

УДК 681.518.54

## ОДНОВИТКОВЫЕ ВИХРЕТОКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

© 2013 С. Ю. Боровик, Ю. Н. Секисов

Институт проблем управления сложными системами  
Российской академии наук, г. Самара

Рассматриваются одновитковые вихретоковые преобразователи, чувствительным элементом которых является одиночный контур тока. Приводятся конструктивные разновидности и рассматриваются примеры применения указанных преобразователей для измерения механических параметров.

*Вихретоковый преобразователь, одновитковый вихретоковый датчик, механические параметры, измерение, примеры реализации.*

Вихретоковые преобразователи (ВТП) имеют широкое распространение в дефектоскопии и в измерениях геометрических параметров различных изделий [1]. Одним из основных элементов ВТП является катушка индуктивности, которая может содержать магнитопровод. Кроме того, в зависимости от назначения в конструкцию ВТП могут входить дополнительные элементы (экраны), обеспечивающие преобразования геометрических параметров объекта в изменение параметров магнитной цепи ВТП.

В ВТП без магнитопровода электромагнитное взаимодействие с объектом или экраном обеспечивается многовитковой катушкой индуктивности (рис. 1).

Одной из особенностей таких ВТП является различная степень взаимодействия витков катушки с объектом - по мере удаления витков от объекта их «эффективность» уменьшается, что снижает потенциально возможную чувствительность ВТП. Действительно, в соответствии с законом Био-Савара [2], величина магнитной индукции  $dB_n$ , создаваемой элементом тока витка  $I_n$  на поверхности объекта в точке  $(x, y, z)$ , определяется геометрическими параметрами катушки индуктивности и расстоянием до объекта  $r_n$ :

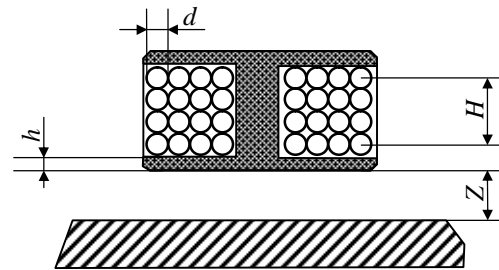


Рис. 1. ВТП без магнитопровода

$$dB_n(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{\lambda_n}{r_n^2} \cdot i,$$

$$r_n = Z + h + \frac{d}{2}n,$$

где  $Z$  – расстояние от ВТП до объекта,  $H$  – толщина слоя витков обмотки,  $h$  – толщина корпуса катушки,  $d$  – диаметр провода,  $n$  – номер слоя витков.

Снижение «эффективности» удалённых витков многовитковой катушки индуктивности характеризует отношение индукций, создаваемых элементами тока витков ближнего к объекту слоя  $I_1$  и наиболее удалённого от объекта слоя  $I_N$

$$(\delta_N = \frac{dB_1}{dB_N} = \left( \frac{r_1}{r_N} \right)^2).$$

Как видно из рис. 2, в области малых зазоров «эффективность» удалённых витков снижается в десятки раз.

Ещё одной особенностью таких ВТП является то, что катушка индуктивности представляет собой многокомпонентный элемент конструкции, который содержит каркас, витки провода в изоляции, пропитку и т.д. В результате, в условиях изменяющейся температуры внешней среды характер изменения параметров многокомпонентной катушки индуктивности будет нестабильным. Кроме того, материал компонентов многовитковой катушки имеет существенное ограничение на максимально возможную рабочую температуру (например, рабочая температура обмоточного провода типа ПЭТВ-2 не превышает 200°C [3]).

Указанных недостатков лишены ВТП, чувствительными элементами (ЧЭ) которых являются одиночные контуры тока - одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) [4, 5] (рис. 3). Индуктивность одновиткового ЧЭ ( $L_{ЧЭ}$ ) весьма мала и не превышает десятков нГн.

Для согласования ЧЭ с существующими измерительными цепями используются согласующие трансформаторы (СТ),

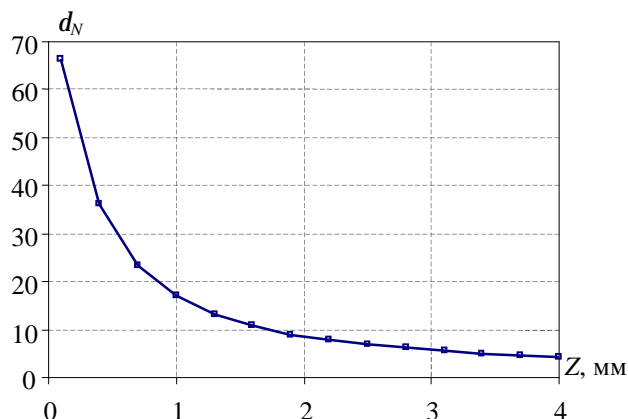


Рис. 2. Зависимость  $d_N$  от величины зазора  $Z$  между ВТП и объектом ( $h=0,05$  мм,  $H=5$  мм)

которые за счёт коэффициента трансформации ( $K_{тр}$ ) увеличивают индуктивность датчика ( $L_{\partial}$ ) до необходимой величины

$$L_{\partial} = L_{ЧЭ} \cdot K_{тр}^2 = L_{ЧЭ} \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2,$$

где  $w_1, w_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток СТ соответственно.

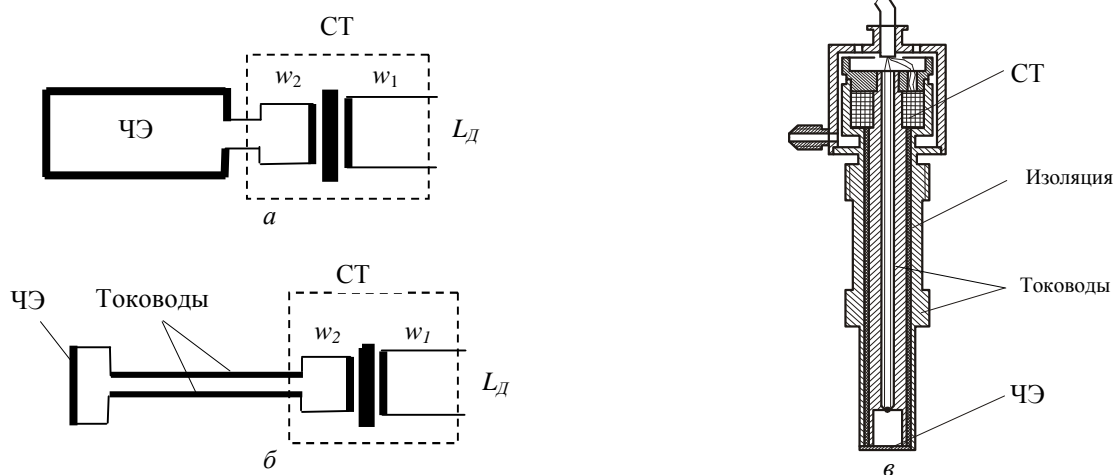


Рис. 3. Одновитковые вихретоковые датчики: с одновитковым ЧЭ (а), с ЧЭ в виде отрезка проводника (б), упрощённая конструкция ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника (в)

По назначению ОВТД можно разделить на две основные группы (рис. 4). К первой группе относятся ОВТД для бесконтактного измерения смещений элементов конструкции силовых установок на различных режимах работы. Ко второй группе относятся ОВТД для измерения механических параметров.

Конструкция ОВТД первой группы предусматривает ориентацию плоскости контура ЧЭ параллельно или ортогонально к направлению на объект. Параллельная ориентация плоскости контура ЧЭ к направлению на объект позволила создать оригинальную конструкцию ОВТД с ЧЭ в виде отрезка линейного проводника (рис.3 б, в).



Рис. 4. Применение ОВТД

В таком ОВТД контур ЧЭ подключён к СТ с помощью безындуктивного токовода. ЧЭ датчика (рис. 3 в) изготавливается из жаропрочных сплавов (например, ВЖ-98) и не требует изоляционного покрытия. Увеличенная длина тоководов (до 500 мм) позволяет вынести СТ с ферритовым сердечником из зоны с тяжёлыми внешними условиями. Жёсткая сварная конструкция ОВТД с плазменным напылением керамической изоляции между

проводниками тоководов обеспечивает высокую стабильность характеристик датчика при многократных циклических изменениях температуры. ОВТД этого типа предназначены для тяжёлых и экстремальных условий применения в зоне размещения ЧЭ (температура более 1000°C, изменяющийся состав среды, вибрационные нагрузки и др.) [4, 5].



Рис. 5. Варианты конструкций ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника для измерения зазоров в ГТД и ДВС

В качестве примера на рис. 5 приведены некоторые варианты конструкций ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника, предназначенные для измерения зазоров в компрессоре и турбине газотурбинного двигателя (ГТД), в подшипниках скольжения ГТД и двигателя внутреннего сгорания (ДВС), зазоров между поршнем и стенкой цилиндра ДВС. На рис. 6 показано применение ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника для исследования толщины масляного клина за рабочий цикл ДВС (рис. 6 а) и для управления магнитным подвесом вала электрогенератора (рис. 6 б).

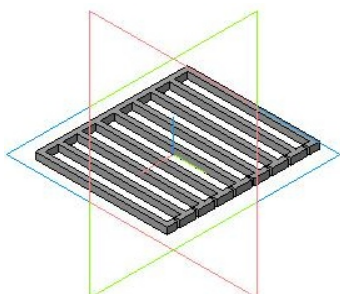


а

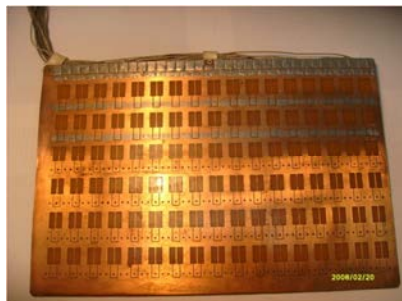


б

Рис. 6. Применение ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника для исследования толщины масляного клина в ДВС (а) и управления магнитным подвесом вала электрогенератора (б)



а



б



в

Рис. 7. Кластеры ЧЭ с ортогональной ориентацией контуров ЧЭ к направлению на объект: объёмные (а), на фольгированном стеклотекстолите (б), на фольгированной пленке (в)



Рис. 8. ОВТД для измерения зазоров между элементами смежных створок солнечных батарей

В ОВТД с ортогональной ориентацией плоскости контура ЧЭ к направлению на объект ЧЭ по своему конструктивному исполнению могут быть объёмными или плоскими. Объёмные ЧЭ изготавливаются из немагнитного материала с высокой электропроводностью, плоские - с использованием фольгированных материалов на жёсткой или гибкой подложке. В зависимости от назначения ЧЭ могут быть как одиночными, так и объединёнными в кластеры (рис.7).

На рис. 8 представлен вариант ОВТД с ортогональной ориентацией плоскости контура ЧЭ к направлению на объект, предназначенный для исследования изменений зазоров между двумя смежными деформируемыми относительно друг друга поверхностями. ЧЭ такого ОВТД выполнен на тонком фольгированном стеклотекстолите (вес не более 5 гр) и работает в паре с экраном из медной фольги (вес не более 0,5 гр). ОВТД обеспечивает измерение зазора в диапазоне 0...20 мм и может использоваться для исследований изменений зазоров между элементами соседних створок солнечных батарей при их виброиспытаниях.

ОВТД второй группы включают ЧЭ в виде одиночного контура в сочетании с электропроводным немагнитным экраном, конструкция которого определяется видом механического параметра, преобразуемого в перемещение экрана и обеспечивающего наибольшее изменение индук-

тивности вихретокового ЧЭ. Типовыми примерами практического применения таких ОВТД являются датчики абсолютных угловых перемещений и измерители крутящего момента (рис. 4).

Датчик угловых перемещений (ДУП) содержит цилиндрический каркас из электроизоляционного материала, на внутреннюю поверхность которого помещают кластер ЧЭ на плёночной подложке (рис. 7 в). Внутри каркаса с ЧЭ с минимальным зазором (0,1...0,2 мм) размещён цилиндр с немагнитным электропроводным экраном, перекрывающим поверхность кластера ЧЭ в секторе 180 градусов. Угловое перемещение экрана изменяет индуктивности ЧЭ кластера, что позволяет вычислить его угловое положение. Изменение числа и относительного положения ЧЭ в кластере позволяет создавать конструкции на различные пределы измерения угловых перемещений.

На рис. 9 в качестве примера представлены датчики, рассчитанные на различные диапазоны угловых перемещений. Датчик рис. 9 а предназначен для измерения угловых перемещений в диапазоне 0... 60 градусов. Датчик рис. 9 б предназначен для замены потенциометрического датчика углового положения дроссельной заслонки автомобиля. В габаритах стандартного датчика размещён ВТП, ЧЭ которого выполнены на плёночной подложке, а также электронный измерительный преобразователь, формирующий выходной сигнал, аналогичный стандартному автомобильному датчику. На рис. 9 в представлен датчик с дополнительной волновой передачей для вращения ротора, который обеспечивает непрерывно растущий аналоговый сигнал в диапазоне углового перемещения 0...900 градусов и предназначен для системы управления положением задвижек с винтовым приводом в нефтегазовых магистралях. Датчик малых угловых перемещений ( $\pm 5$  градусов, рис. 9 г) предназначен для использования в конструкциях измерителей крутящего момента.

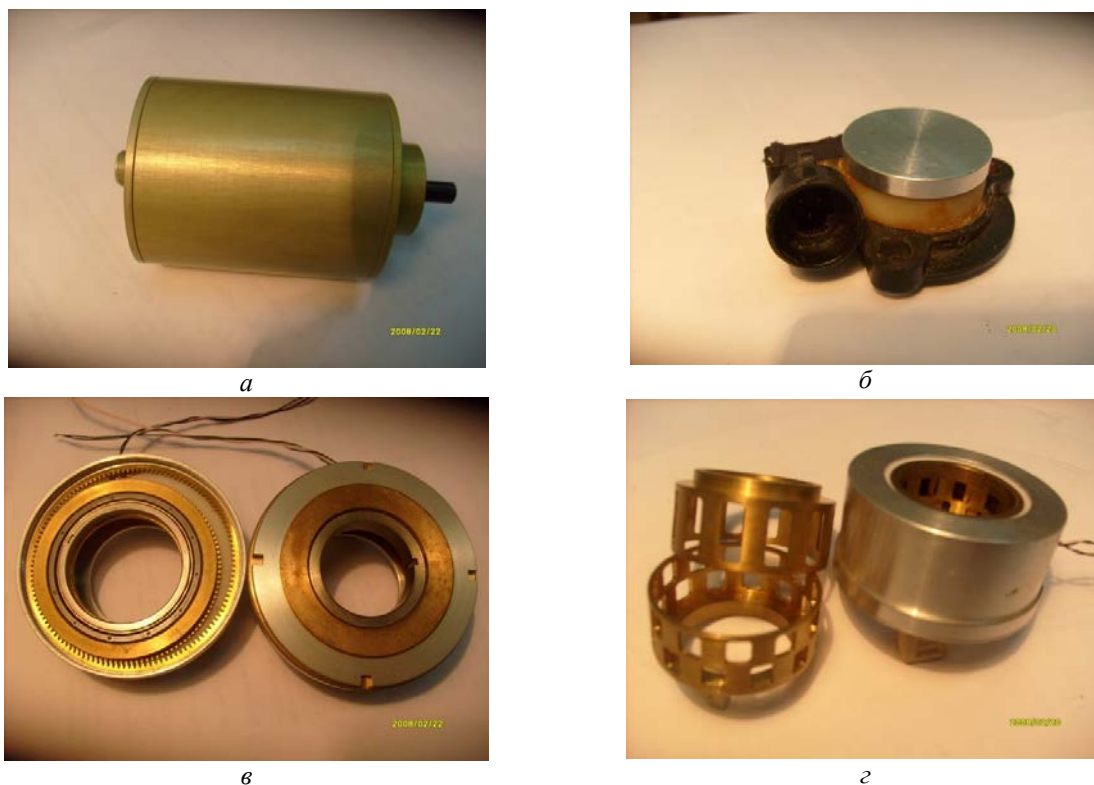


Рис. 9. Датчики угловых перемещений: ДУП 60 (а), ДУП 90 (б), ДУП 900 с волновым приводом ротора (в), ДУП  $\pm 5$  (г)

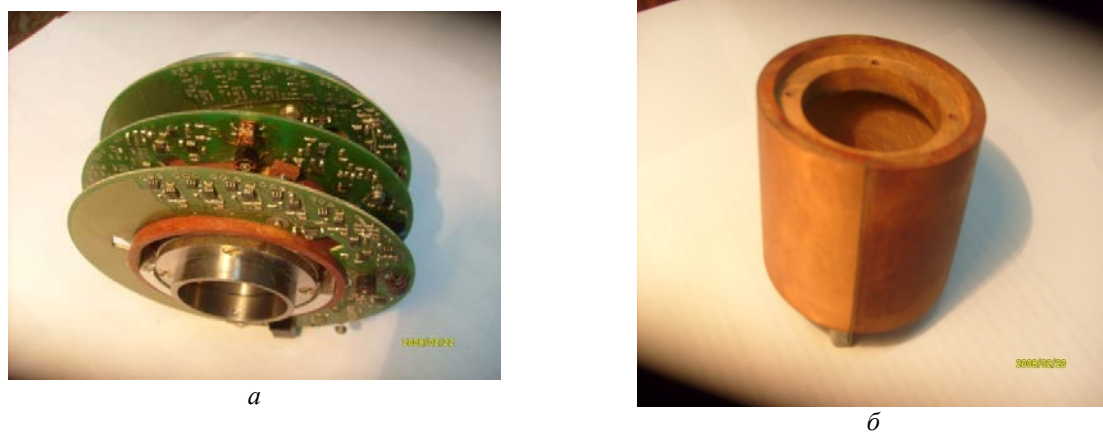


Рис. 10. Датчик угловых перемещений повышенной надёжности (а) и его ротор (б)

На рис. 10 представлена конструкция датчика угловых перемещений  $0 \dots 120$  градусов повышенной надёжности (вероятность безотказной работы 0,997 за время работы 5 лет), которая достигается за счёт трёх идентичных параллельно работающих измерительных каналов [6]. ЧЭ датчика выполнен на гибкой фольгированной пленке (рис. 7 в) толщиной 0,1 мм

(толщина металла 0,35 мм). В качестве экрана используется медная лента толщиной 0,5 мм на цилиндрическом роторе из прессматериала АГ-4В (рис. 9 б). Датчик может найти применение в системе управления приводом солнечных батарей.

Основой измерителя крутящего момента (ИКМ) является датчик малых угловых перемещений, с помощью которого

измеряется угловое скручивание торсионного вала (упругого элемента). Угол скрутки торсионного вала однозначно определяет величину крутящего момента.

Для измерения крутящего момента вращающегося вала используется система из наружного и внутреннего полых цилиндрических экранов, каждый из которых механически соединён с одним из концов торсионного вала. Экраны имеют один или два ряда перфорированных окон, причём ряды окон внутреннего экрана расположены в одних сечениях с рядами окон наружного экрана. Каждый из рядов охватывается соответствующим ЧЭ, расположенным на неподвижном цилиндрическом каркасе. При отсутствии крутящего момента окна внутреннего экрана перекрыты наполовину окнами наружного экрана. Скрутка вала изменяет взаимное угловое положение экранов, что ведёт к увеличению или уменьшению площади перекрытия окон и, следовательно, к изменению индуктивностей ЧЭ.

На рис. 11 представлены различные варианты ИКМ. Датчики рис. 11 а, б предназначены для измерения крутящих моментов вращающихся валов. Вариант рис. 11 в предназначен для измерения крутящего момента на колесе автомобиля, а в варианте рис. 11 г ИКМ встроен в электромеханический усилитель руля автомобиля.

В заключение необходимо отметить, что точность приведённых ОВТД меняется в широких пределах и зависит, во-первых, от конструктивного исполнения, технологии изготовления и используемых материалов, а во-вторых, от назначения и связанных с ним влиянием внешних факторов (температуры в зоне установки датчика, состава среды, наличия электромагнитных полей, вибраций и др.) В табл. 1 приведены обобщённые показатели точности для некоторых групп ОВТД.



а



б



в



г

Рис. 11. Измерители крутящего момента: ИКМ 500 (а), ИКМ 90 (б), ИКМ 100 (в), ИКМ, встроенный в электромеханический усилитель руля (г)

Таблица 1. Обобщённые показатели точности ОВТД

Назначение ОВТД	Характеристики среды	Приведенная погрешность, %
Измерения угловых перемещений	Температура -50... +50°C	0,1...0,5%
Измерения крутящего момента	Температура -50... +50°C	0,5...1%
Измерения на лопаточных венцах компрессоров и турбин (радиальные зазоры, осевые смещения, биения и др.)	Температура до 1000°C. Среда - сжатый газ, частицы пыли, продукты горения топлива и др.	Компрессор – до 5% Турбина – до 10 %

### Библиографический список

1. Герасимов, В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля [Текст] / В.Г. Герасимов, В.В. Ключев, В.Е. Шатерников; под ред. В.Е. Шатерникова. - М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 256 с.

2. Ландау, Л.Д. Теория поля [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – 512 с.

3. Провода обмоточные с эмалевой и стекловолнистой изоляцией [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.mitsar.ru/catalog/katalog/kabeljn-o-provodnikovaya-produktsiya/provoda-obmotochnye-i-emalj-provoda/petv/>

4. Секисов, Ю.Н. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок [Текст] / Ю.Н. Секисов, О.П. Скобе-

лев, Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик [и др.]; под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. – 188 с.

5. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях [Текст] / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов [и др.]; под общ. ред. О.П. Скобелева – М.: Машиностроение, 2011. – 298 с.

6. Создание нового поколения электромеханических приводов трансформируемых систем космических аппаратов [Текст] / В.П. Еремин, Н.В. Еремин, А.Н. Кирилин [и др.]; под научной редакцией А.Н. Кирилина, В.П. Еремина. – Самара: ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2011. - 520 с.

## SINGLE-COIL EDDY-CURRENT TRANSDUCERS FOR MEASURING MECHANICAL PARAMETERS

© 2013 S. Yu. Borovik, Yu. N. Sekisov

Institute for the Control of Complex Systems  
of Russian Academy of Sciences, Samara

Eddy-current transducers with single-coil sensitive elements are discussed in the paper. Embodiment modifications are presented and examples of using the transducers for measuring mechanical parameters are demonstrated.

*Eddy-current transducer, eddy-current single-coil sensor, mechanical parameters, measuring, examples of application.*



### **Информация об авторах**

**Боровик Сергей Юрьевич**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, заместитель директора по научной работе, Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук. E-mail: [borovik@iccs.ru](mailto:borovik@iccs.ru). Область научных интересов: информационно-измерительные и управляющие системы, интеллектуальные датчики и системы измерений, нечеткая логика.

**Секисов Юрий Николаевич**, доктор технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук. E-mail: [sekisov@iccs.ru](mailto:sekisov@iccs.ru). Область научных интересов: датчики, измерительные преобразователи, информационно-измерительные и управляющие системы.

**Borovik Sergey Yurievich**, doctor of technical science, leading research associate, deputy director for research, Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences (ICCS RAS). E-mail: [borovik@iccs.ru](mailto:borovik@iccs.ru). Area of research: information-measuring and control systems, smart sensors and intelligent systems, fuzzy logic.

**Sekisov Yuriy Nikolaevich**, doctor of technical science, head of laboratory, Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences (ICCS RAS). E-mail: [sekisov@iccs.ru](mailto:sekisov@iccs.ru). Area of research: sensors, measuring transducers, information-measuring and control systems.