

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАДИАЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТИЦЫ НА ПАРАМЕТРЫ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

© 2016

**С. А. Гудков** ассистент кафедры радиотехники, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, [gudkov.stanislav@gmail.com](mailto:gudkov.stanislav@gmail.com)

**И. А. Кудрявцев** кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных и биотехнических систем, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, [rtf@ssau.ru](mailto:rtf@ssau.ru)

В статье исследованы особенности применения вихретоковых преобразователей (ВТП) для контроля параметров дисперсных сред. В среде Ansys Maxwell 2015 построена трёхмерная конечно-элементная модель системы «частица – ВТП», для которой выполнен анализ влияния радиальных смещений частиц износа в поперечном сечении ВТП на суперкомпьютере «Сергей Королёв». Установлено, что вследствие неравномерности электромагнитного поля ВТП смещение частиц от оси ВТП к периферии приводит к увеличению вносимых параметров до трёх раз. При этом величина изменения вносимых параметров зависит главным образом от геометрического положения частиц в плоскости сечения ВТП и слабо зависит от частоты возбуждающего поля и размера частиц. На основе установленных зависимостей предложена конструкция ВТП, позволяющая отстроиться от влияния радиального смещения частиц на выходной сигнал.

*Гидравлическая система; дисперсная система; вихретоковый преобразователь; обобщённый параметр; конечно-элементная модель; вносимый параметр.*

---

*Цитирование:* Гудков С.А., Кудрявцев И.А. Анализ влияния радиального смещения частицы на параметры вихретокового преобразователя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 163-169. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-163-169

### Введение

Современное развитие авиационной и космической техники связано с увеличением ресурса и повышением надёжности гидравлических систем технических объектов и изделий в целом. Обеспечение растущих требований к надёжности гидравлических систем требует контроля их технического состояния, в особенности агрегатов, содержащих узлы трения [1]. Перспективным методом диагностики жидкостных систем является вихретоковый метод (ВТМ) контроля параметров частиц износа. ВТМ может быть использован для анализа степени загрязнения рабочей жидкости частицами из проводящих материалов, для оценки процесса приработки отдельных механических узлов, а также процесса разрушения узлов при условии существенного различия электромагнитных свойств материалов этих узлов [2].

Принцип действия ВТМ основан на регистрации возмущений электромагнитного поля вихретокового преобразователя (ВТП) проходного типа при прохождении через него диэлектрической жидкости с частицами износа и загрязнений. ВТМ – многопараметрический метод, поскольку на выходной сигнал ВТП оказывают влияние множество различных факторов. В дальнейшем факторы, влияние которых на выходной сигнал ВТП существенно, но оценить параметры которых при измерении сложно, будем называть мешающими. Для корректного применения ВТМ при контроле параметров дисперсных сред необходимо учитывать влияние всех мешающих факторов. Радиальное смещение частиц относится к одному из значимых мешающих факторов.

В общем случае решение задачи анализа параметров ВТП требует исследования вторичных электромагнитных полей локальных электропроводящих тел различных размеров и формы.

Математически указанная проблема формулируется в виде краевых задач электродинамики, решаемых с той или иной степенью точности методами математической физики. В настоящее время признанным универсальным средством моделирования электромагнитных полей является метод конечных элементов (МКЭ) [3]. Основными достоинствами этого метода являются возможность моделирования объектов со сложными поверхностями, построение неравномерных сеток, сгущающихся и разрежающихся в зависимости от требуемой детализации области, а также возможность задавать неоднородные свойства материалов.

Целью работы является установление степени влияния радиального смещения частицы на вносимые параметры, а также разработка методов отстройки от влияния данного фактора.

### **Анализ конечно-элементной модели «ВТП-частица износа»**

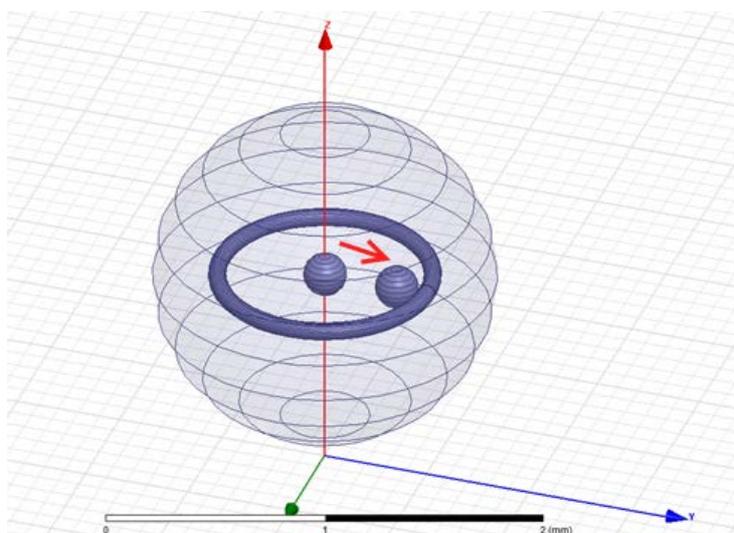
Для анализа влияния радиального смещения частицы на параметры ВТП в среде конечно-элементного моделирования динамических электромагнитных полей Ansys Maxwell 2015 построена конечно-элементная модель системы «ВТП – частица». В качестве модели параметрического ВТП рассматривается виток с током.

Оптимизация сетки конечных элементов и поиск решения модели производились на суперкомпьютере «Сергей Королёв». Параметры модели приведены в табл. 1.

Численный полевой анализ системы «виток с током – смещённая частица» необходимо проводить в трёхмерной постановке задачи (рис. 1, стрелкой отмечено направление смещения частицы износа) ввиду отсутствия осевой симметрии в модели.

Таблица 1. Параметры модели «ВТП – частица износа»

	Относительная магнитная проницаемость ( $\mu$ )	Диаметр, мкм	Электрическая проводимость, МСм/м	Ток, мА
Немагнитная частица	1	200	0,58	0
Магнитная частица	60	200	0,58	0
Виток	1	1000	0,58	10



*Рис. 1. Радиальное смещение частицы*

На рис. 2 приведено распределение модуля магнитного поля ВТП вдоль радиуса датчика, при этом расстояние равное 0 мкм соответствует оси ВТП, а 500 мкм – радиусу ВТП. Видно, что модуль индукции магнитного поля на периферии ВТП вблизи проводника с током выше, чем на оси. При этом в количественном отношении для рассматриваемого одновиткового преобразователя разница достигает пяти раз. Очевидно, что смещение частицы в области с более высокой величиной индукции приведёт к увеличению амплитуды вихревых токов, наводимых в частице, и к росту величины вносимых в ВТП параметров. Рассматриваемый эффект будет оказывать большее влияние на оценку параметров частиц с большим диаметром, т.к. согласно [1] крупные частицы могут двигаться вплотную к стенке канала в области наибольшей нелинейности индукции магнитного поля.

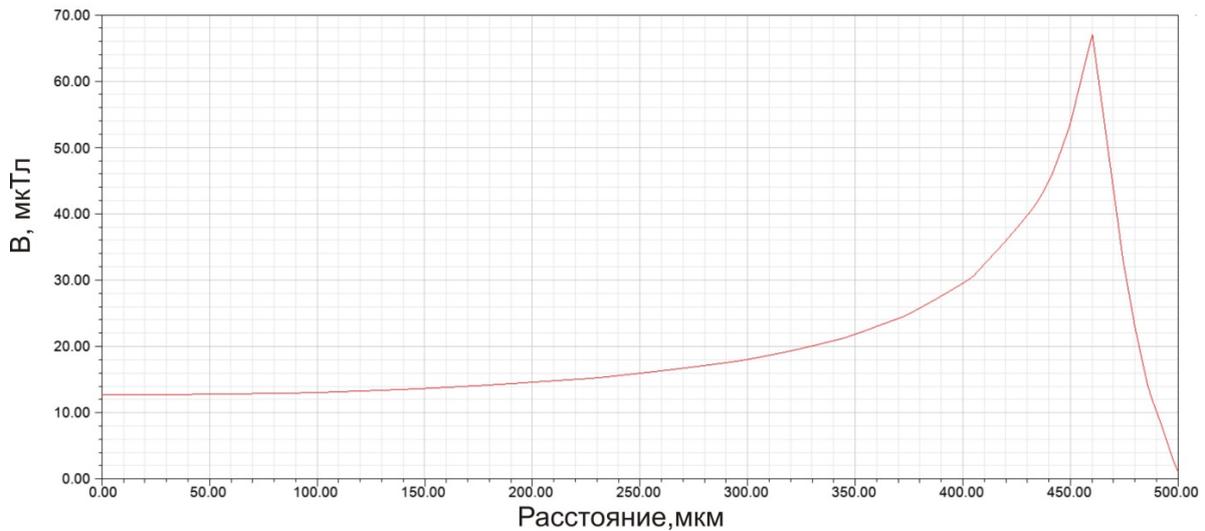


Рис. 2. Изменение модуля индукции магнитного поля вдоль радиуса ВТП

Для обобщения результатов исследования ВТП вводятся следующие параметры [4]:

$$\beta = R\sqrt{\omega\mu_0\sigma}; \quad \chi = \frac{r}{R}; \quad \alpha = \frac{h}{R}; \quad \gamma = \frac{x}{R},$$

где  $R$  – радиус ВТП, м;  $\omega$  – круговая частота тока возбуждения ВТП, рад/с;  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость, См/м;  $r$  – радиус частицы, м;  $h$  – расстояние между центром масс частицы и плоскостью ВТП, м;  $x$  – расстояние между центром масс частицы и осью ВТП, м.

На рис. 3, а приведены годографы относительного вносимого сопротивления в параметрический одновитковый ВТП для  $\chi = 0,2$ ,  $\alpha = 0$  и различных значений  $\gamma$ ,  $\beta$  и относительной магнитной проницаемости  $\mu$ . По приведённым годографам можно оценить влияние радиального смещения немагнитной частицы на значение относительного вносимого сопротивления.

При  $\gamma = 0$  частица находится на оси ВТП, при  $\gamma = 0,7$  – вблизи границы ВТП. При этом величина активной части вносимого сопротивления возрастает в 2,8 раза, реактивной – в 2,5 раза.

Годографы относительного вносимого сопротивления для магнитной частицы с  $\mu = 60$  приведены на рис. 3, б. При смещении частицы величина активной и реактивной частей вносимого сопротивления возрастает в 3,2 раза.

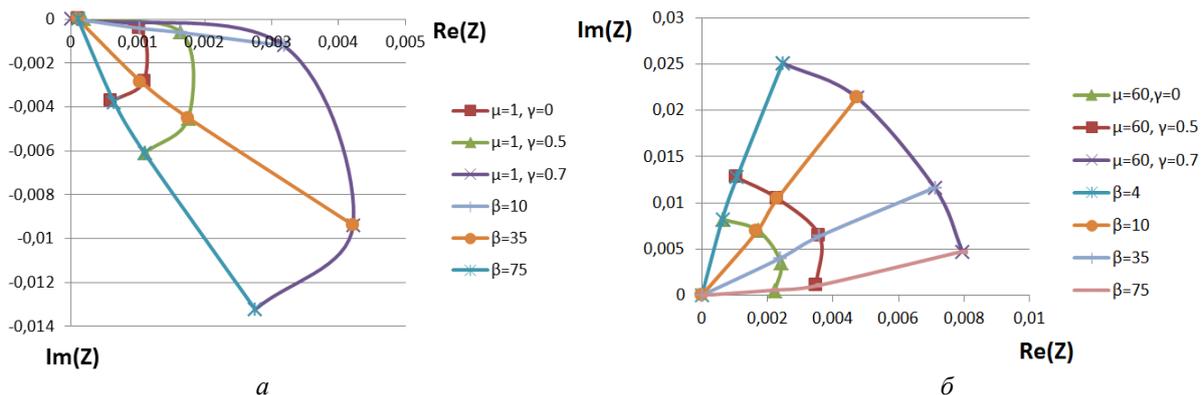


Рис. 3. Годографы вносимого сопротивления для немагнитной (а) и магнитной (б) частицы износа

Индукция магнитного поля по сечению ВТП меняется нелинейно (рис. 2), вследствие этого и величина относительного вносимого сопротивления при радиальном смещении частицы изменяется нелинейно. На рис. 4, а показана действительная часть относительного вносимого сопротивления для магнитной и немагнитной частиц, нормированная к положению  $\gamma = 0$ .

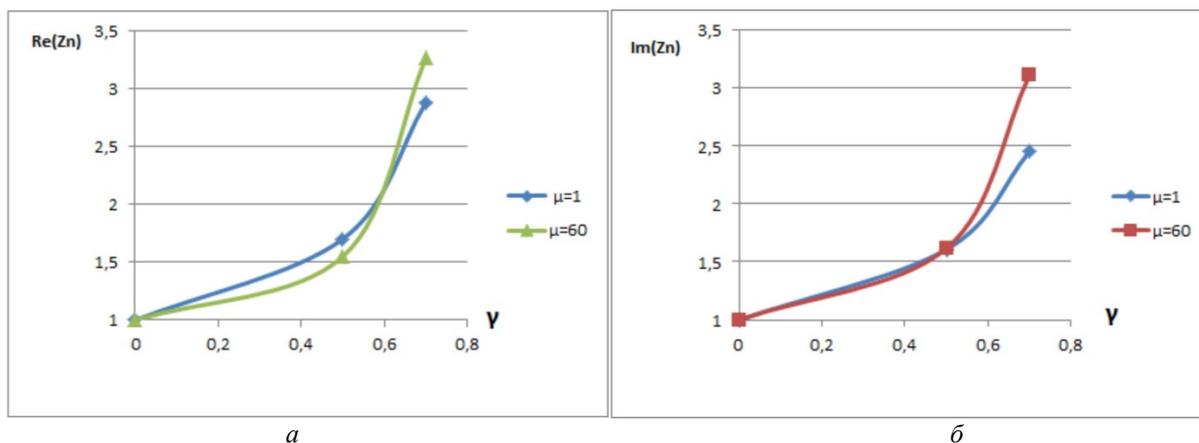


Рис. 4. Относительное изменение действительной части (а) и мнимой части (б) вносимого сопротивления

Из рис. 4 видно, что общий характер изменения величины вносимого сопротивления не зависит от магнитной проницаемости материала частицы и определяется, главным образом, координатой прохождения чувствительного объема ВТП.

Таким образом, радиальное смещение частицы является существенным мешающим фактором.

Отстройка от влияния радиального смещения частиц на сигнал ВТП в проходном датчике возможна за счёт формы канала датчика. В [1] показано, что вероятность пролёта частицы через данную точку объёма пропорциональна скорости течения жидкости-носителя. Таким образом, профиль скорости течения рабочей жидкости определяет двумерную плотность распределения вероятности координаты пролёта частицы в сечении канала проходного ВТП.

В ВТП с цилиндрическим каналом профиль скоростей жидкости определяется выражением [5]:

$$v(r) = \frac{2Q}{\pi a^4} (a^2 - r^2), \quad (1)$$

где  $Q$  – объёмный расход сквозь сечение ВТП, м<sup>3</sup>/с;  $a$  – радиус канала, м.

Нормируя выражение (1), получим двухмерную плотность распределения вероятности координаты пролёта частицы:

$$x(r) = \frac{v(r)}{\max(v(r))}.$$

Следующее выражение определяет процент частиц от общего количества, проходящих в диапазоне координат  $-\gamma \dots \gamma$ :

$$N = \frac{\int_{-\gamma}^{\gamma} x(r) dr}{\int_{-a}^a x(r) dr}. \quad (2)$$

В соответствии с выражением (2) через ВТП с цилиндрическим каналом радиусом  $a = 0,5$  мм до 60% частиц проходит по траектории с  $-0,4 < \gamma < 0,4$ , что приводит к росту вносимых параметров не более чем на 40%.

Альтернативным способом отстройки от влияния радиального смещения является применение трансформаторных ВТП с двумя разнесёнными возбуждающими обмотками, расстояние между которыми примерно равно среднему диаметру поперечного сечения обмотки.

При такой конфигурации обмоток существенно возрастает однородность магнитного поля в чувствительном объёме датчика (рис. 5).

Принимая диаметр ВТП равным 0,8 мм, с учётом распределения индукции в сечении ВТП (рис. 5) получаем, что изменение индукции магнитного поля в пределах диаметра канала ВТП (0,1...0,9 мм) происходит не более чем в 1,35 раза. При этом через ВТП с цилиндрическим каналом до 80% частиц проходит по траектории с  $\gamma < 0,5$ , что приводит к росту вносимых параметров не более чем на 15%.

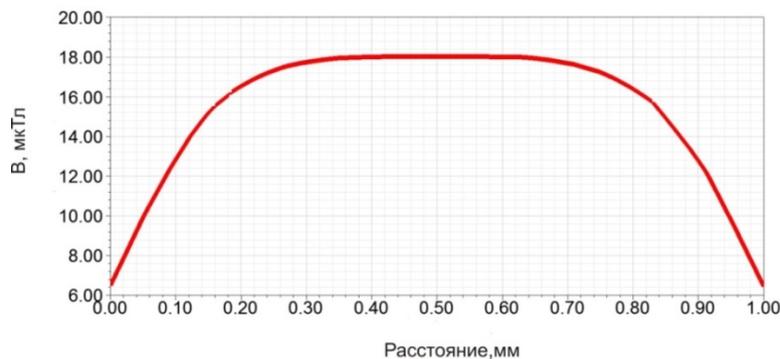


Рис. 5. Распределение индукции магнитного поля в поперечном сечении ВТП

### Заключение

Установлено, что радиальное смещение частиц при контроле параметров дисперсных сред с помощью ВТМ является значительным мешающим фактором. На основе анализа конечно-элементной модели «ВТП – частица» установлено, что рост величины вносимых параметров за счёт радиального смещения частицы может достигать 3,2 раз по отношению к положению частицы на оси ВТП. Показано, что для

отстройки от влияния радиального смещения на величину вносимых параметров целесообразно применение ВТП проходного типа с разнесёнными возбуждающими обмотками. При этом формируется однородное магнитное поле в чувствительном объёме датчика, что позволяет обеспечить разброс выходных параметров ВТП в пределах 15%.

### **Библиографический список**

1. Кудрявцев И.А. Повышение разрешающей способности и чувствительности фотоэлектрических преобразователей встроенного контроля параметров дисперсной фазы для систем управления. Автореф. дис. канд. техн. наук. Самара, 1999. 22 с.
2. Логвинов Л.М. Анализ и синтез преобразователей концентрации дисперсной фазы для систем управления и контроля технического состояния изделий авиационной техники. Дис. доктора техн. наук. Самара, 1995. 283 с.
3. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электротехников. М.: Мир, 1986. 229 с.
4. Гудков С.А., Кудрявцев И.А. Анализ системы «вихретоковый датчик – электропроводящая частица» методом конечных элементов // Датчики и системы. 2012. № 2. С. 8-12.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. М.: Дрофа, 2003. 840 с.

## **ANALISYS OF THE INFLUENCE OF RADIAL DISPLACEMENT OF A PARTICLE ON THE PARAMETERS OF AN EDDY-CURRENT PROBE**

© 2016

**S. A. Gudkov** Assistant Professor of the Radio Engineering Department, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, [gudkov.stanislav@gmail.com](mailto:gudkov.stanislav@gmail.com)

**I. A. Kudryavtsev** Candidate of Science, Assistant Professor of the Department of Laser and Bioengineering Systems, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, [rtf@ssau.ru](mailto:rtf@ssau.ru)

The article focuses on the study of the specific application of eddy-current probes (ECP) to monitor the parameters of dispersed media. To do this, a three-dimensional finite element model of the «wear particles – ECP» was constructed in Ansys Maxwell 2015. The analysis of the the radial displacement of particles in the cross section of ECP with the help of the «Sergei Korolyov» supercomputer was carried out. It was found that the non-uniformity of electromagnetic field displacement of a particle from the axis to the periphery of the ECP results in three-fold increase of the insertion parameter. The deviation of the insertion parameters depends mainly on the geometrical position of the particle in the sectional plane of the sensor and it is weakly dependent on the frequency of the exciting field and particle size. On the basis of the established dependency we propose an ECP structure that allows mitigating the influence of the radial displacement of particles on the output signal of the ECP.

*Aeronautical engineering; hydraulic system; dispersion; eddy-current probe; finite-element model; insertion parameter; generalized parameter.*

---

*Citation:* Gudkov S.A., Kudryavtsev I.A. Analisis of the influence of radial displacement of a particle on the parameters of an eddy-current probe. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 163-169. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-163-169

### References

1. Kudryavtsev I.A. *Povyshenie razreshayushchey sposobnosti i chuvstvitel'nosti fotoelektricheskikh preobrazovateley vstroennogo kontrolya parametrov dispersnoy fazy dlya sistem upravleniya*. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Increasing the resolution and sensitivity of photoelectric converters of built-in control of dispersed phase parameters for control systems. Extended abstract of Cand. Sci. (Eng.) Diss.]. Samara, 1999. 22 p.
2. Logvinov L.M. *Analiz i sintez preobrazovateley kontsentratsii dispersnoy fazy dlya sistem upravleniya i kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya izdeliy aviatsionnoy tekhniki*. Diss. doktora tekhn.nauk [Analysis and synthesis of dispersed phase concentration converters for control systems and control of the technical condition of aerospace products. Dr. Sci. (Eng.) Diss.]. Samara, 1995. 283 p.
3. Sylvester P., Ferrari R. *The finite element method for radio engineers and electrical engineers*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1983. 228 p.
4. Gudkov S.A., Kudryavtsev I.A. Finite element analysis of eddy current probe // *Sensors and Systems*. 2012. No. 2. P. 8-12. (In Russ.)
5. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics: Textbook for higher education institutions]. Moscow: Drofa Publ., 2003. 840 p.