

УДК 528.88

**РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЯ ДЛИНЫ  
НЕМАГНИТНЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ  
ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ**

Г.С. Гынгазова, Д.В. Миляев, Н.И. Ермошин

Томский политехнический университет  
E-mail: ermoschin.nik@yandex.ru

Приведен обзор методов измерения длины. Подробно рассмотрен вихретоковый метод измерения длины. Проведен анализ чувствительностей параметров вихретокового преобразователя к параметрам движущегося изделия. Описаны экспериментально полученные данные.

**Ключевые слова:**

Вихретоковый метод, скоростной эффект, измерение длины, годограф.

В процессе изготовления протяженных изделий (канатов, прутков, проводов, проволоки и т. д.) требуется измерять их длину. Длина изделий контролируется как на предприятиях изготовителях, так и на предприятиях осуществляющих сбыт продукции.

В настоящее время эти измерения производятся линейными измерителями длины (рулетки, линейки, дальномеры) или с помощью фотоэлектрических и кондуктометрических преобразователей для измерения длины. Существуют так же косвенные методы измерения длины, преобразующие скорость движения изделия в длину путем ее интегрирования по времени. Все существующие измерители имеют ряд недостатков, а именно: относительно малую точность и сложность измерительных преобразователей.

В данной работе представляется использование вихретокового преобразователя, с помощью которого измеряется скорость движения и длина изделий.

**Обзор методов измерения длины***Электромеханический метод измерения длины и скорости*

Принцип работы электромеханических измерителей длины (рис. 1) заключается в следующем. Прокатный валик – 1, вращаемый на оси, прижимается к изделию – 2 и обкатывает его при поступательном движении.

**Гынгазова Галина Степановна**, магистр кафедры информационно-измерительной техники Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: mdv@tpu.ru

Область научных интересов: электромагнитные методы измерения и контроля.

**Миляев Дмитрий Васильевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-измерительной техники Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: mdv@tpu.ru

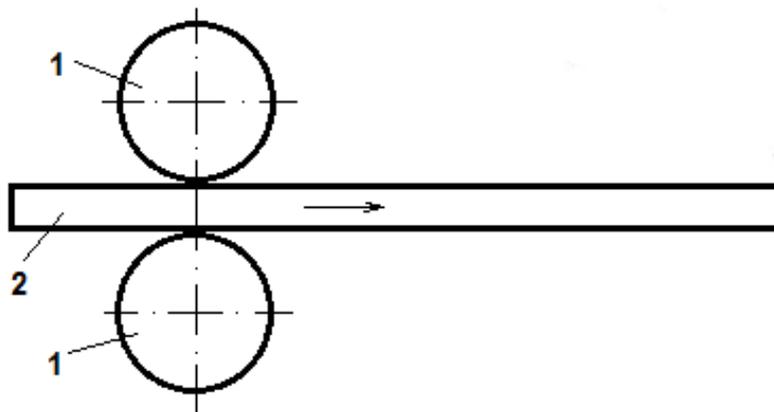
Область научных интересов: разработка методов и средств неразрушающего контроля и измерения, металлообнаружители, измерители больших сопротивлений, приборы медицинской диагностики.

**Ермошин Николай Иванович**, студент кафедры информационно-измерительной техники Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail:

ermoschin.nik@yandex.ru

Область научных интересов: электромагнитные методы измерения и контроля, металлообнаружители.



**Рис. 1.** Электромеханический измеритель длины 1 – прокатные валики; 2 – изделие

При отсутствии проскальзывания длина прокатываемого изделия определяется следующей формуле [1]:

$$L = \pi Dn = 2\pi rn,$$

где  $D$  – диаметр измерительного ролика;  $n$  – число оборотов измерительного ролика.

К достоинствам данного метода стоит отнести простоту и относительная надежность. Среди недостатков данного метода можно выделить: наличие механических деталей, проскальзывание ролика по изделию, стирание мерного колеса.

Бесконтактные методы измерения длины и скорости протяжённых изделий целесообразно использовать только в тех случаях, когда по тем или иным причинам невозможно использовать контактный электромеханический метод. Например, при измерении длины оптоволоконного кабеля и оптоволоконных кабелей невозможно применять контактный метод из-за хрупкости объекта измерения. А при измерении длины и скорости стальных канатов, проката, арматуры и т. п. контактный метод непригоден, так как мерные колёса не выдерживают нагрузок, возникающих при производстве этих изделий, и быстро изнашиваются. Также электромеханический метод измерения малоприменим при движении измеряемого объекта с большими скоростями из-за своей инерционности. Приборы, использующие бесконтактные схемы измерения, как правило, на порядок более сложные, дорогие и потенциально менее надёжные, хотя зачастую и обеспечивают хорошие метрологические характеристики.

*Измеритель длины, реализованный на электромеханическом методе «VETTER»*

#### **Характеристики измерителя длины кабеля VETTER:**

Диаметр измеряемого кабеля 25...110 мм;

Погрешность 1,0 %;

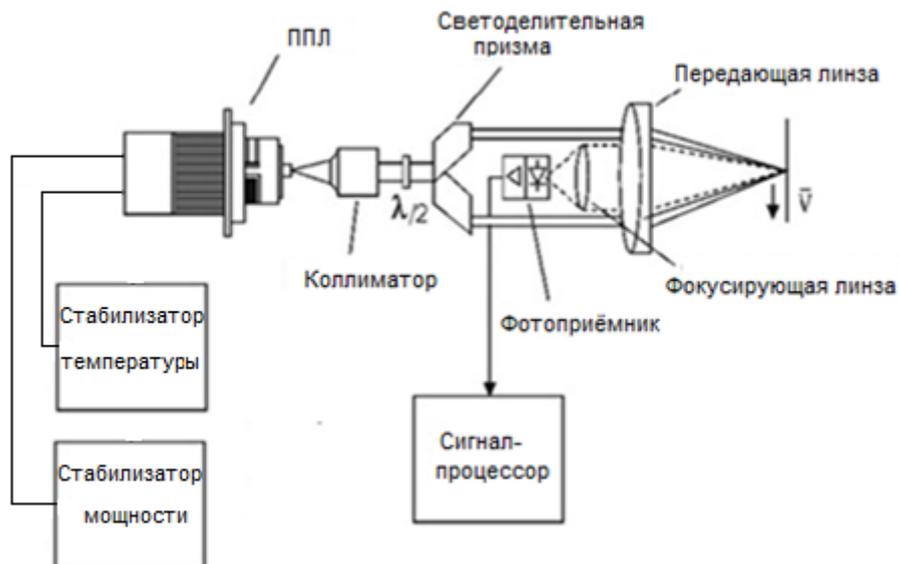
Механический счетчик со шкалой 9999,99;

Диаметр измерительного колеса 500 м;

Вес 13,00 кг.

*Лазерный доплеровский измеритель длины и скорости*

Принцип измерения лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) (рис. 2) заключается в следующем – лазерный пучок расщепляется светоделительной призмой на 2 луча, которые, пересекаясь на поверхности контролируемого объекта, образуют интерферирующую картину с периодом « $d$ ». Излучение, рассеянное неоднородностями на поверхности объекта, собирается приемной оптикой и преобразуется фотоприёмным устройством в электрический сигнал, частота которого пропорциональна скорости движения объекта [1]:



**Рис. 2.** Оптическая схема лазерного датчика ЛДИС (ППЛ – полупроводниковые лазеры)

$$f = \frac{v}{d} = \frac{2 \cdot v \cdot \sin\left(\frac{Q}{2}\right)}{\lambda},$$

где  $f$  – выходная частота лазерного датчика;  $v$  – скорость объекта;  $Q$  – угол между лазерными лучами;  $\lambda$  – длина волны лазера.

Таким образом, измеряя выходную частоту лазерного датчика, можно определить скорость и, соответственно, длину движущегося объекта:

$$v = \frac{f \cdot \lambda}{\sin\left(\frac{Q}{2}\right)} = K_{гр} \cdot f,$$

где  $K_{гр}$  – градуировочный коэффициент прибора;  $\lambda$  – длина волны;  $f$  – выходная частота лазерного датчика. Тогда длина объекта определяется по формуле

$$L = \int_0^t v(t) dt,$$

где  $L$  – длина объекта;  $t$  – время измерения.

Данный метод обладает следующими достоинствами: бесконтактность измерения, отсутствие проскальзывания ролика, возможность измерения хрупких объектов, высокая точность.

К недостаткам следует отнести высокую стоимость, ограничения по скорости, невозможность определения направления движения, проблему контакта с объектом.

В компании SIKORAAG был разработан лазерный доплеровский измеритель скорости и длины LENGTH 6000 со следующими техническими характеристиками:

Диаметр продукта 5...180 мм;

Линейная скорость 0...500 м/мин;

Погрешность 0,05 %;

Интерфейсы RS485, RS232, Pulse output, LAN (Ethernet);

ProfibusDP, Ethernet/IP, ProfiNet;

Допустимая температура окружающей среды 5...50 °С;

Источник питания 100...240 В, 50/60 Гц;

Размеры 387×130×300 мм.

## Корреляционный метод измерения длины

Сущность корреляционного метода измерения линейной скорости (рис. 3) заключается в следующем. На поверхности металла, движущегося со скоростью  $v$ , при помощи двух осветителей  $L_1$  и  $L_2$  с линейными нитями накала через оптическую систему проектируются два ярких световых штриха, оси которых перпендикулярны направлению движения полосы. Штрихи расположены вдоль по направлению прокатки на фиксированном расстоянии один от другого.

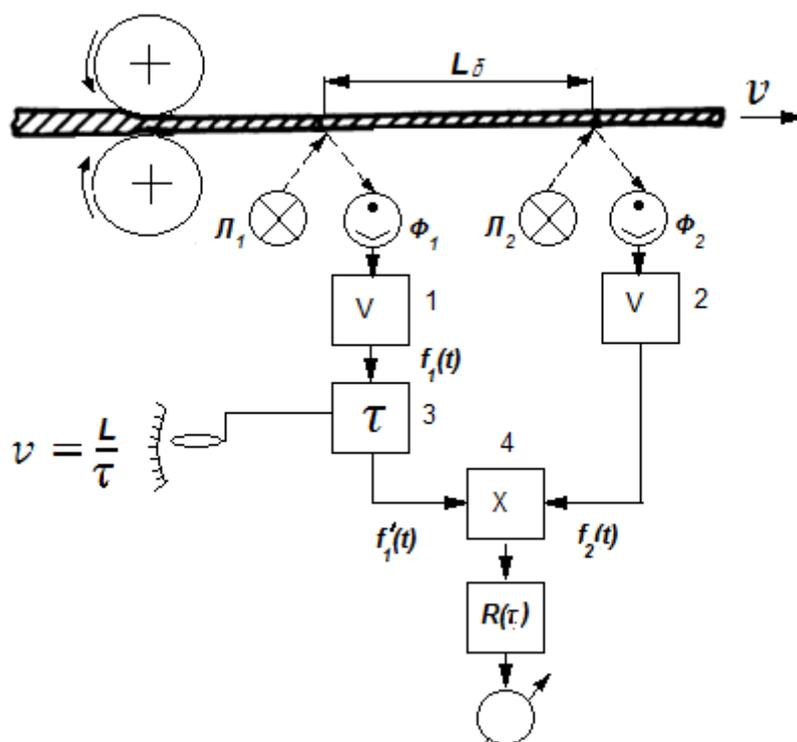


Рис. 3. Схема корреляционного измерителя длины

Вследствие различных структурных неоднородностей металла, наличия на поверхности металла трещин, пятен и окалины яркость штрихов изменяется. Изображение штрихов воспринимается приемной оптической системой и проектируется на катоды двух фотоэлементов  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , с которых снимаются сигналы, пропорциональные яркости каждого из штрихов. Усилители – 1 и 2 усиливают сигналы до уровня, достаточного для нормальной работы коррелятора, состоящего из блока регулируемого запаздывания – 3, множительного устройства – 4 и интегратора или сглаживающего фильтра – 5. Блок регулируемого запаздывания, включенный в канал первого сигнала, может быть выполнен, например, в виде магнитной ленты или магнитного барабана с подвижной читающей головкой.

Так как второй штрих смещен относительно первого на расстояние  $L_\delta$ , то сигнал  $f_1(t)$ , характеризующий яркость первого штриха, повторится на втором штрихе с некоторым транспортным запаздыванием  $T_\tau$ , прямо пропорциональным расстоянию между штрихами  $L_\delta$  и обратно пропорциональным скорости движения проката  $v(t)$ :

$$T_\tau(t) = \frac{L_\delta}{v(t)}.$$

Второй сигнал  $f_2(t)$  через интервал времени  $T_\tau$  по форме будет близок к первому сигналу. Иначе говоря,

$$f_2(t) = f_1(t + T_\tau).$$

Выходной сигнал коррелятора максимален при  $t=T_T$ , т. е. при равенстве введенного регулируемого запаздывания транспортному запаздыванию  $T_T$  сигнала второго фотозлемента. Изменяя  $T_T$ , достигают максимального показания индикатора и тем самым обеспечивают условие  $t=T_T$ . Учитывая, что при фиксированном  $L_6$  транспортное запаздывание  $T_T$  однозначно связано со скоростью  $v(t)$ , можно определить скорость движения металла:

$$v(t) = \frac{L_6}{T_T(t)}.$$

Для определения длины необходимо проинтегрировать скорость по времени:

$$L = \int_0^t v(t) dt.$$

Существенным недостатком измерителя скорости полосы, использующего корреляционный метод, является весьма малая надежность, необходимость тщательной наладки и частых периодических подналадок отдельных узлов [2].

*Измеритель длины, реализованный на корреляционном методе «Измеритель R3»*

**Назначение:** измерение длины и скорости горячего проката для систем учета. Альтернатива-лазерным доплеровским измерителям скорости.

Технические характеристики:

Диапазон измеряемых скоростей  $\pm 10$  м/с;

Минимальная измеряемая скорость 0,5 м/с;

Температура проката 550...1200 °С;

Погрешность измерения скорости 1 %;

Погрешность измерения длины проката 0,15 %;

Расстояние от измерителя до проката 1600, 2300 мм;

Диапазон изменения расстояния до проката 600 мм;

Частота измерений 100 раз в секунду;

Интерфейсы RS232, RS485, дискретный выход – аналог сигналов импульсного датчика.

*Вихретоковый метод измерения длины и скорости*

Вихретоковый метод основан на использовании скоростного эффекта, который заключается в том, что при движении изделия в переменном электромагнитном поле возникают дополнительные вихревые токи за счет движения. Это приводит к искажению вихревых токов, наводимых переменным электромагнитным полем. Скоростной эффект является мешающим фактором при электромагнитном контроле и является полезным при измерении скорости и длины.

Данный метод нашел широкое применение при контроле качества продукции и измерении различных геометрических и электрофизических параметров объектов в процессе их движения относительно вихретоковых преобразователей (ВТП).

При контроле проходными ВТП движущихся цилиндрических протяженных объектов (проводов, труб прутков и др.) представляет практический интерес анализ вносимых параметров проходных наружных преобразователей (ПНП).

Ниже приведено выражение для относительного вносимого напряжения проходного наружного ВТП [3]:

$$\dot{U}_{\text{вн}} = -j\mu_0 \dot{I} a^2 \omega \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mu_r |\lambda| J_0(|\lambda| R) J_1(qR) - q J_1(|\lambda| R) J_0(qR)}{\mu_r |\lambda| K_0(|\lambda| R) J_1(qR) + q K_1(|\lambda| R) J_0(qR)} \cdot K_1^2(|\lambda| a) e^{-j\lambda z} d\lambda,$$

где  $q^2 = \lambda^2 - j\mu_a \lambda v_z \sigma + j\omega \mu_a \sigma = \sqrt{\lambda^2 - k^2 (1 - \frac{\lambda v}{\omega})}$ ,  $\beta = R \sqrt{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma}$  – обобщенный параметр;

$n_v = v_z \cdot a \cdot \mu_0 \cdot \sigma$ ;  $J_n$  – функция Бесселя первого рода  $n$ -го порядка;  $K_n$  – модифицированная функция Бесселя второго рода  $n$ -го порядка;  $a$  – радиус возбуждающего и измерительного витков;  $R$  – радиус объекта (наружный для ПНП и внутренний для ПВП);  $z$  – расстояние ме-

жду плоскостями возбуждающего и измерительного витков;  $v_z$  – скорость движения контролируемого объекта вдоль оси ВТП;  $\lambda$  – переменная интегрирования;  $\sigma$  – электрическая проводимость.

Причем функции  $K_n(|\lambda|R)$ ,  $J_n(|\lambda|R)$  описывают воздействие вихревых токов;  $J_n(qR)$  отвечают за влияние скоростного эффекта.

Если изменять  $\lambda$ , то можно определить вносимое напряжение от обобщенного параметра, включая размеры объекта контроля, частоту и электрические свойства материала, а также скорости движения объекта контроля. По величине вносимого напряжения можно определить скорость при различных обобщенных параметрах, а зная скорость, можно определить длину объекта.

Достоинства:

- бесконтактность измерения;
- на сигналы преобразователя практически не влияют влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности объекта контроля непроводящими веществами;
- простота конструкции преобразователя, его надежность и высокий срок службы.

Недостатки:

- необходимость отстройки от мешающих параметров;
- нелинейность характеристик преобразования (а именно нелинейная связь между напряжением и скоростью), соответственно, для линеаризации требуется сужение диапазона измерения скорости.

Известные вихретоковые преобразователи применяют для контроля и измерения различных параметров технологических процессов в информационно-измерительных системах. Однако для измерения скорости вихретоковый метод недостаточно исследован. Особенно это проявляется при контроле различных движущихся изделий – ферромагнитных и немагнитных, имеющих различную форму и длину.

### Теоретические исследования применительно к измерению скорости

Рассмотрим проявление скоростного эффекта применительно к круглым проходным катушкам при движении немагнитного изделия с круглыми сечениями.

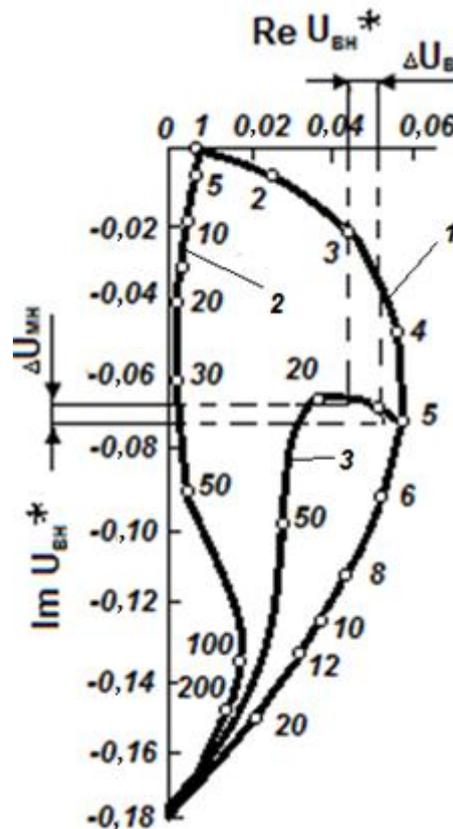
При измерении скорости ВТП можно использовать не только вносимую ЭДС, но и ее отдельные составляющие: вещественную и мнимую составляющие, их модуль, отношение этих величин, сдвиг фаз, добротность и др. В данной работе исследуется чувствительность по мнимой, вещественной составляющим, их модулю и фазе.

В теоретическом плане в данной работе используется не расчет вносимого напряжения от скоростного эффекта, а определение напряжения по годографам относительного вносимого напряжения проходного наружного ВТП при движении неферромагнитного цилиндрического объекта, взятых из литературы [3].

На рис.4 представлен годографы относительного вносимого напряжения проходного наружного ВТП при движении неферромагнитного цилиндрического объекта.

Годограф – это изменение в системе  $U_{\text{вещ}}/U_{\text{xx}}$  по оси  $x$  и  $U_{\text{мн}}/U_{\text{xx}}$  по оси  $y$  при различных значениях параметров объекта, частоты, скорости и т.д.

При контроле круглыми проходными ВТП движущихся цилиндрических объектов (проводов, труб, прутков и др.) представляет практический интерес анализ вносимых параметров ПТП.



**Рис. 4.** Годографы относительного вносимого напряжения проходного наружного ВТП при движении неферромагнитного цилиндрического объекта

Для выбора метода измерения и построения структурной схемы в работе определяются чувствительности от скорости по вещественной составляющей, мнимой составляющей, модулю и фазе.

Общие формулы чувствительности от изменения скорости имеют вид:

$$SU_B = \frac{\left| \frac{U_{B1} - U_{B2}}{U_{B1}} \right| \cdot 100\%}{\Delta v}, \quad SU_{MH} = \frac{\left| \frac{U_{MH1} - U_{MH2}}{U_{MH1}} \right| \cdot 100\%}{\Delta v};$$

– формулы расчета чувствительностей для мнимой и вещественной составляющей ЭДС.

$$S\phi = \frac{\left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \cdot 100\%}{\Delta v}, \quad \phi = \arctg \frac{U_{MH}}{U_B};$$

– формула расчета чувствительности фазы сигнала от изменения скорости.

Модуль выходного сигнала:

$$|U_m| = \sqrt{U_{MH}^2 + U_B^2},$$

$$SU_m = \frac{\left| \frac{U_{m1} - U_{m2}}{U_{m1}} \right| \cdot 100\%}{\Delta v};$$

– формула расчета чувствительности модуля скорости.

По полученным данным построены графики зависимости изменения чувствительности от изменения скорости.

Таблица 1. Расчет чувствительности

$\beta$	$v^*$	$\Delta v$	$SU_{мн}$	$SU_{в}$	$S\phi$	$SU_m$
5	0	0				
	10	6,67	1,06	2,306	0,8390	1,561
	20	13,33	0,00	3,543	2,2084	1,394
	30	20	1,82	2,498	1,7256	0,768
	40	26,67	2,43	0,428	0,9667	1,828
	50	33,33	1,05	0,440	0,2623	0,977
1	0	0				
	10	6,67	0	2,998	0	41,979
	20	13,33	8,68	1,874	1,551	15,879
	30	20	10,99	2,283	0,772	10,002
	40	26,67	6,35	2,998	0,228	4,352
	50	33,33	1,87	14,992	0,006	1,874

На рис. 5 приведены графики чувствительностей, рассчитанных по годографам.

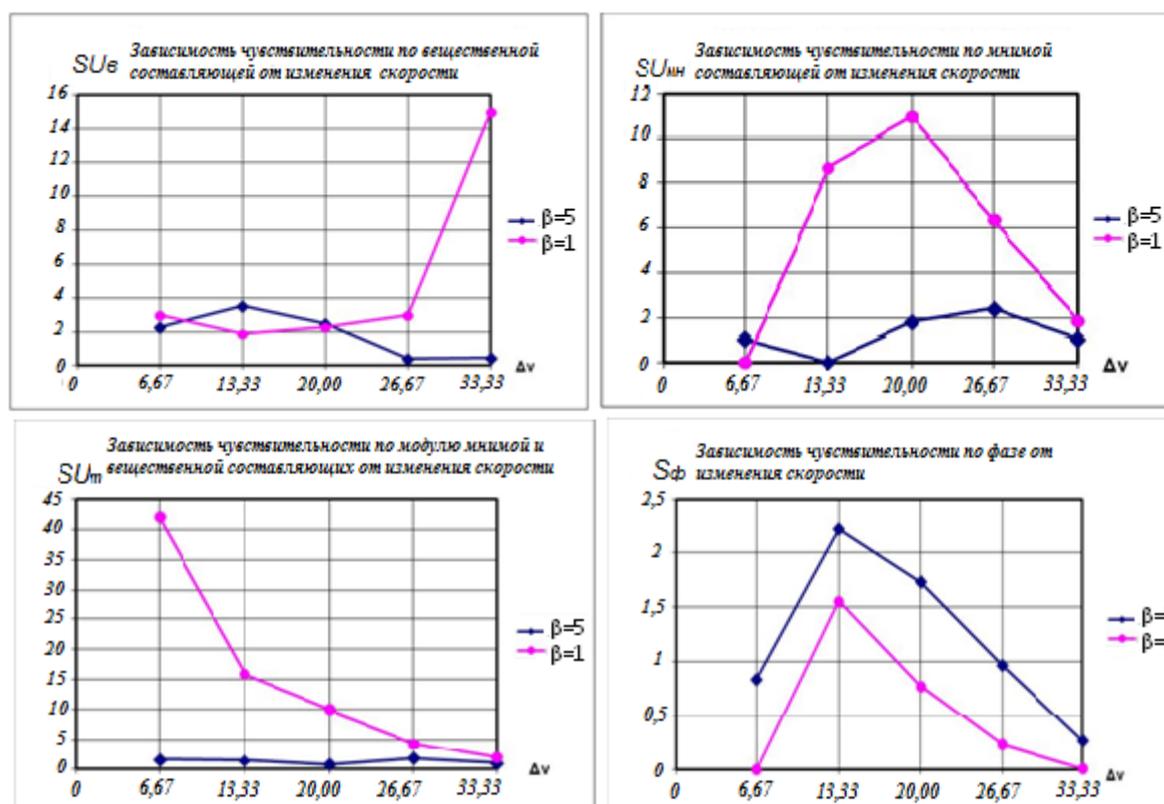


Рис. 5. Графики зависимостей чувствительности мнимой и вещественной составляющей, их модуля и фазы сигнала от изменений скорости

Для измеряемого параметра устройство должно иметь линейную зависимость. Графики зависимости, которые наиболее подходят под данное условие реализуются фазовым методом, т. к., разделив данный график на промежутки и аппроксимируя их, получаются линейные зависимости, имеющие одинаковые коэффициенты передачи. Также по данным графикам видно, что фазовый метод меньше всего зависит от частоты.

Вихретоковый метод контроля, измерения и диагностики применяется в приборах для контроля различных физических величин.

Это связано с преимуществами вихретокового контроля, такими как высокая скорость контроля, его бесконтактность, высокая чувствительность, высокая надежность и производительность первичных преобразователей и их дешевизна.

В связи с тем, что все больше применяются канаты из немагнитных металлов, возникает потребность в измерении длины изделий с высокой точностью.

В настоящее время для измерения применяются различные физические явления, которые, как правило, используют корреляционные методы измерения.

В данной работе рассматриваются вопросы применения вихретокового метода для измерения скорости.

Из литературных источников о вихретоковом методе [3] имеются математические связи, отражающие зависимость выходных параметров преобразователя от параметров изделия и скорости.

На рис. 4 приведены: 1 – годограф проходного преобразователя для максимального коэффициента заполнения, в данном случае объект измерения находится в статическом положении; 2, 3 – годографы относительных вносимых напряжений проходного вихретокового преобразователя при движении объекта измерения. Приведенные годографы скоростного эффекта для двух обобщающих параметров  $\beta = 1$ ,  $\beta = 5$ .

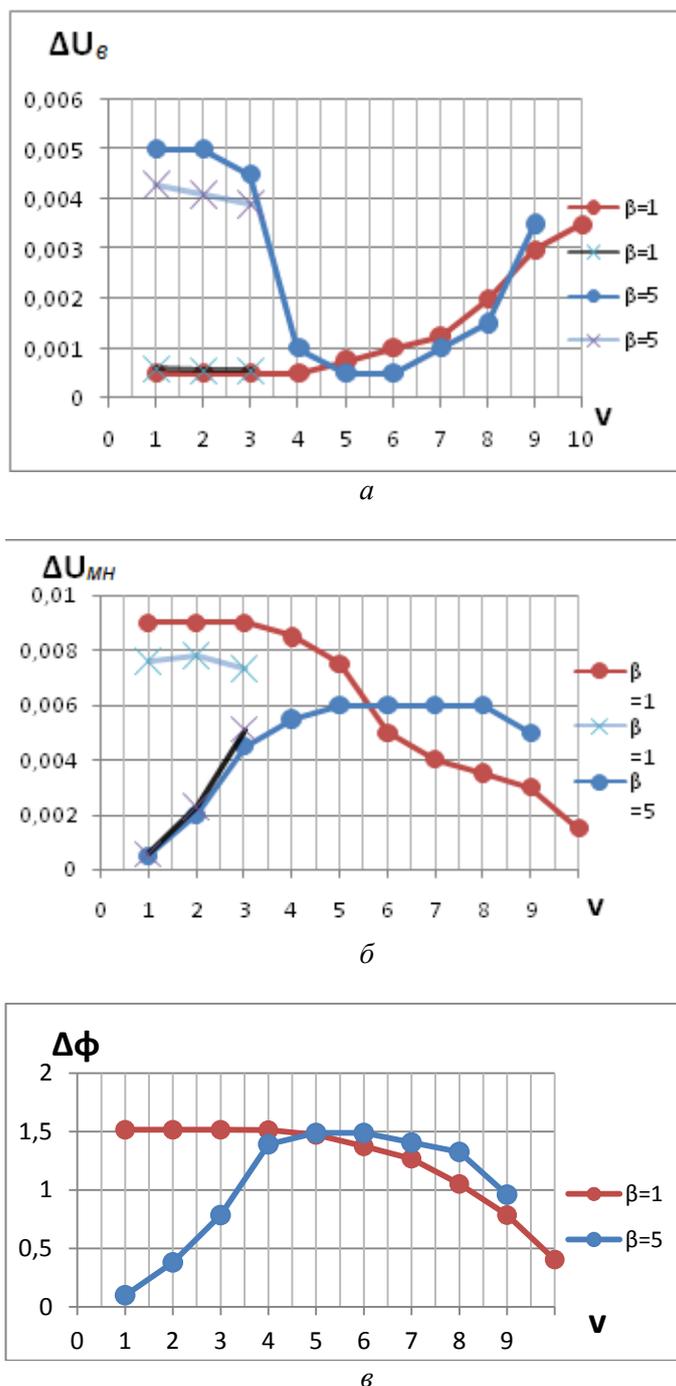
Из этих годографов определяются составляющие выходных напряжений при различных скоростях. На графиках рис.6 показаны зависимости мнимой, вещественной составляющих от скорости, а так же зависимость изменения фазы сигнала от скорости.

Как видно из табл. 2, при различных скоростях данные составляющие, теоретически рассчитанные по графику рис. 4, изменяются.

**Таблица 2.** Расчет напряжений (мнимой и вещественной составляющих) и фазы от скорости

	$v$	$v^*$	—	—	$\Delta\varphi$		$v$	$v^*$	—	—	$\Delta\varphi$
		0	0						0	0	
$\beta=5$	1	9,7	0,0045	0,002	0,266	$\beta=1$	1	9,7	0,0005	0,009	1,515
	2	19,4	0,0055	0,0015	0,418		2	19,4	0,0005	0,009	1,515
	3	29,1	0,004	0,0045	0,844		3	29,1	0,0005	0,009	1,515
	4	38,8	0,001	0,006	1,406		4	38,8	0,0005	0,0085	1,512
	5	48,5	0,0005	0,0055	1,480		5	48,5	0,00075	0,0075	1,471
	6	58,2	0,0005	0,006	1,488		6	58,2	0,001	0,005	1,373
	7	67,9	0,001	0,006	1,406		7	67,9	0,00125	0,004	1,268
	8	77,6	0,0015	0,008	1,385		8	77,6	0,002	0,0035	1,052
	9	87,3	0,0035	0,004	0,852		9	87,3	0,003	0,003	0,785

Согласно табл. 2 построены графики (рис. 6, а, б, в).



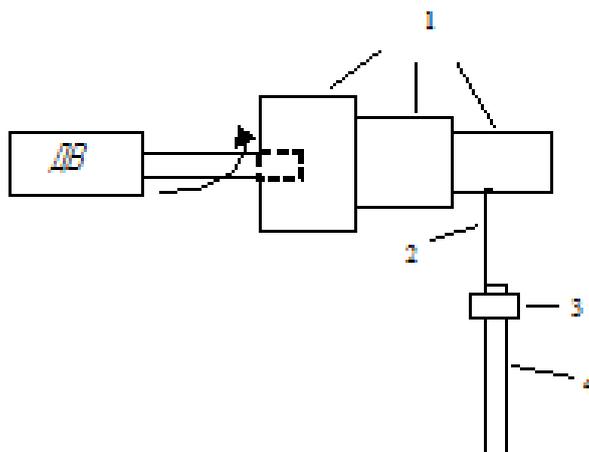
**Рис. 6.** Зависимость вещественной (а), мнимой (б) составляющих и фазы (в) сигнала от скорости. Крестиками (а, б) указаны экспериментально полученные данные, а точками – теоретические

Для проверки данных, рассчитанных по годографам, были проведены экспериментальные исследования ВТП при двух значениях (1 и 5) обобщенного параметра.

Для проведения эксперимента необходимо устройство задания скоростей.

Организация высоких скоростей представляет определенную трудность.

В данном случае использовалось простейшее устройство, его конструкция представлена на рис. 7.



**Рис. 7.** Намоточное устройство: ДВ – синхронный двигатель; 1 – цилиндрические насадки разных диаметров; 2 – намоточная нить; 3 – вихретоковый преобразователь; 4 – объект контроля (шток, стержень)

Данное устройство представляет собой синхронный двигатель, вращающий с постоянной скоростью специальные цилиндрические насадки различного диаметра.

Намоточная нить навивается на насадки, двигаясь по объекту контроля (шток). Диаметры насадок рассчитаны для трех скоростей движения и занесены в табл. 3. При расчете использовалась следующая формула:

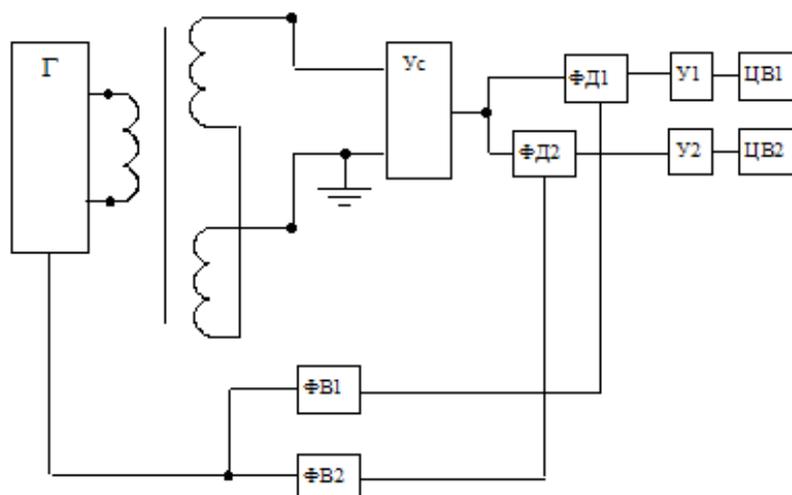
$$D = \frac{v \cdot 60 \cdot 1000}{\pi \cdot n}$$

**Таблица 3.** Расчет диаметров для насадок двигателя

v, м/с	1	2	3
n, об/мин	500		
D, мм	38,2	76,4	115,6

Каждый диаметр соответствует определенной скорости движения объекта контроля относительно преобразователя. При имеющихся диаметрах насадок и постоянной скорости вращения двигателя обеспечиваются соответствующие скорости движения, указанные в табл. 3.

Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 8.



**Рис. 8.** Схема экспериментальной установки

Данная схема работает по следующему принципу – с генератора подается напряжение на первичную обмотку, которая создает напряжения в двух встречноключенных катушках. Разность выходных напряжений поступает на усилитель.

Для измерения двух составляющих усиленного выходного сигнала (вещественной и мнимой составляющих) применяются два фазовых детектора. С помощью фазовращателей ФВ1 и ФВ2 подаются опорные сигналы, соответственно, с  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$  относительно сигнала первичной обмотки.

Далее сигналы с фазовых детекторов через усилители подаются на цифровые вольтметры, на одном из которых отображается мнимая составляющая, а на другом – вещественная.

По результатам, полученным в работе, можно сказать, что для определенной скорости объекта и определенного обобщающего параметра более информативной будет одна из составляющих: для малых и средних скоростей (1...6 м/с) разумно использовать мнимую составляющую напряжения, для больших скоростей (6...9 м/с) необходимо воспользоваться вещественной составляющей напряжения.

Также является полезной зависимость фазы от скорости.

Следует упомянуть, что на определение более информативного участка немалое влияние оказывает обобщающий параметр, поэтому каждый случай в своем роде является уникальным и подлежит отдельному рассмотрению.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Редько В.В., Федоров Е.М. Методы и средства контроля в кабельной промышленности. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 55 с.
2. Пивоваров Л.В. Индукционные измерители линейной скорости и длины. – М.: Энергия, 1972. – 80 с.
3. Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.

Поступила 14.02.2013 г.