

## РАЗДЕЛ 2. МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.3.08

### ИЗМЕРИТЕЛЬ ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ОДНОЖИЛЬНОГО ПРОВОДА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

А.Е. Гольдштейн, Г.В. Вавилова

Описана техническая реализация электроемкостного метода измерения погонной емкости электрического одножильного провода непосредственно в производственной линии. Предложена конструкция электроемкостного измерительного преобразователя. Разработана структурная схема измерителя погонной емкости на основе предложенного метода. Представлена лицевая панель измерителя погонной емкости и описан принцип его работы. Осуществлен анализ влияния изменения электропроводности воды на результаты измерения погонной емкости. Предложен способ отстройки от влияния этого изменения на результаты контроля.

Ключевые слова: одножильный провод, погонная емкость, электроемкостный измерительный преобразователь, электропроводность воды.

#### ВВЕДЕНИЕ

Потребность обеспечения качества передачи информации посредством кабельной линии приводит к необходимости обеспечивать постоянство погонной емкости провода по всей его длине. Наиболее эффективный метод контроля емкости описан в работе [1]. Контроль осуществляется непосредственно в производственной линии изготовления провода на стадии нанесения изоляции на токопроводящую жилу. Данный способ заключается в создании переменного поля между заземленной жилой провода и поверхностью изоляции с помощью электроемкостного преобразователя, погруженного в воду охлаждающей ванны экструзионной линии. При известной амплитуде и частоте приложенного

напряжения о значении емкости одножильного провода можно судить по значению измеренного тока, протекающего через измерительный электрод электроемкостного измерительного преобразователя (ЭЕИП). В результате контроля измеряется емкость цилиндрического конденсатора, одной обкладкой которого является жила провода, а другой – вода, заполняющая пространство между изоляцией провода и электроемкостным измерительным преобразователем, внутри которого движется контролируемый провод в процессе производства.

#### Конструкция ЭЕИП

Для реализации описанного способа используется электроемкостный измерительный преобразователь, схематично представ-

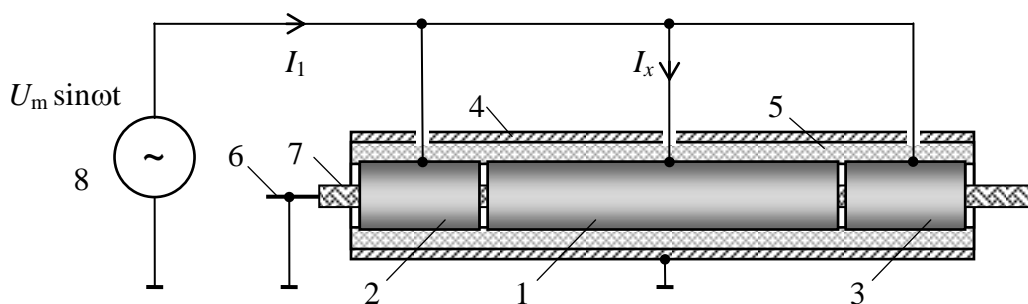


Рисунок 1 – Конструкция электроемкостного измерительного преобразователя:

1 – измерительный электрод; 2, 3 – дополнительные электроды; 4 – корпус преобразователя; 5 – изолятор; 6 – токопроводящая жила; 7 – изоляция провода; 8 – генератор

## ИЗМЕРИТЕЛЬ ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ОДНОЖИЛЬНОГО ПРОВОДА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

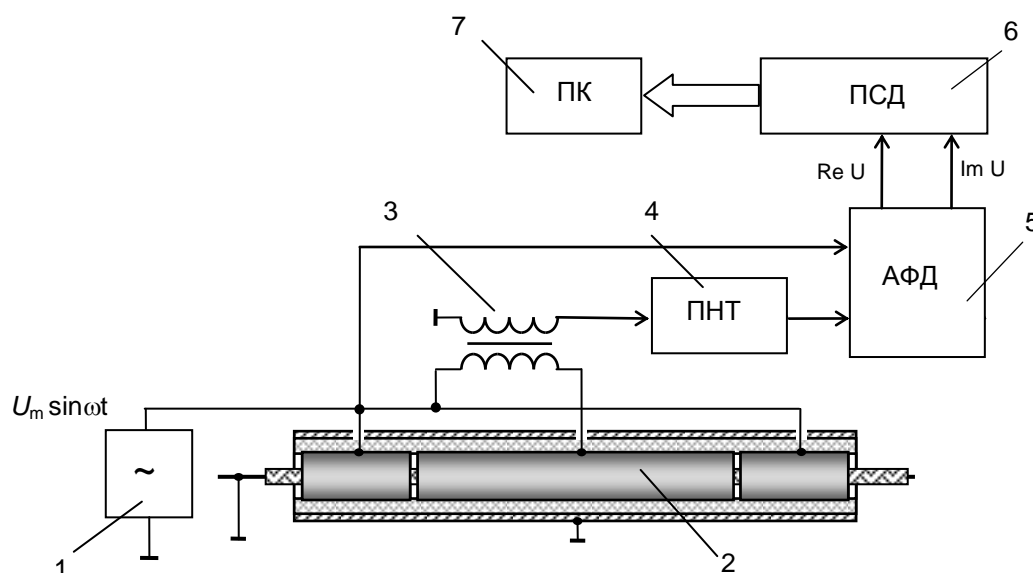
ленный на рисунке 1. ЭИИП состоит из измерительного 1 и двух дополнительных 2 и 3 трубчатых электродов, которые располагаются внутри металлического корпуса 4 и изолированные от него слоем изоляционного материала 5. Контролируемый провод, состоящий из токопроводящей жилы 6 и изоляционной оболочки 7, непрерывно движется внутри электродов ЭИИП, погруженного в воду ванны экструзионной линии, служащей для охлаждения нагретого во время нанесения изоляции провода. Электропроводящая жила провода и корпус преобразователя соединены с общей точкой (землей). Трубчатые электроды соединены с генератором 8 переменного напряжения.

Оптимальные конструктивные параметры основных элементов преобразователя были рассчитаны с использованием компьютерного моделирования взаимодействия

электрического поля преобразователя с электрическим проводом в среде COMSOL Multiphysics [2]: длина измерительного электрода – 200 мм; длина дополнительных электродов – 40 мм; внутренний диаметр электродов – 20 мм; внутренний диаметр корпуса – 40 мм; расстояние между измерительным и дополнительными электродами – 1,5 мм.

### Структурная схема измерителя емкости

Измеритель емкости, структурная схема которого представлена на рисунке 2, состоит из следующих блоков: генератора 1 гармонического напряжения  $U_m \sin \omega t$  с известной амплитудой  $U_m$  и угловой частотой  $\omega$ , ЭИИП 2, трансформатора тока 3, преобразователя ток-напряжение 4, амплитудно-фазового детектора (АФД) 5, платы сбора данных (ПСД) 6 и персонального компьютера (ПК) 7.



**Рисунок 2 – Структурная схема измерителя емкости:**  
1 – генератор; 2 – ЭИИП; 3 – трансформатор тока; 4 – преобразователь ток-напряжение; 5 – амплитудно-фазовый детектор; 6 – плата сбора данных; 7 – персональный компьютер; 8 – блок питания

На выходе генератора 1 формируется синусоидальное напряжение частотой 50 кГц и амплитудой 3,5 В. Благодаря оптимально подобранным параметрам [2] элементов ЭИИП внутри измерительного преобразователя 2 создается электрическое поле с высокой однородностью в продольном направлении. Измерение силы тока в цепи измерительного электрода осуществляется с использованием трансформатора тока 3.

Измеряемый ток  $I_x$  ЭИИП преобразовывается в напряжение, подаваемое на вход

амплитудно-фазового детектора 5. Опорный вход АФД соединен с выходом генератора 1. В АФД выделяются мнимая и действительная составляющие входного напряжения, пропорциональные амплитудным значениям комплексным составляющим тока измерительной цепи.

Выходные сигналы АФД подаются на плату сбора данных 6, в качестве которой используется модуль USB3000 – универсальный скоростной восьмиканальный АЦП. Подключение модуля USB3000 к компьютеру ПК

осуществляется через USB-порт компьютера. Внешний вид макета измерителя погонной емкости представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Внешний вид измерителя погонной емкости

#### Отстройка от влияния электропроводности воды

Сила тока  $I_x$  в электрической цепи измерительного электрода связана линейной зависимостью с погонной емкостью  $C_n$  участка провода, взаимодействующего с электрическим полем измерительного электрода. Соответственно погонная емкость  $C_n$  может быть определена по результатам измерения амплитуды силы тока  $I_x$  по формуле:

$$C_n = C_0 + k \cdot I_x, \quad (1)$$

где  $C_0$  и  $k$  – постоянная составляющая и коэффициент пропорциональности, значения которых зависят от амплитуды и частоты напряжения генератора 1 (рисунок 1), а также конструктивных параметров преобразователя 2 и определяются экспериментально при первичной калибровке измерителя.

Мешающим фактором при измерении погонной емкости одножильного провода является существенная зависимость величин  $C_0$  и  $k$  от электропроводности воды охлаждающей ванны, в которую погружен измерительный преобразователь [1]. Изменение электропроводности воды в процессе контроля может быть обусловлено как изменением концентрации растворенных в ней солей, кислот и оснований, так и температуры воды. Без учета текущей электропроводности воды погрешность результата измерения погонной емкости может достигать 20 % и более в зависимости от диапазона изменения электропроводности воды.

В реализуемом измерителе погонной емкости одножильного провода корректировка функциональной зависимости (1) заключа-

ется в замене коэффициентов  $C_0$  и  $k$ , соответствующих фиксированному значению электропроводности воды (например при использовании дистиллированной воды с соленостью  $\lambda \rightarrow 0$ ) на их скорректированные значения  $C_{01}(t)$  и  $k_1(t)$ , которые являются функциями величины  $t = \text{Re } \dot{I} / \text{Im } \dot{I}$ , отражающей изменение фазового угла  $\varphi$  между вектором тока  $\dot{I}_x$  и мнимой осью комплексной плоскости.

Для проверки эффективности предложенного способа отстройки был проведен численный эксперимент с использованием массива данных, полученных для одножильных проводов со значениями погонной емкости в диапазоне (160...460) пФ/м при изменении весовой концентрации соли в диапазоне (0...4) г/л. Действительные значения погонной емкости одножильного провода определялись в соответствии с ГОСТ 27893-88 [3] при использовании пресной воды комнатной температуры равной  $+(22 \pm 1)^\circ\text{C}$  и близкой к нулю соленостью  $\lambda \rightarrow 0$ . Результаты этого эксперимента приведены на рисунке 4.

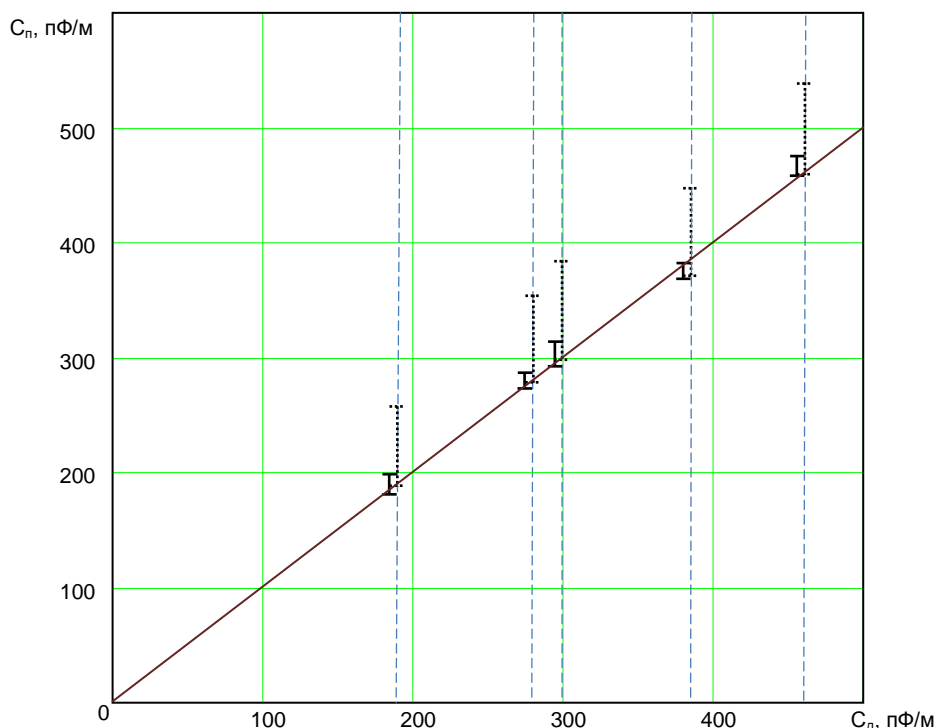
Интервалы изменений измеренных значений погонной емкости  $C_n$  при изменении концентрации соли в воде для различных образцов одножильных проводов показаны на графике пунктирными линиями, для случая использования отстройки – сплошными.

Анализ результатов показывает, что без отстройки от влияния изменения электропроводности отличие измеренных значений погонной емкости от действительных может достигать 20 %. При использовании предложенного способа отстройки относительная погрешность измерения погонной емкости может быть уменьшена в несколько раз. В этом случае измеренные значения отличаются от действительных значений не более чем на 2,5 %. При ограничении диапазона измерения влияющих параметров указанная погрешность может бытькратно уменьшена.

#### Программное обеспечение измерителя емкости

Отстройка от влияния мешающих факторов производится автоматически. Вычислительное преобразование измерительных сигналов измерительной информации в соответствии с функцией преобразования (1) производится в персональном компьютере с использованием программного обеспечения, разработанного на основе пакета программ LabView 8.5 фирмы National Instruments.

## ИЗМЕРИТЕЛЬ ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ОДНОЖИЛЬНОГО ПРОВОДА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ



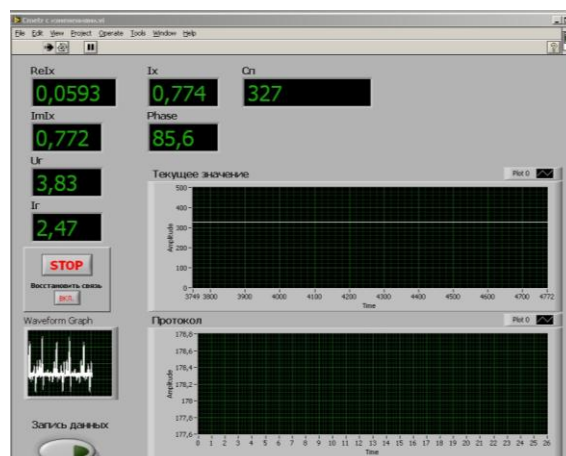
*Рисунок 4 – Разброс значений погонной емкости без корректировки (пунктирные линии) и с корректировкой (сплошные линии)*

Программа «Сметр.ви» является основной управляющей программой прибора. В ней производится измерение сигнала ЭЕИП и его визуализация. Кроме того, в программе предусмотрена запись измеренных значений погонной емкости в файл протокола.

В программе предусмотрена начальная калибровка коэффициентов преобразования. При открытии программы появляется лицевая панель виртуального прибора, рисунок 5, отображающая следующую информацию:

- комплексные составляющие измеренного тока « $Re \dot{I}_x$ » и « $Im \dot{I}_x$ » на цифровых индикаторах;
- Амплитудное значение измеренного тока « $I_x$ »;
- выходные напряжение и ток генератора « $U_r$ » и « $I_r$ »;
- временная диаграмма значения погонной емкости кабеля «Текущее значение»;
- значения погонной емкости одножильного провода на цифровых индикаторах « $C_n$ »;
- кнопка «STOP» для остановки измерений;

- Кнопка «Запись данных» для запуска и остановки записи файла протокола контроля;
- Временная диаграмма, записанных в протокол значений погонной емкости «Протокол измерений» за заданный интервал времени.



*Рисунок 5 – Лицевая панель измерителя погонной емкости*

#### **Технические характеристики измерителя емкости**

Измеритель погонной емкости одножильного провода предназначен для измерения значений погонной емкости одножильного провода и создания протокола результатов измерения.

Основные технические характеристики прибора:

- Объект контроля: одножильный изолированный провод;
- Диапазон измеряемой погонной емкости: 50 ÷ 750 пФ/м;
- Наружный диаметр изоляции провода, не более 10 мм;
- Допустимая погрешность измерения погонной емкости 2,5 % от номинального значения в диапазоне измерения электропроводности воды эквивалентной изменению концентрации NaCl в диапазоне (0...4) г/л.

#### **Выводы**

Таким образом, разработан измеритель погонной емкости одножильного провода на основе электроемкостного измерительного преобразователя, погруженного в воду охлаждающей ванны экструзионной линии.

Разработана конструкция электроемкостного измерительного преобразователя, структурная схема измерителя погонной емкости, алгоритм преобразования сигналов измерительной информации.

Предложен способ отстройки от влияния изменения удельной электропроводности

воды на результаты контроля, основанный на косвенном измерении удельной электропроводности и введении соответствующей поправки в функцию преобразования. Показано, что предложенный способ отстройки позволяет уменьшить погрешность измерения погонной емкости провода в несколько раз.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гольдштейн, А. Е. Отстройка от влияния изменения электропроводности воды на результаты технологического контроля погонной емкости электрического кабеля [Текст] / А. Е. Гольдштейн, Г. В. Вавилова // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 146–150.

2. Гольдштейн, А. Е. Оптимизация конструктивных параметров электроемкостного преобразователя измерителя погонной емкости электрического кабеля [Текст] / А. Е. Гольдштейн, Г. В. Вавилова // Ползуновский вестник. – 2014 – №. 2. – С. 71–76.

3. ГОСТ 27893–88 (СТ СЭВ 1101–87). Кабели связи. Методы испытаний. [Текст] – Введ. 1990-01.01. - с измен. 2015-01-16. - Режим доступа: URL: <http://meganorm.ru/Index/11/11797.htm> /, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 01.04.2015).

*Гольдштейн А.Е. – д.т.н., профессор каф. Информационно-измерительной техники Томский политехнический университет, тел. (3822) 41-89-11, algo1@tpu.ru.*

*Вавилова Г.В. – ст. преподаватель каф. Информационно-измерительной техники Томский политехнический университет, wgw@tpu.ru.*