0,59	14 с
	100	100	5,36	0,1	5,38—5,345	182 с
	1000	100	0,518	0,3	0,44—0,5	—
3200	1,1	0,1	0,551	0,125	0,53—0,57	менее 1 с 7 с
	8,9	1,1	0,515	0,125	0,506—0,525	
	82	8,9	0,53	0,125	0,505—0,548	72 с
	100	100	5,088	0,125	5,092—5,10	12 мин
	1000	100	0,45	0,125	0,43—0,46	более 12 мин

рителя напряжения, когда $R_3 = \infty$ и (или) $R_4 = 0$, а усилитель M_2 работает в режиме интегратора ($R_2 = \infty$).

В табл. 3 приведены результаты экспериментальной проверки схемы на рис. 2 при опорном напряжении $E = -5$ В и -50 В. Видно, что нормальная работа схемы возможна примерно до 1 ГОм. При оптимальных параметрах схемы $C_0 = 1$ мкФ, $R_1 = 1,2$ МОм, $R_2 = \infty$, $R_3 = \infty$, $R_4 = 1,2$ МОм время установления достигает 7 с, уровень помех 15 мВ, вариация показаний от воздействия движений оператора $\pm 3,9$ %. При измерении сопротивлений более 1 ГОм нарушается устойчивость тераомметра, и схема не может функционировать (выходное напряжение преобразователя не зависит от измеряемого сопротивления).

Отклонение параметров схемы от оптимального сочетания приводит к возрастанию уровня помех на выходе преобразователя или повышению чувствительности к помехам от движущихся вблизи схемы объектов (оператора). При некоторых сочетаниях параметров значительно уменьшается общий коэффициент усиления трех усилителей $M_1—M_3$, что

противоречит условию нормальной работы операционного усилителя с обратной связью. Например, сочетание низкого коэффициента передачи усилителя M_2 ($R_2 / R_1 < 1000$) и коэффициента передачи усилителя M_3 , равного единице (режим повторителя напряжения), приводит к тому, что общий коэффициент усиления трех каскадов становится меньше 1000.

Уменьшение емкости C_0 (например, до 0,1 мкФ или 3 нФ) вызывает неустойчивость схемы, поскольку уменьшается степень подавления помех. Повышение опорного напряжения в десять раз также не улучшает помехоустойчивость. Таким образом, неустойчивость преобразователя является следствием его структурного построения.

Согласно [1] критический уровень помехи на входе (выходе) повторителя ограничен уровнем напряжения питания, выше которого полезный сигнал искажается. Практическая проверка с помощью осциллографа показывает, что нарушение нормального режима работы преобразователя при сопротивлении $R_{02} \geq 1,1$ ГОм вызвано превышением уровня помех на входе повторителя M_1 над уровнем напряжения питания ± 5 В.

Третья схема, для которой проводилось исследование, показана на рис. 3. В данной схеме имеется возможность выбирать емкости C_0 , C_1 и коэффициенты передачи по постоянному току усилителей на основе операционных усилителей M_2 , M_3 (сопротивления $R_1—R_4$). Благодаря тому, что первый каскад тераомметра имеет большой коэффициент передачи по постоянному току, коэффициенты передачи усилителей M_2 и M_3 могут принимать значения в большем диапазоне, чем по схеме на рис. 2, и даже быть меньше единицы.

Варианты данной схемы приведены в [1, 4]. Однако схему, описанную в [4], можно считать лишь близким аналогом, поскольку в ней отсутствуют конденсатор C_0 ($C_0 = 0$), усилитель M_3 , резисторы R_3 , R_4 , а усилитель M_1 включен в неинвертирующем режиме для обеспечения отрицательной обратной связи. В схеме, приведенной в [1], емкость C_0 достаточно мала, только 33 пФ, но параллельно резистору обрат-

Таблица 3

Результаты экспериментальной проверки схемы на рис. 2 с повторителем напряжения на входе ($C_0 = 1$ мкФ)

R_2 / R_1	R_4 / R_3	R_{01}	R_{02}	$U_{\text{вых}}$, В	$U_{\text{п}}$, мВ	ΔU , В	$t_{\text{уст}}$, с	
$\frac{\infty}{1,2 \text{ МОм}}$	$\frac{1,2 \text{ МОм}}{\infty}$	100 МОм	10 МОм	0,554	4	0,552—0,555	3	
		100 МОм	100 МОм	5,065	7,5	5,06—5,075	7	
		1,1 ГОм	100 МОм	0,555	15	0,592—0,64	2	
		3,3 ГОм	1,1 ГОм	Плавный дрейф до уровня питания ОУ				
	$\frac{1,2 \text{ МОм}}{130 \text{ кОм}}$	1,1 ГОм	100 МОм	0,56	125	0,61—0,7	2	
$\frac{10 \text{ МОм}}{1,2 \text{ МОм}}$	$\frac{1,2 \text{ МОм}}{130 \text{ кОм}}$	1,1 ГОм	50 МОм	0,275	80	0,274—0,284	—	
		1,1 ГОм	100 МОм	1,1	130	1,07—1,26	1	
		$U_{\text{вых}}$ должно быть 0,55 В						
		3,3 ГОм	1,1 ГОм	Плавный дрейф до уровня питания ОУ				
$\frac{100 \text{ МОм}}{1,2 \text{ МОм}}$	$\frac{1,2 \text{ МОм}}{\infty}$	1,1 ГОм	50 МОм	0,275	10	0,273—0,281	3	
		1,1 ГОм	100 МОм	1,15	$U_{\text{вых}}$ должно быть 0,55 В			
		3,3 ГОм	1,1 ГОм	Плавный дрейф до уровня питания ОУ				

Результаты исследования тераомметра по схеме на рис. 3 с интегратором в первом каскаде при $C_1 = 1$ мкФ

C_0	R_2/R_1	R_4/R_3	R_{01} , ГОм	R_{02}	$U_{\text{вых}}(E)$, В	$U_{\text{п}}$, мВ	ΔU , В	$t_{\text{уст}}$, с
560 пФ	$\frac{\infty}{1,2 \text{ МОм}}$	$\frac{1,2 \text{ МОм}}{12 \text{ кОм}}$	1,1	100 МОм	0,554 (5)	30	0,5—0,6	13
		$\frac{1,2 \text{ МОм}}{1,2 \text{ кОм}}$	1,1	100 МОм	Уровень помех превышает критический, выше уровней питания			
	$\frac{130 \text{ кОм}}{120 \text{ кОм}}$	$\frac{1,2 \text{ МОм}}{1,2 \text{ МОм}}$	8,9	1,1 ГОм	0,515 (5)	7,5	0,45—0,56	2
		$\frac{2,4 \text{ МОм}}{1,2 \text{ МОм}}$	1,1	100 МОм	0,554 (5)	12,5	0,47—0,61	1
			8,9	1,1 ГОм	0,515 (5)	—	0,4—0,63	1
			82	8,9 ГОм	0,538 (5)	12	0,45—0,64	12
	$\frac{1 \text{ МОм}}{120 \text{ кОм}}$	$\frac{2,4 \text{ МОм}}{1,2 \text{ МОм}}$	2,2	2,2 ГОм	5,47 (5)	15	5,46—5,59	6
			82	8,9 ГОм	0,538 (5)	15	0,18—0,84	—
	$\frac{130 \text{ кОм}}{1 \text{ МОм}}$	$\frac{2,4 \text{ МОм}}{120 \text{ кОм}}$	1,1	100 МОм	0,552 (5)	—	0,53—0,58	—
		100	100 ГОм	5,38 (5)	—	5,2—5,8	—	
	$\frac{2,4 \text{ МОм}}{12 \text{ кОм}}$	$\frac{2,4 \text{ МОм}}{12 \text{ кОм}}$	1,1	100 МОм	0,552 (5)	—	0,54—0,56	—
			1,1	100 ГОм	0,552 (5)	—	0,54—0,57	—
	$\frac{130 \text{ кОм}}{130 \text{ кОм}}$	$\frac{2,4 \text{ МОм}}{120 \text{ кОм}}$	1,1	100 МОм	0,552 (5)	—	0,54—0,57	—
	$\frac{130 \text{ кОм}}{1 \text{ МОм}}$	$\frac{2,4 \text{ МОм}}{120 \text{ кОм}}$	1,1	100 МОм	5,53 (50)	—	5,4—5,6	—
8,9			1,1 ГОм	5,195 (50)	—	4,9—5,5	—	
100			1,1 ГОм	0,468 (50)	—	0,33—0,57	—	
3 нФ	$\frac{130 \text{ кОм}}{1 \text{ МОм}}$	$\frac{2,4 \text{ МОм}}{120 \text{ кОм}}$	1000	8,9 ГОм	0,44 (50)	—	0,3—0,6	—
			8,9	1,1 ГОм	5,52 (50)	2,5	5,19—5,24	3
			100	1,1 ГОм	0,47 (50)	5	0,45—0,5	3
33 нФ	$\frac{130 \text{ кОм}}{1 \text{ МОм}}$	$\frac{2,4 \text{ МОм}}{120 \text{ кОм}}$	1000	8,9 ГОм	0,44 (50)	5	0,4—0,48	~30
			100	1,1 ГОм	0,47 (50)	—	0,46—0,48	более 60

ной связи R_{02} подключен конденсатор емкостью 7,5 пФ. При столь малых значениях емкостей (см. табл. 2 и 4) приборы подвержены влиянию помех от перемещающихся вблизи проводящих объектов (например человека).

Результаты экспериментальной проверки при опорном напряжении $E = -5$ В и -50 В приведены в табл. 4. Видно, что оптимальная помехозащищенность тераомметра с интегратором на входе достигается при следующем сочетании параметров: $C_0 = 3$ нФ, $C_1 = 1$ мкФ, $R_1 = 1$ МОм, $R_2 = 130$ кОм, $R_3 = 120$ кОм, $R_4 = 2,4$ МОм (увеличение емкости C_0 до 33 нФ приводит к значительному возрастанию времени установления, а при уменьшении до 560 пФ возрастает чувствительность к помехам). При этом предельное значение измеряемых сопротивлений достигает 1000 ГОм (далее эксперименты не проводились), а время установления не превышает 30 с. Недостатком является чувствительность к воздействию перемещающихся объектов (например оператора). Сигнал

может изменяться при этом на $\pm 9\%$, но другие схемы на тех же пределах (свыше 1 ГОм) вообще не работают или работают намного медленнее.

При измерении сопротивления $R_x = R_{02} = 1,1$ ГОм время установления достигает 3 с, уровень помех на выходе преобразователя 2,5 мВ, вариация показаний от воздействия движения оператора $\pm 0,48\%$.

Отклонение параметров схемы на рис. 3 от оптимальных значений, как правило, снижает помехоустойчивость. Например, такое действие оказывает уменьшение емкости конденсаторов C_0 и C_1 . В то же время увеличение этих емкостей приводит к росту времени установления. Излишнее повышение коэффициентов передачи усилителей M_2 и M_3 также снижает помехоустойчивость схемы.

Следует отметить, что в табл. 4 приведены лишь некоторые примеры сочетания параметров схемы, тогда как в ходе эксперимента исследовали также другие варианты.

Выводы. Из сравнения схем рис. 1—3 следует, что наилучшие характеристики имеет схема на рис. 3. Но, если по условиям эксперимента допустимо время установления показаний около 1 мин и выше, то можно также использовать схему на рис. 1.

Схема на рис. 2 с повторителем напряжения представляет альтернативу схеме с интегратором на входе в диапазоне до 1 ГОм, но уступает ей по стабильности показаний: схема на рис. 3 имеет нестабильность $\pm 0,48\%$, а схема на рис. 2 — $\pm 3,9\%$.

Сопротивления свыше 1 ГОм можно измерять только по схемам на рис. 1, 3. Однако время установления в схеме на рис. 3 намного меньше. Например, при сопротивлении 82 ГОм время установления показаний схемы на рис. 2 равно 72 с, тогда как для схемы на рис. 3 оно равно 3 с. При этом обеспечивается также преимущество по стабильности показаний: соответственно $\pm 4,1$ и $\pm 0,92\%$.

Схемы на рис. 2 и 3 при включении конденсатора параллельно резистору обратной связи R_{02} , как показано на рис. 1, ведут себя аналогично тем же схемам без конденса-

тора или же аналогично схеме на рис. 1 в зависимости от его емкости. Чем больше емкость, тем выше инерционность тераомметра, и тем ближе он по своим свойствам к тераомметру на одном операционном усилителе с конденсатором в цепи обратной связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ансо М. Х.** // Приборы и техника эксперимента. — 1983. — № 4. — С. 158.
2. **Илюкович А. М.** Техника электрометрии. — М.: Энергия, 1976.
3. **Антоненко В. И.** // Приборы и техника эксперимента. — 1990. — № 6. — С. 115.
4. **Хоровиц П., Хилл У.** Искусство схемотехники. В 3-х томах. Т. 2 / Пер. с англ. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Мир, 1993. — С. 84.

Дата одобрения 06.12.2002 г.