

## РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щеглов, С. Основы формирования углового распределения силы света при конструировании ПСП [Текст] / С. Щеглов, Д. Николаев // Полупроводниковая светотехника. Выпуск 2, 2010. — С. 42-45.
2. Патент 2309455 Российская Федерация, МПК7 G01B 9/08, G06K 9/34. Способ компенсации погрешности масштабирования системы технического зрения для микроизмерений [Текст] / Ю.К. Евдокимов, М.И. Николаев, А.Н. Доронин; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-технический центр «Восток». — № 2005140712/28; заявл. 26.12.2005; опубл. 27.10.2007, Бюл. № 30. — 5 с.
3. Кафедра приборостроения [Электронный ресурс] УМК / Николаев М.И. — Электрон. дан. — ЧФ КНИТУ-КАИ, 2014.— Режим доступа: <https://sites.google.com/site/nmiquality/>, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус.
4. Светодиодные светильники: Диаграмма направленности [Электронный ресурс] / Tesla Light Company. — Электрон. дан. — Tesla Light Company, 2011-2014.— Режим доступа: <http://teslalc.ru/company/>, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус., англ.
5. Булдыгин, А. Обзор оптических систем для LED [Текст] / А. Булдыгин // Новости электроники. Выпуск 17, 2008. — С. 23-27.

*Доронин А.Н., к.т.н., директор ООО «НТЦ «Восток», Николаев М.И. к.т.н., доцент кафедры Приборостроение, [nmi.kai@mail.ru](mailto:nmi.kai@mail.ru) — Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). Чистопольский филиал «Восток».*

УДК 621.317.39

## ФАЗОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЁМКОСТИ КАБЕЛЯ

Д.В. Миляев, Д.К. Нгуен, Е.К. Киселёв

С использованием макета проводятся экспериментальные исследования первичного преобразователя измерителя емкости кабеля в процессе изготовления. Конструкция представляет собой полую трубу, наполненную водой, и проходящий через неё кабель с жилой, но без изоляции. Приведён обзор фазометрического метода измерения ёмкости кабеля. Подробно рассмотрены детали данного метода. Сравнение с методом измерения ёмкости по току и перечислены преимущества перед этим методом

**Ключевые слова:** сдвиг фаз, кабель, жила, измерение, емкость, электрод, изготовление кабеля, эквивалентная схема.

### Введение

Передача информации – это неотъемлемая часть многих информационных и вычислительных систем. Для этого часто используются проводные связи. При передаче информации происходят неизбежные потери искажения полезного сигнала. К причинам этого относятся влияние внешних полей и параметры самой линии связи. В число таких параметров входит емкость кабеля. Знание емкости необходимо для оптимального выбора кабеля, а также для определения области применения данного вида кабеля.

Наиболее целесообразным и экономически выгодным является измерение емкости еще в процессе производства кабеля, на стадии нанесения изоляции. Это дает возможность изначально задавать необходимую емкость и контролировать постоянство ее значения по всей длине кабеля. Поскольку, из-

мерение емкости кабеля производится при отсутствии экранирующего слоя, в качестве второго электрода используется вода. Контроль емкости производится в охлаждающей ванне, куда помещается кабель после нанесения изоляционного слоя. Упрощенный вид конструкции преобразователя для измерения емкости кабеля в процессе его изготовления представлен на рисунок 1. Преобразователь помещается в охлаждающую ванну 1 и выполнен в виде полого цилиндра и состоит из двух электродов. Электрод питания - 2 разделен на два, установленных на концах преобразователя на расстоянии, определяющего измеряемую длину контролируемого кабеля, подключен к источнику переменного тока  $U_x$ . Рабочий электрод (РЭ)-3 проводит ток через измеряемую емкость. Для проведения измерения, корпус ванны и преобразователя, а также жила кабеля, заземляются.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2, 2014

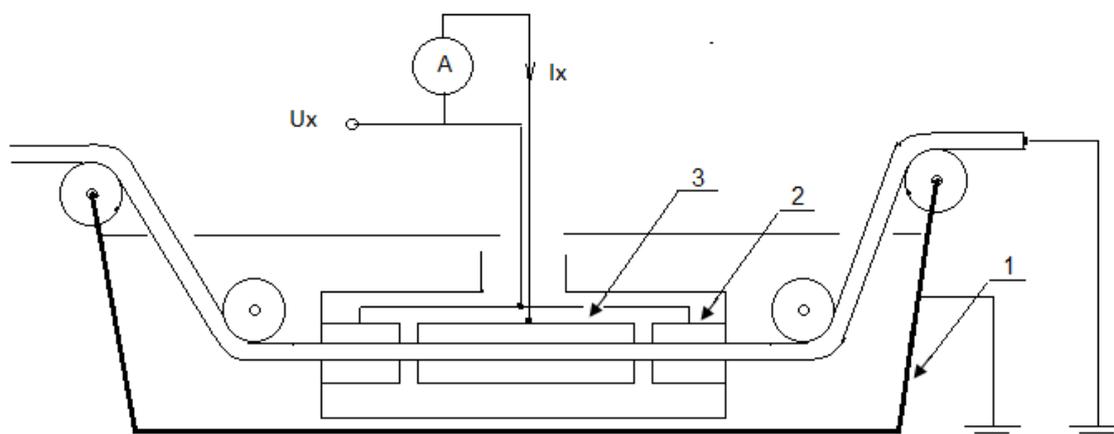


Рисунок 1 – Принципиальная схема емкостного преобразователя

Ток, протекающий от рабочего электрода, определяется свойствами изоляционного слоя кабеля, т.е. емкостью, на рабочем участке преобразователя. Этот ток и является информативным параметром преобразователя. Значение тока линейно зависит от емкости данного участка, равного длине РЭ, и соответствующей длине кабеля.

$$I_x = j \cdot U \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_x$$

A - измеритель тока,  $f$  – частота, [кГц],  $U_x$  – напряжение генератора, [В].

Результаты измерения емкости кабеля по методу преобразование емкости в ток, представлены в таблице 1.

Таблица 1.

f, кГц	Образец №1 $\frac{d}{D} = 2/4$		Образец №2 $\frac{d}{D} = 2/7$		Образец №3 $\frac{d}{D} = 3/7$	
	$I_x$ , мА	C, пФ	$I_x$ , мА	C, пФ	$I_x$ , мА	C, пФ
20	0,23	61	0,12	31,8	0,23	61
25	0,28	59,4	0,14	29,7	0,28	59,4
30	0,33	58,4	0,17	30,1	0,33	58,4
40	0,42	56	0,21	27,8	0,42	56
50	0,51	54	0,26	27,6	0,51	54
60	0,59	52,2	0,30	26,5	0,59	52,2
70	0,68	52	0,35	26,6	0,68	52
80	0,75	50,1	0,39	26,0	0,75	50,1
90	0,83	49	0,43	25,4	0,83	49
100	0,90	48	0,47	25	0,90	48

Измерения проводились в диапазоне частот 20 – 100 кГц при действующем значении входного напряжения 30 В. Можно сделать вывод, что при выполнении эксперимента необходимы большие частоты и большое напряжение генератора, но значение тока

через кабель мало. Поэтому погрешность измерения большая.

На кафедре ИИТ ТПУ, разрабатывается установка измеряющая ёмкость кабеля фазометрическим методом. Структурная схема измерения емкости кабеля фазометрическим методом представлена на рисунке 2.

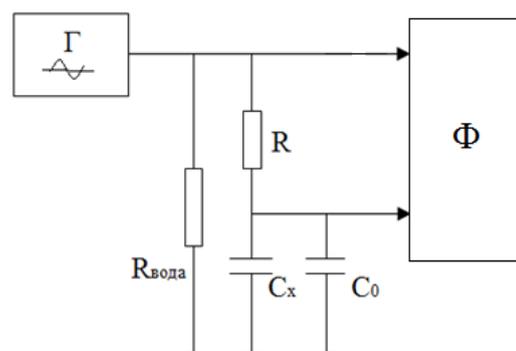


Рисунок 2 - Упрощенная схема измерения фазометрическим методом.

Г – генератор; Ф – фазометр.

К достоинствам можно отнести: а) независимость показаний от напряжения источника питания, б) незначительная зависимость от частоты, в) возможность измерения на низких частотах, г) малая потребляемая мощность и др.

Принцип работы фазометрического метода поясняется рисунком 3, представляющего эквивалентную схему замещения измерительного преобразователя, подключенного к источнику переменного тока через резистор определенного значения, определяющего начальный фазовый сдвиг. Измеряемая емкость кабеля приводит к дополнительному

## РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

смещению фазы в RC-цепь первого порядка (рисунок 3).

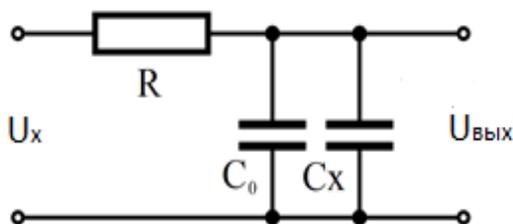


Рисунок 3 - Внесение измеряемой ёмкости

При отсутствии кабеля в воде, в преобразователе протекает дополнительный ток, определяемый сопротивлением  $R_{вода}$  - сопротивлению воды между корпусом и электродом питания,  $C_0$  - собственная емкость преобразователя, т.е. емкость датчика без кабеля,  $R$  - сопротивление которое включается между рабочим электродом (РЭ) и электродом питания.

При отсутствии кабеля, в цепи  $RC_0$ - первого порядка, фазовый сдвиг равен  $\varphi_0 = \arctg(\omega \cdot R \cdot C_0)$ . В присутствии кабеля, в преобразователе возникает емкость ка-

беля, значение которой, изменяет параметры RC-цепочки на  $(C_x + C_0)$ , тогда фазовый сдвиг тоже меняется и становится равным  $\varphi_x = \arctg(\omega \cdot R \cdot (C_0 + C_x))$ . Измерив разность фаз  $\Delta\varphi_x = \varphi_x - \varphi_0$  для двух случаев, можно определить емкость кабеля, используя для измерения этого значения фазометр. И оно будет прямо пропорционально значению емкости кабеля.

$$tg \varphi_0 = \omega \cdot R \cdot C_0 = a$$

$$tg \varphi_x = \omega \cdot R \cdot (C_0 + C_x) = a + b \cdot C_x$$

где  $a = \omega \cdot R \cdot C_0$ ,  $b = \omega \cdot R$

$$tg \Delta\varphi_x = \frac{tg \varphi_x - tg \varphi_0}{1 + tg \varphi_x \cdot tg \varphi_0} = \frac{b \cdot C_x}{1 + a(a + b \cdot C_x)}$$

$$\rightarrow C_x = \frac{tg \Delta\varphi_x \cdot (1 + a^2)}{b \cdot (1 - a \cdot tg \Delta\varphi_x)} = \frac{(1 + a^2)}{b \left( \frac{1}{tg \Delta\varphi_x} - a \right)}$$

Эксперимент проводился при:  $\omega = 10 \text{кГц}$ ,  $C_0 = 500 \text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 30^\circ \rightarrow R = 115.5 \text{кОм}$

$C_x = \Delta C (\text{пФ})$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\varphi_x (^\circ)$	30,49	30,98	31,47	31,95	32,42	32,89	33,35	33,81	34,27	34,72
$\Delta\varphi (^\circ)$	0,49	0,98	1,47	1,95	2,42	2,89	3,35	3,81	4,27	4,72
$S = \frac{\Delta\varphi_{i+1} - \Delta\varphi_i}{\Delta C_x}$	0.049	0.049	0.049	0.048	0.047	0.047	0.046	0.046	0.046	0.045
Нелинейность, $\gamma = \frac{S_i - S_{ср}}{S_{ср}}$	3.8	3.8	3.8	1.7	-0.42	-0.42	-2.5	-2.5	-2.5	-4.7

Эксперимент проводился при:  $\omega = 10 \text{кГц}$ ,  $C_0 = 500 \text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 45^\circ \rightarrow R = 200 \text{кОм}$

$C_x (\text{пФ})$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\varphi_x (^\circ)$	45,57	46,12	46,67	47,20	47,73	48,24	48,74	49,24	49,72	50,19
$\Delta\varphi (^\circ)$	0,57	1,12	1,67	2,2	2,73	3,24	3,74	4,24	4,72	5,19
$S = \frac{\Delta\varphi_{i+1} - \Delta\varphi_i}{\Delta C_x}$	0.057	0.055	0.055	0.053	0.053	0.051	0.05	0.05	0.048	0.047
Нелинейность, $\gamma = \frac{S_i - S_{ср}}{S_{ср}}$	9.8	6	6	2.1	2.1	-1.7	-3.7	-3.7	-7.5	-9.4

ФАЗОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЁМКОСТИ КАБЕЛЯ

Эксперимент проводился при:  $\omega = 10\text{кГц}$ ,  $C_0 = 500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 60^\circ \rightarrow R = 346.4\text{кОм}$

$C_x = \Delta C (\text{пФ})$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\varphi_x (^\circ)$	60,49	60,96	61,42	61,87	62,31	62,73	63,14	63,54	63,93	64,31
$\Delta\varphi (^\circ)$	0,49	0,96	1,42	1,87	2,31	2,73	3,14	3,54	3,93	4,31
$S = \Delta\varphi_{i+1} - \Delta\varphi_i / \Delta C_x$	0.049	0.047	0.046	0.045	0.044	0.042	0.041	0.04	0.039	0.038
Нелинейность, $\gamma = S_i - S_{ср} / S_{ср}$	13.7	9	6.7	4.4	2.1	-2.6	-4.9	-7.2	-9.5	-11.8

Эксперимент проводился при:  $\omega = 30\text{кГц}$ ,  $C_0 = 500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 30^\circ \rightarrow R = 38.5\text{кОм}$

$C_x = \Delta C (\text{пФ})$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\varphi_x (^\circ)$	30,49	30,98	31,47	31,95	32,42	32,89	33,35	33,81	34,27	34,72
$\Delta\varphi (^\circ)$	0,49	0,98	1,47	1,95	2,42	2,89	3,35	3,81	4,27	4,72

Эксперимент проводился при:  $\omega = 30\text{кГц}$ ,  $C_0 = 500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 45^\circ \rightarrow R = 66.7\text{кОм}$

$C_x = \Delta C (\text{пФ})$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\varphi_x (^\circ)$	45,57	46,12	46,67	47,20	47,73	48,24	48,74	49,24	49,72	50,19
$\Delta\varphi (^\circ)$	0,57	1,12	1,67	2,2	2,73	3,24	3,74	4,24	4,72	5,19

Эксперимент проводился при:  $\omega = 30\text{кГц}$ ,  $C_0 = 500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 60^\circ \rightarrow R = 115.5\text{кОм}$

$C_x = \Delta C (\text{пФ})$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\varphi_x (^\circ)$	60,49	60,96	61,42	61,87	62,31	62,73	63,14	63,54	63,93	64,31
$\Delta\varphi (^\circ)$	0,49	0,96	1,42	1,87	2,31	2,73	3,14	3,54	3,93	4,31

Эксперимент проводился при:  $\omega = 60\text{кГц}$ ,  $C_0 = 500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 30^\circ \rightarrow R = 19.3\text{кОм}$

$C_x = \Delta C (\text{пФ})$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\varphi_x (^\circ)$	30,49	30,98	31,47	31,95	32,42	32,89	33,35	33,81	34,27	34,72
$\Delta\varphi (^\circ)$	0,49	0,98	1,47	1,95	2,42	2,89	3,35	3,81	4,27	4,72

Эксперимент проводился при:  $\omega = 60\text{кГц}$ ,  $C_0 = 500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 45^\circ \rightarrow R = 33.3\text{кОм}$

$C_x = \Delta C (\text{пФ})$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\varphi_x (^\circ)$	45,57	46,12	46,67	47,20	47,73	48,24	48,74	49,24	49,72	50,19
$\Delta\varphi (^\circ)$	0,57	1,12	1,67	2,2	2,73	3,24	3,74	4,24	4,72	5,19

Эксперимент проводился при:  $\omega = 60\text{кГц}$ ,  $C_0 = 500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 60^\circ \rightarrow R = 57.8\text{кОм}$

$C_x = \Delta C (\text{пФ})$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\varphi_x (^\circ)$	60,49	60,96	61,42	61,87	62,31	62,73	63,14	63,54	63,93	64,31
$\Delta\varphi (^\circ)$	0,49	0,96	1,42	1,87	2,31	2,73	3,14	3,54	3,93	4,31

## РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

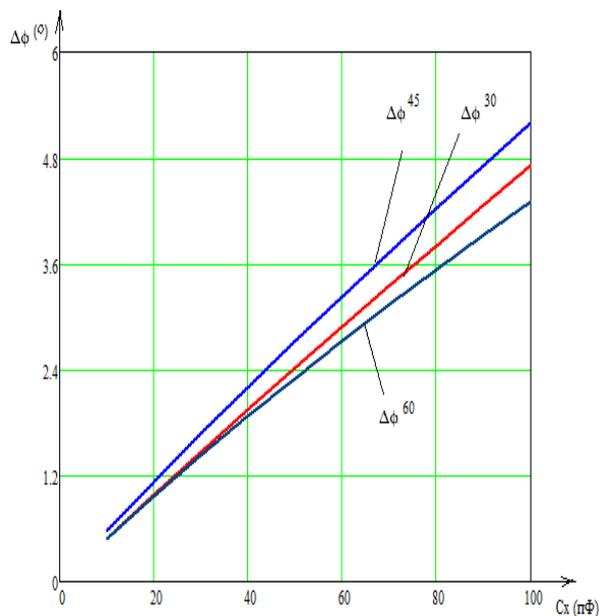


Рисунок 4 - Зависимость разности фаз от измеряемой емкости

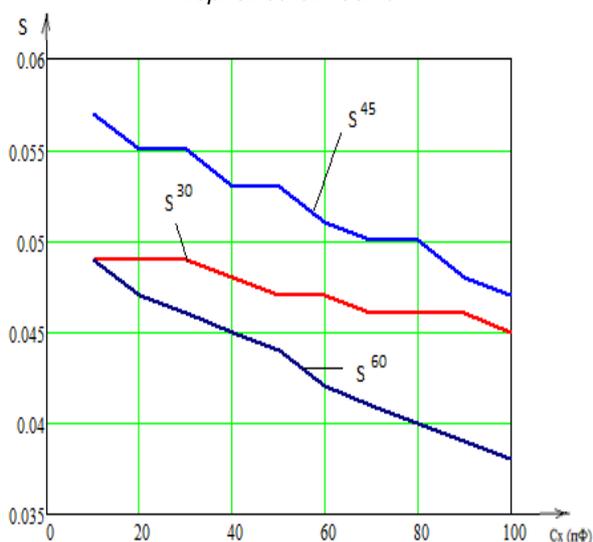


Рисунок 5 - Чувствительность разности фаз от измеряемой емкости

Из графиков и таблиц результатов измерения, можно сделать вывод о том, что разность фаз и изменение емкости  $C_x \approx \Delta C$  почти прямо пропорциональны при маленьких отношениях  $C_x/C_0$ . Результаты измерения не зависят от частоты, эксперимент проводился в частоте среза первого порядка ( $\varphi = 45^\circ$  для получения максимальной чувствительности измерения. Можно так же использовать RC-цепи 2-ого или 3-ого порядка при измерения сдвига фаз. Достоинство этого метода яв-

ляется маленькие погрешности, недостатки - сложная реализация

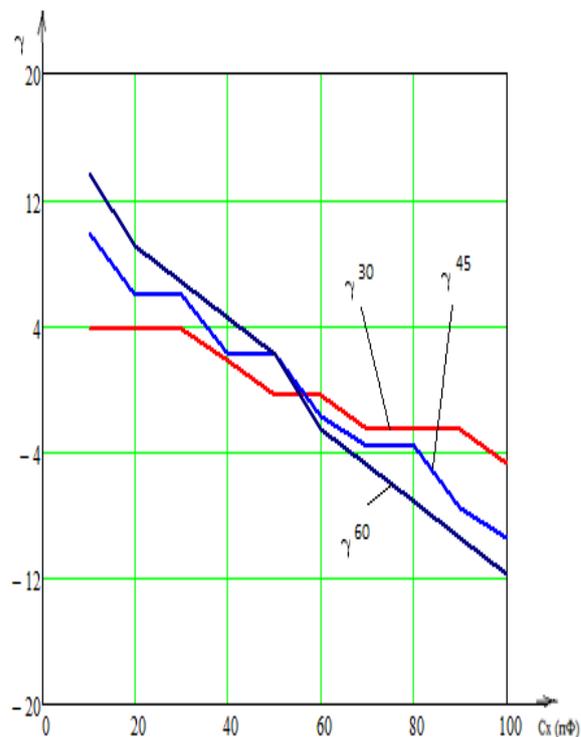


Рисунок 6 - Нелинейность разности фаз от измеряемой емкости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миляев, Д.В. Исследование первичного преобразователя измерителя емкости кабеля [Текст]/ Г.В. Вавилова, Е.И. Шкляр // Ползуновский вестник. – 2012. – №2/1. – С. 168 – 170.
2. Атамалян, Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. [Текст]: учебное пособие / Э.Г. Атамалян. – М.: Высшая школа, 1989. – 384 с.
3. Белорусов, И.И. Электрические кабели и провода [Текст]: учебное пособие/ И.И. Белорусов. – М.: Связьиздат, 1971. – 456 с.
4. Полищука, Е.С. Электрические измерения электрических величин [Текст] / Е.С. Полищука. – М.: Высшая школа, 1984. – 245 с

Доцент **Д.В. Миляев**, к.т.н., [mdv@tpu.ru](mailto:mdv@tpu.ru), магистрант **Д.К. Нгуен**, студент – Томский политехнический университет; **Е.К. Киселёв** - Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра информационно-измерительной техники, 8 (382-2) 41-89-11.