

## ФАЗОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЁМКОСТИ КАБЕЛЯ (PHASE METHOD MEASUREMENT CAPACITANCE CABLES)

Д.В. Миляев, Д.К. Нгуен, Е.К. Киселёв  
D.V.Myliaev, D.Q.Nguyen, E.K.Cixelev

Научный руководитель: Д.В.Миляев, к.т.н., доцент  
Research supervisor: D.V.Myliaev, PhD., associate professor

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: kqh1215@gmail.com

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. Сравнение с методом измерения ёмкости по току и перечислены преимущества перед этим методом.

(Using experimental studies of the primary device capacitance meter cable in the manufacturing process. Construction of this sensor is a hollow tube filled with water, and the cable with a wire but without insulation. Research shows the method of measuring the capacitance of the cable. Comparing with the method for measuring current and lists the advantages this method.)

### **Ключевые слова:**

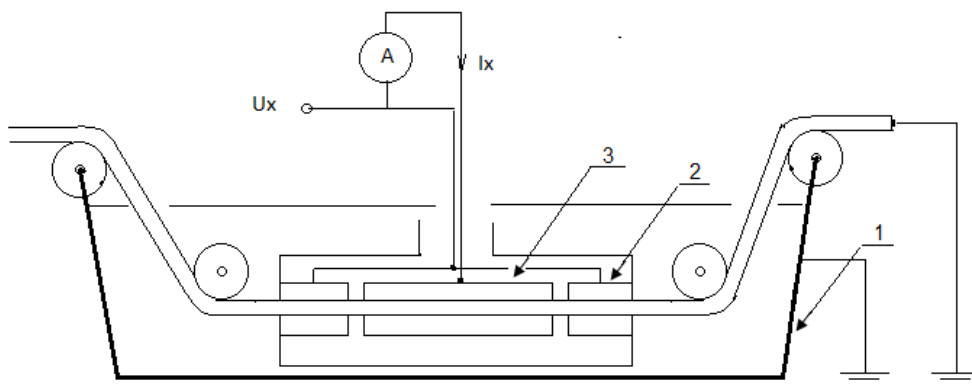
Сдвиг фаз, кабель, жила, измерение, ёмкость, электрод, изготовление кабеля, эквивалентная схема.

(Phase displacement, cable, wire, measurement, capacity, electrode, cable manufacturing, equivalent circuit.)

### **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 ёмкость кабеля. Знание ёмкости необходимо для оптимального выбора кабеля, а также для определения области применения данного вида кабеля.

Наиболее целесообразным и экономически выгодным является измерение ёмкости еще в процессе производства кабеля, на стадии нанесения изоляции. Это дает возможность изначально задавать необходимую ёмкость и контролировать постоянство ее значения по всей длине кабеля. Поскольку, измерение ёмкости кабеля производится при отсутствии экранирующего слоя, в качестве второго электрода используется вода. Контроль ёмкости производится в охлаждающей ванне, куда помещается кабель после нанесения изоляционного слоя. Упрощенный вид конструкции преобразователя для измерения ёмкости кабеля в процессе его изготовления представлен на рис. 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 ёмкость. Для проведения измерения, корпус ванны и преобразователя, а также жила кабеля, заземляются.



**Рис. 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<sub>x</sub> – напряжение генератора, [В].

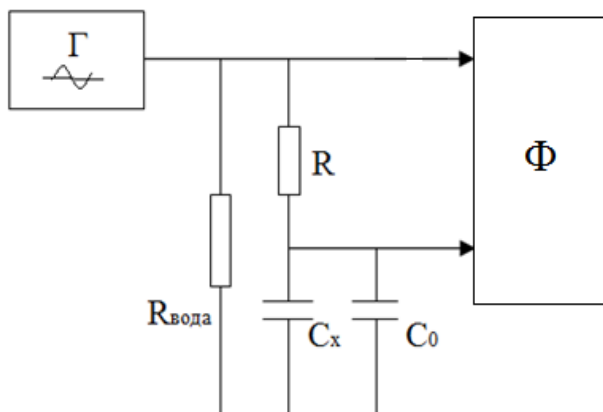
Результаты измерения емкости кабеля по методу преобразование емкости в ток, представлены в таблице 1.

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.

**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 <sub>x</sub> , мА	C, пФ	I <sub>x</sub> , мА	C, пФ	I <sub>x</sub> , мА	C, пФ
20	0,23	61	0,12	31,8	0,14	37,1
25	0,28	59,4	0,14	29,7	0,18	38,1
30	0,33	58,4	0,17	30,1	0,21	37,1
40	0,42	56	0,21	27,8	0,27	36
50	0,51	54	0,26	27,6	0,32	34,0
60	0,59	52,2	0,30	26,5	0,38	33,6
70	0,68	52	0,35	26,6	0,43	32,6
80	0,75	50,1	0,39	26,0	0,48	32
90	0,83	49	0,43	25,4	0,54	32,0
100	0,90	48	0,47	25	0,59	31,5

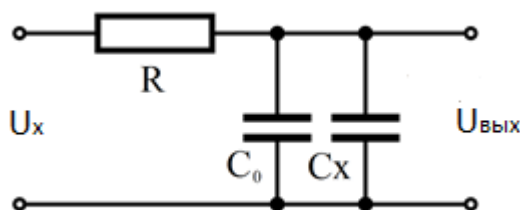
На кафедре ИИТ ТПУ, разрабатывается установка измеряющая ёмкость кабеля фазометрическим методом. Структурная схема измерения емкости кабеля фазометрическим методом представлена на рисунке 2.



**Рис. 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 рис. 3, представляющего эквивалентную схему замещения измерительного Преобразователь подключен к источнику переменного тока через резистор определенного значения, определяющего начальный фазовый сдвиг. Измеряемая емкость кабеля приводит к дополнительному смещению фазы в RC-цепь первого порядка (рисунок 3).



**Рис. 3.** Внесение измеряемой ёмкости

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

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

$$\begin{aligned}
 \operatorname{tg} \varphi_0 &= \omega \cdot R \cdot C_0 = a \\
 \operatorname{tg} \varphi_x &= \omega \cdot R \cdot (C_0 + C_x) = a + b \cdot C_x \\
 \text{Где } a &= \omega \cdot R \cdot C_0, \quad b = \omega \cdot R \\
 \operatorname{tg} \Delta\varphi_x &= \frac{\operatorname{tg} \varphi_x - \operatorname{tg} \varphi_0}{1 + \operatorname{tg} \varphi_x \cdot \operatorname{tg} \varphi_0} = \frac{b \cdot C_x}{1 + a(a + b \cdot C_x)} \\
 \rightarrow C_x &= \frac{\operatorname{tg} \Delta\varphi_x \cdot (1 + a^2)}{b \cdot (1 - a \cdot \operatorname{tg} \Delta\varphi_x)} = \frac{(1 + a^2)}{b \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \Delta\varphi_x} - a \right)}
 \end{aligned}$$

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

**Таблица 2**

$C_x = \Delta C(\text{пФ})$	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
$S = \Delta\varphi_{i+1} - \Delta\varphi_i / \Delta C_x$	0,049	0,049	0,049	0,048	0,047	0,047	0,046	0,046	0,046	0,045
Нелинейность, $\gamma = \frac{S_i - S_{cp}}{S_{cp}}$	3.8	3.8	3.8	1.7	-0.42	-0.42	-2.5	-2.5	-2.5	-4.7

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

**Таблица 3**

$C_x(\text{пФ})$	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
$S = \Delta\varphi_{i+1} - \Delta\varphi_i / \Delta C$	0,057	0,055	0,055	0,053	0,053	0,051	0,05	0,05	0,048	0,047
Нелинейность, $\gamma = \frac{S_i - S_{cp}}{S_{cp}}$	9.8	6	6	2.1	2.1	-1.7	-3.7	-3.7	-7.5	-9.4

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

**Таблица 4**

$C_x = \Delta C(\text{пФ})$	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, $\gamma = \frac{S_i - S_{cp}}{S_{cp}}$	13.7	9	6.7	4.4	2.1	-2.6	-4.9	-7.2	-9.5	-11.8

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

**Таблица 5**

$C_x = \Delta C(\text{пФ})$	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:  $\omega = 30\text{кГц}$ ,  $C_0=500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 45^{\circ} \rightarrow R = 66.7\text{кОм}$

**Таблица 6**

$C_x = \Delta C(\text{пФ})$	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:  $\omega = 30\text{кГц}$ ,  $C_0=500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 60^{\circ} \rightarrow R = 115.5\text{кОм}$

**Таблица 7**

$C_x = \Delta C(\text{пФ})$	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:  $\omega = 60\text{кГц}$ ,  $C_0=500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 30^{\circ} \rightarrow R = 19.3\text{кОм}$

**Таблица 8**

$C_x = \Delta C(\text{пФ})$	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:  $\omega = 60\text{кГц}$ ,  $C_0=500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 45^{\circ} \rightarrow R = 33.3\text{кОм}$

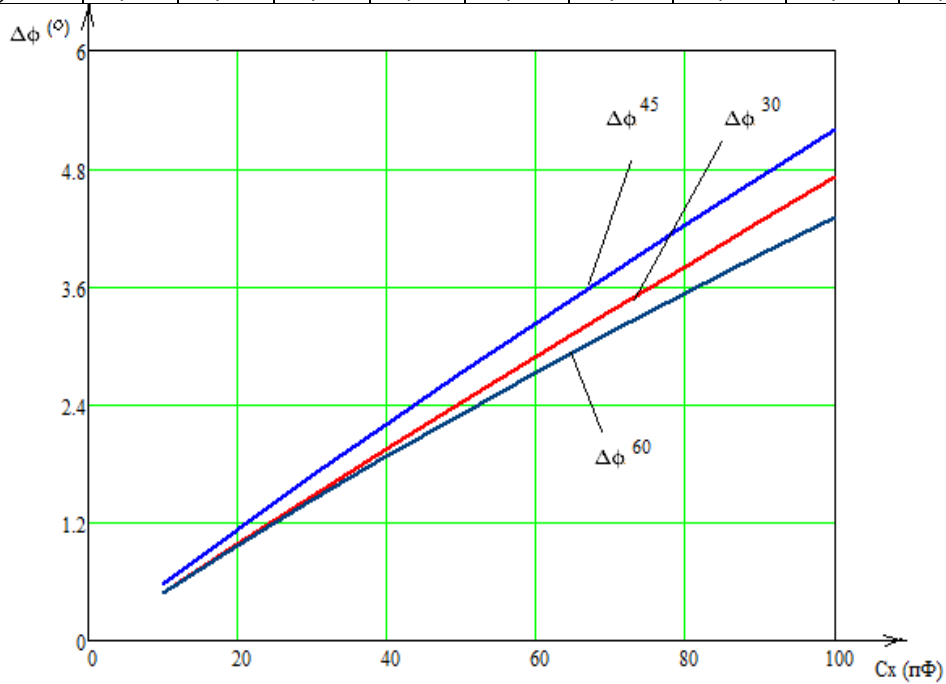
**Таблица 9**

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

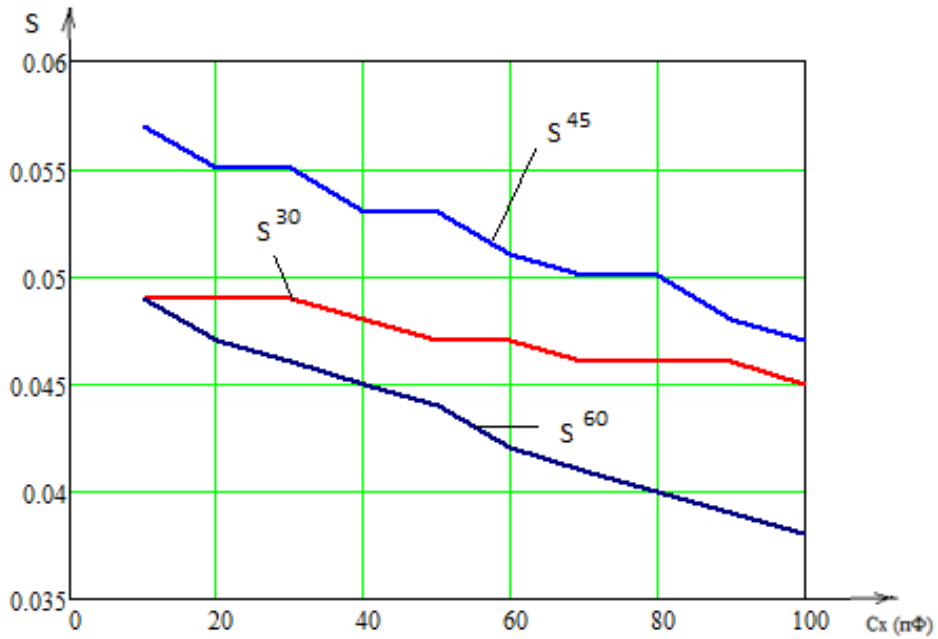
Эксперимент проводился при:  $\omega = 60$ кГц,  $C_0=500$ пФ,  $\varphi_0 = 60^\circ \rightarrow R = 57,8$ кОм

**Таблица 10**

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



**Рис. 4.** Зависимость разности фаз от измеряемой емкости



**Рис. 5.** Чувствительность разности фаз от измеряемой емкости

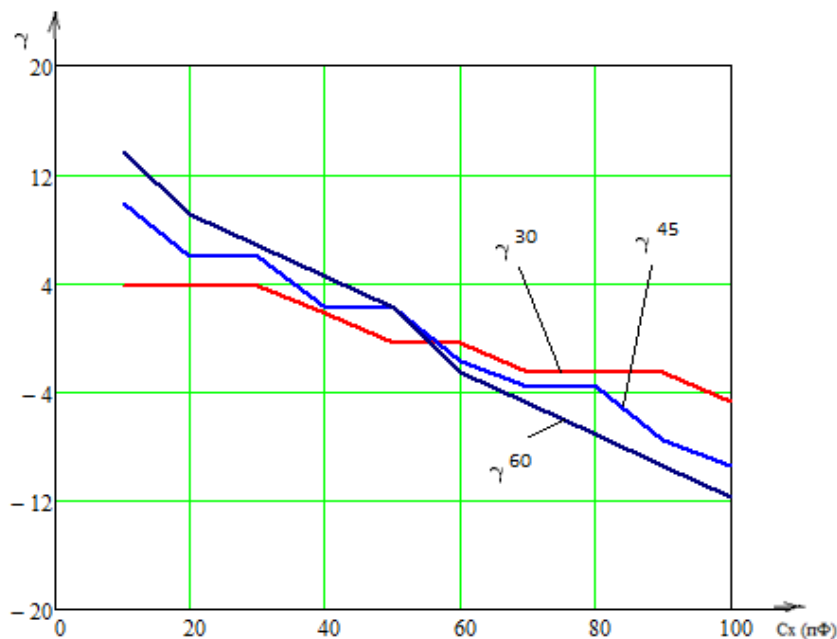


Рис. 6. Нелинейность разности фаз от измеряемой емкости

Из графиков и таблиц результатов измерения, можно сделать вывод о том, что разность фаз  $\Delta\varphi$  и изменение емкости  $C_x = \Delta C$  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 сдвиг фазы. Достоинство этого метода является маленькие погрешности, недостатки - сложная реализация.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миляев Д. В. , Вавилова Г. В. , Шкляр Е. И. Исследование первичного преобразователя измерителя емкости кабеля // Ползуновский вестник. – 2012 – №. 2/1 – С. 168–170.
2. Атамаян Э. Г. Приборы и методы измерения электрических величин: учебное пособие для студ. Вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 384 с.

#### Сведения об авторах:

**Миляев Д.В.:** г. Томск, к.т.н., доцент кафедры Информационно-измерительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Нгуен Д.К.:** г. Томск, магистрант 2-ого года обучения кафедры Информационно-измерительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Киселёв Е.К.:** г. Томск, бакалавр кафедры Информационно-измерительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета.