

УДК 620.179.14

**ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ИЗОЛЯЦИОННОЙ ОБОЛОЧКИ КАБЕЛЯ  
НАКЛАДНЫМ ВТП  
(USING OVERHEAD EDDY CURRENT TRANSDUCER TO MEASURE THE THICKNESS  
OF ELECTRIC CABLE'S INSULATOR)**

Ван Юй  
Научный руководитель: А.Е. Гольдштейн  
Wang Yu  
Scientific supervisor: A.E. Goldstein

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
E-mail: wangyu1211@mail.ru

В статье рассмотрены физические основы вихретокового метода и принцип вихретокового толщиномера. В качестве наиболее эффективного для решения задачи измерения толщины изоляционной оболочки кабеля в заданных условиях контроля выбран накладный вихретоковый преобразователь. Экспериментально определены зависимости выходного сигнала от изменения зазора между корпусом преобразователя и поверхностью жилы кабеля, формы поперечного сечения. Проанализированы причины влияния формы поперечного сечения на результаты измерения.

(This paper mainly introduces the theoretical basis of eddy current sensor measurement and the principle of eddy current thickness gauge. As the most efficient method for solving the problem of measuring the thickness of electric cable's insulator under the specified conditions is using overhead eddy current transducer. Experimentally determined relationship between the load voltage and change of the gap between the body of the transducer and the surface shape of cable. At last analyze the reasons for the effect of the surface shape.)

**Ключевые слова:**

Накладный вихретоковый преобразователь, измерение толщины изоляционной оболочки, система вихретокового контроля, вихретоковый толщиномер, секторная жила кабеля.

(Overhead eddy current transducer, the measurement of the thickness of electric cable's insulator, eddy current measurement system, eddy-current thickness gauge, the cable sector.)

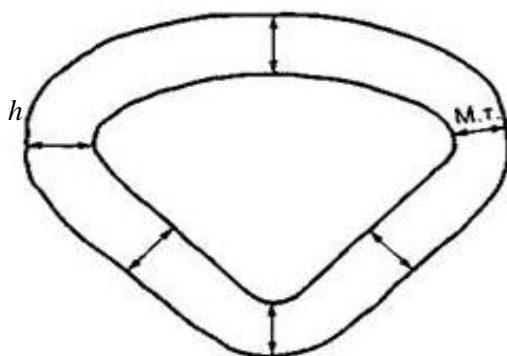
**Введение**

Кабели и провода это важнейшие изделия. Кабельную промышленность отличают высокая технологичность, энергоёмкость, ресурсоёмкость и высокая степень автоматизации производства. Технический уровень кабельных изделий отражает уровень экономического и технического развития промышленности страны в целом.

Качество кабельных изделий характеризуется различными геометрическими и электрическими параметрами, как правило, связанными друг с другом. Толщина изоляционной оболочки является важным параметром. По отношению к высоковольтным кабелям, она непосредственно касается электробезопасности, с другой стороны, с точки зрения экономии расхода дорогостоящего сырья и материалов, измерение толщины изоляционной оболочки кабеля является актуальной задачей.

Силовые кабели изготавливаются с одной, двумя, тремя и четырьмя токоведущими жилами. В качестве материала жил используется медь и алюминий. В зависимости от требуемой гибкости кабеля жилы могут быть однопроволочные и многопроволочные, обладающие большой гибкостью. Для кабелей стационарной прокладки изготавливают жилы круглой и фасонной (сегментной и секторной) формы. Применение секторных и сегментных жил вместо круглых позволяет уменьшить диаметр кабеля на 20 - 25 %, соответственно сократить расход материалов на оболочку, защитные покрытия и изоляцию, что существенно снижает стоимость кабеля.[1]

В соответствии с ГОСТ Р МЭК 60811-1-1-98 «Измерение толщин и наружных размеров - Измерение толщины и наружных размеров изоляции и оболочек кабелей», для жил секторной формы проводят шесть измерений, как показано на рис. 1 (м.т. — минимальная толщина).[2]



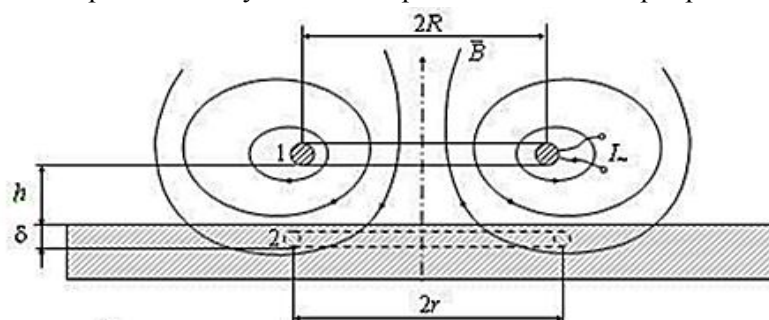
**Рис. 1.** Шесть точек измерения толщины изоляции для секторной жилы

Для измерения толщины изоляционной оболочки кабеля, применяются различные методы и средства, в том числе, механический, ультразвуковой, ёмкостный, радиационный, вихретоковый. Измерение геометрических параметров кабеля должно происходить в режиме реального времени непосредственно в технологическом процессе. По сравнению с другими методами, вихретоковый метод обладает высокой скоростью контроля, малым влиянием внешних факторов, возможностью автоматизации процесса контроля.

**Физические основы вихретокового метода измерительных преобразований**

Измерительные преобразования в полях вихревых токов основаны на возбуждении в электропроводящих объектах переменным магнитным полем вихревых токов и зависимости параметров этих токов от свойств объекта.[3]

На рис. 2 приведен принцип возбуждения вихревого тока в электропроводящих объектах.



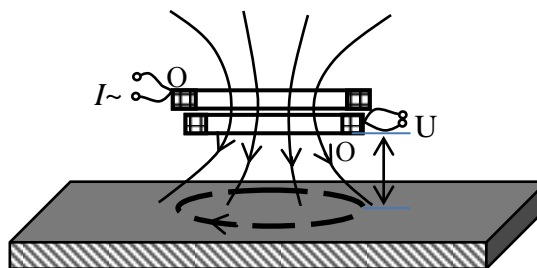
**Рис. 2.** Принцип возбуждения вихревого тока:  
1 – обмотка с переменным током; 2 – контур вихревого тока

Контроль толщины изоляции при одностороннем доступе проводят накладным вихретоковым преобразователем ВТП, состоящим из возбуждающей ОБ и измерительной ОИ обмоток (рис 3). Синусоидальный ток, протекающий по обмотке возбуждения, создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте контроля (ОК). Магнитное поле вихревых токов воздействует на обмотки ВТП, наводя в них ЭДС.

Напряжение измерительной обмотки ОИ состоит из двух частей

$$\dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{U}_{вн}$$

Начальное напряжение  $\dot{U}_0$  наводится в измерительной обмотке в отсутствии объекта контроля за счет индуктивной связи между возбуждающей и измерительной обмотками ВТП. Вносимое напряжение  $\dot{U}_{вн}$  наводится вихревыми токами, протекающими в объекте контроля. Оба напряжения являются комплексными. Начальное напряжение  $\dot{U}_0$  зависит от частоты тока возбуждения и размеров ВТП, а вносимое напряжение  $\dot{U}_{вн}$  определяется также параметрами объекта контроля и взаимным расположением ВТП и ОК.

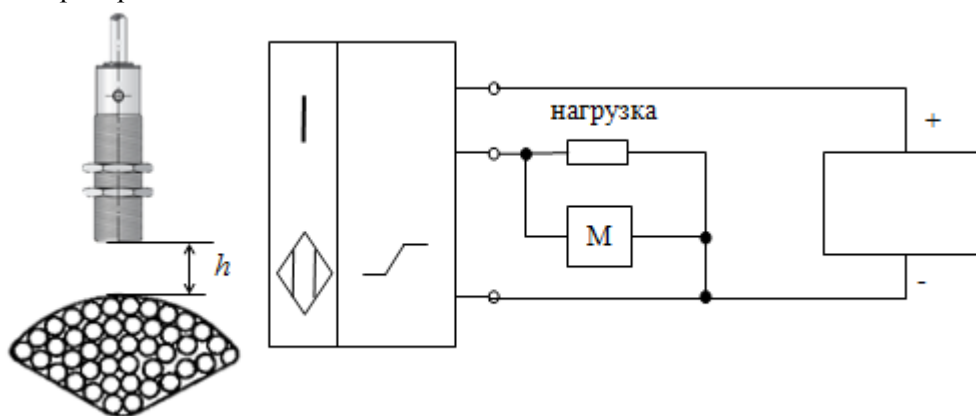


**Рис. 3.** Принцип измерения толщины накладным вихретоковым преобразователем

**Экспериментальная часть**

Целью эксперимента являлось экспериментальное исследование зависимости выходного напряжения вихретокового преобразователя от изменения расстояния между корпусом преобразователя и поверхностью жилы кабеля, формы поперечного сечения.

Если форма секторной жилы симметричная, то можно проводить эксперименты для четырёх точек. На рис. 4 приведена схема измерения толщины изоляции кабеля накладным вихретоковым преобразователем.



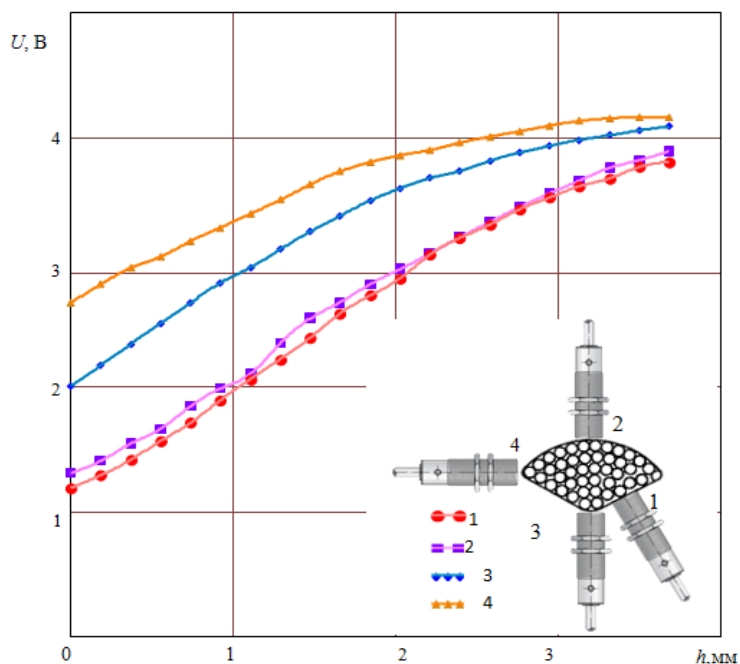
**Рис. 4.** Экспериментальная схема измерения толщины изоляции кабеля накладным вихретоковым преобразователем

Использовался источник питания постоянного тока Б5-49 как источник энергии. Объектом контроля являлась секторная жила кабеля. С помощью мультиметра (М) измерялось выходное напряжение при постепенном увеличении зазора диэлектрическими прокладками, толщина которых равна 0,184 мм. В качестве преобразователя использован ДПА-М18-76У-1110-Н. Далее строился график зависимости выходного напряжения преобразователя от изменения зазора между корпусом ВТП и поверхностью жилы кабеля.

Технические характеристики ДПА-М18-76У-1110-Н[4] приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Основные характеристики ДПА-М18-76У-1110-Н

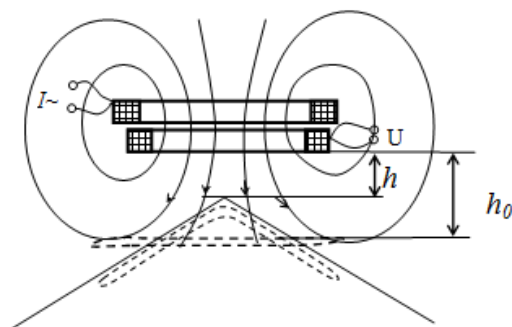
Диапазон рабочих напряжений	(10–30) В DC
Рабочая зона чувствит. элемента	(0,75–5) мм
Линейная зона чувствит. элемента	(1,24–4) мм
Нелинейность в линейной зоне	5%
Диаметр	М18×1



**Рис. 5.** Зависимости выходного напряжения от изменения зазора между корпусом ВТП и поверхностью жилы кабеля

На рис. 5 показаны зависимости выходного напряжения от зазора между корпусом преобразователя и поверхностями жилы кабеля в разных точках поверхности. При увеличении зазора выходное напряжение возрастает и характеризуется нелинейной зависимостью. Следует отметить, что для рассматриваемых четырёх точек характер изменения похож, но зависимости отличаются друг от друга по причине разной формы поверхности.

Исследуем причины влияния формы поверхности. Очевидно, что при криволинейной форме поверхности среднее расстояние до поверхности  $h_0$  больше расстояния до ближайшей точки поверхности  $h$  (рис. 6). Поэтому сигнал ВТП для этого случая оказывается меньше сигнала для случая плоской поверхности. Чем больше кривизна поверхности, тем сильнее выражен этот эффект.



**Рис. 6.** Возбуждение вихревого тока на объекте, имеющий секторное поперечное сечение

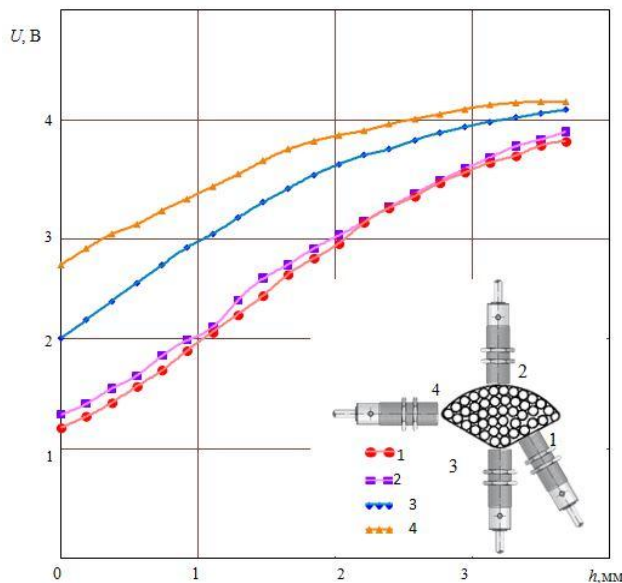
Далее были испытаны преобразователи расстояния BAW M18MG-UAC80F-S04G [5] и BAW M12MF2-UAC40F-BP03 [6]. Основные характеристики этих преобразователей приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Основные характеристики преобразователей BAW

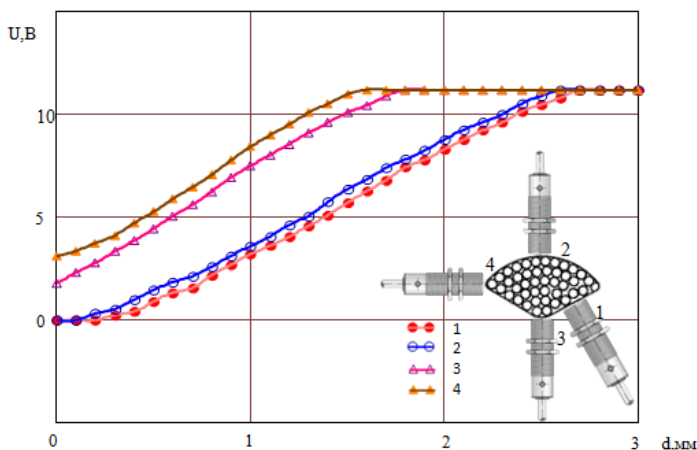
Тип преобразователей	BAW M18MG-UAC80F-S04G	BAW M12MF2-UAC40F-BP03
Входное напряжение (В)	15—30 DC	15—30 DC

Выходное напряжение (В)	0—10	0—10
Линейная чувствительная зона (мм)	2—8	1—4
Коэффициент температуры(мкм/К)	-2—4	2—13
Нелинейность(мкм)	±180	±90
Диаметр(мм)	M18×1	M12×1

По результатам эксперимента были построены зависимости выходного напряжения преобразователя от изменения зазора между корпусом ВТП для четырех точек поверхности жилы кабеля. Зависимости показаны на рис. 7 для преобразователя BAW M18MG-UAC80F-S04G и на рис. 8 показаны зависимости для преобразователя BAW M12MF2-UAC40F-BP03.



**Рис. 7.** Зависимости выходного напряжения от изменения зазора между корпусом ВТП BAW M18MG-UAC80F-S04G для четырех точек поверхности жилы кабеля



**Рис. 8.** Зависимости выходного напряжения от изменения зазора между корпусом ВТП BAW M12MF2-UAC40F-BP03 для четырех точек поверхности жилы кабеля

При увеличении зазора выходное напряжение возрастает. Следует отметить, что в отличие от преобразователя ДПА-М18-76У-1110-Н, эти преобразователи обладают лучшей линейностью в рабочей зоне. Но у них разные диапазоны линейной зона. В нашей задаче нужно контролировать секторный кабель, номинальное значение толщины изоляционной оболочки которого равно 2мм, таким образом, преобразователь BAW M12MF2-UAC40F-BP03 не применим, особенно для точек 3 и 4, линейная зона для которых (0 – 1,5) мм. Для решения нашей задачи подходит преобразователь BAW M18MG-UAC80F-S04G.

Исследование влияния смещения преобразователя относительно объекта контроля.

В процессе контроля могут иметь место параллельное смещение  $d$  (рис. 9а) и угол наклона  $\theta$  (рис. 9б). Поэтому следует исследовать влияние угла  $\theta$  и перемещения  $d$  на выходное напряжение.

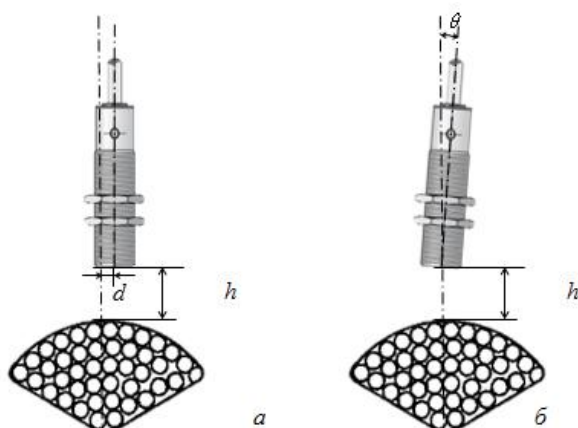


Рис.9. Отклонение преобразователя от оси симметрии: а—перемещение  $d$ , б—угол  $\theta$

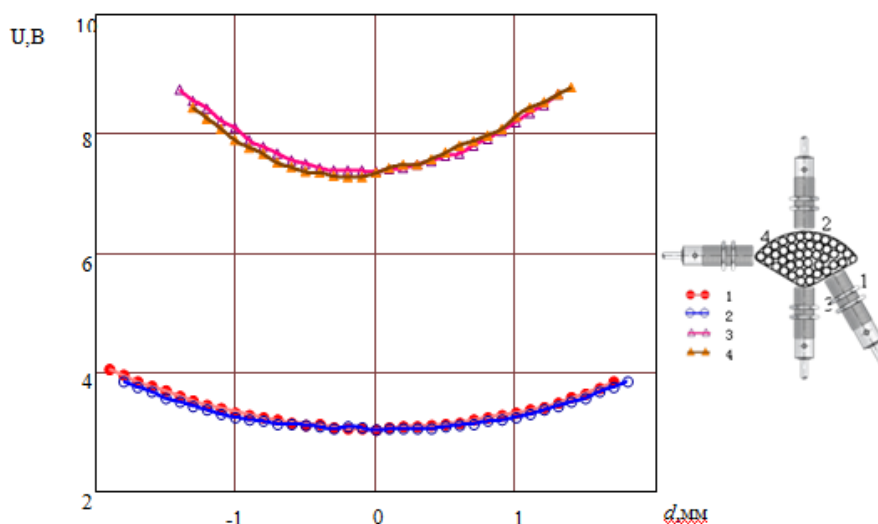


Рис.10. Зависимость выходного напряжения от изменения перемещения  $d$ , для преобразователя BAW M18MG-UAC80F-S04G

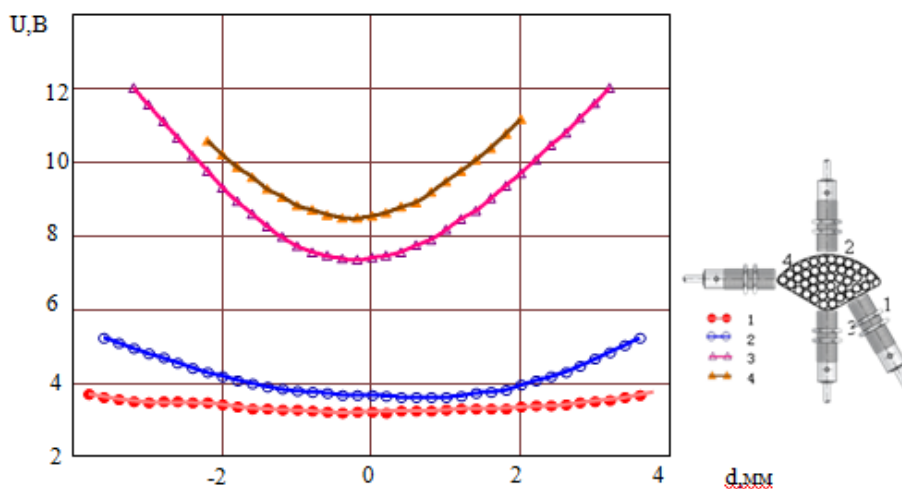


Рис.11. Зависимость выходного напряжения от изменения перемещения  $d$ , для преобразователя BAW M12MF2-UAC40F-BP03

На рис. 10 и 11 показаны зависимости выходного напряжения от изменения перемещения  $d$ , зависимости показаны на рис. 10 для преобразователя BAW M18MG-UAC80F-S04G, на рис. 11 для преобразователя BAW M12MF2-UAC40F-BP03. Можно сделать вывод о том, что перемещение возникает погрешность измерения. Для 1 и 2 точек влияние параллельного смещения незначительно в достаточно широком диапазоне. Если перемещение в пределах 1мм, погрешность можно без учёта.

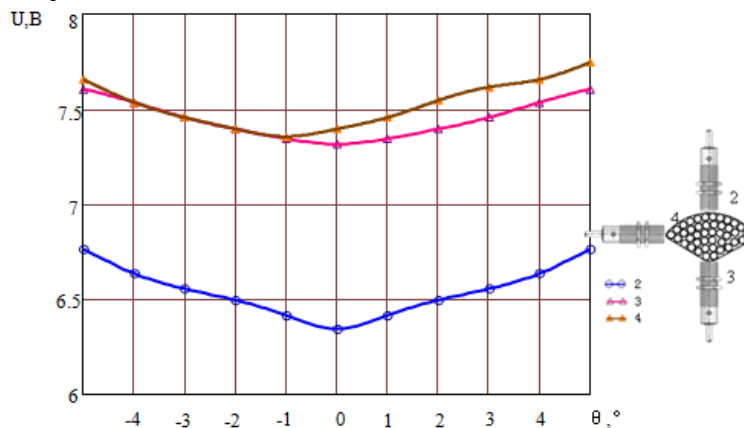


Рис.12.

На рис. 12 и 13 показаны зависимости выходного напряжения от изменения угла  $\theta$ . Можно сказать, что угол перемещения является источником погрешности измерения, и чем угол больше, тем погрешность больше. Чтобы обеспечить точность измерения, допустимое перемещение меньше  $1^\circ$ .

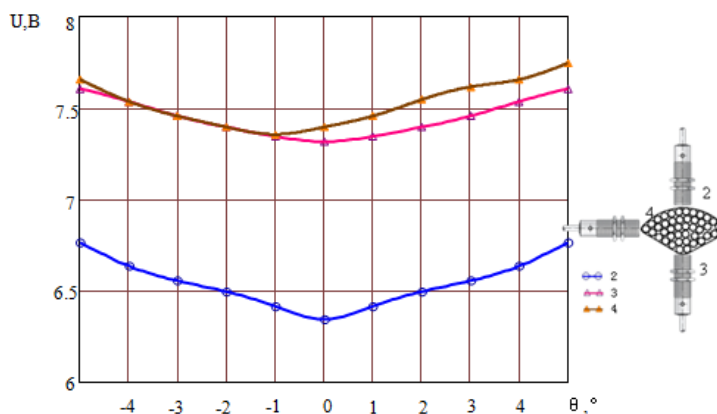
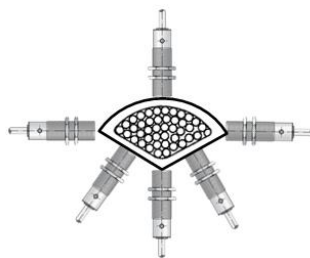


Рис.13.

Симметричность зависимостей относится от положения преобразователя от поверхности жилы кабеля. Для точки 4 невозможно была симметричная зависимость, причина в том, что ее форма не симметричная.

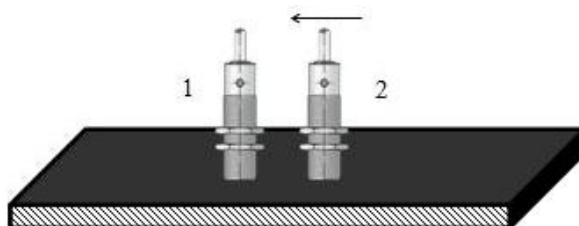
Таким образом, чтобы исключить эти погрешности, необходимо фиксировать положение преобразователя от жилы кабеля.

В соответствии с ГОСТ Р МЭК 60811-1-1-98, для жил секторной формы проводят шесть измерений.



**Рис. 14.** Система для измерения толщины изоляционной оболочки секторного кабеля

Данная измерительная система содержит 6 датчиков, которые работают одновременно, как показана на рис. 14. Поэтому было исследовано их взаимное влияние. При приближении преобразователя 2 к преобразователю 1 (рис.15), значение выходного напряжения преобразователя 1 не изменяется. Таким образом, 6 преобразователей могут одновременно работать без взаимодействия.



**Рис. 15.** Исследование взаимодействия двух преобразователей

#### **Заключение**

Изучены физические основы вихретокового метода и принцип вихретокового толщиномера. Доказана возможность использования вихретокового метода для измерения толщины оболочки секторной жилы, получены зависимости выходного напряжения вихретокового преобразователя от изменения расстояния между корпусом преобразователя и поверхностью жилы кабеля. Проанализированы влияния основных влияющих факторов на результаты измерения.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Электрические сети [Электронный ресурс] / Назначение кабелей – Режим доступа: <http://leg.co.ua/info/kabeli/naznachenie-kabeley.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 5.05.2015).
2. ГОСТ Р МЭК 60811-1-1-98 «Измерение толщин и наружных размеров - Измерение толщины и наружных размеров изоляции и оболочек кабелей».
3. Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации: учеб. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.
4. Сенсор [электронный ресурс] / Датчик положения аналоговый индуктивный ДПА-М18-76У-1110-Н – Режим доступа: <http://www.sensor-com.ru/sensors/dpa-m18-76u-1110-n>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2014).
5. Balluff [Электронный ресурс] / Inductive Distance Sensor BAW M18MG-UAC80F-S04G – Режим доступа: [http://www.murri.fi/documents/balluff/BAW/BAWM18MG\\_UAC80F\\_S04G\\_en.pdf](http://www.murri.fi/documents/balluff/BAW/BAWM18MG_UAC80F_S04G_en.pdf), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 25.02.2015).
6. Balluff [Электронный ресурс] / Inductive Distance Sensor BAW M12MF2-UAC40F-BP03 – Режим доступа: [http://www.sensotronik.se/pdf/01ind/BUF/BAWM12MF2\\_UAC40F\\_BP03\\_en.pdf](http://www.sensotronik.se/pdf/01ind/BUF/BAWM12MF2_UAC40F_BP03_en.pdf), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 25.02.2015).

#### **Сведения об авторе:**

**Ван Юй:** г. Томск, студент гр.1БМ43 первого курса магистратуры кафедры Информационно-измерительная техника Национального исследовательского Томского политехнического университета. Сфера интересов: электромагнитный контроль, метод и средство неразрушающего контроля.