

В.Д. Коренев, Я. В. Крикун

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
кафедра электронной техники
E-mail: zori@kita.dgtu.donetsk.ua

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КВАЗИСФЕРИЧЕСКОГО МГД-ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ

Аннотация

Коренев В.Д., Крикун Я.В. Повышение точности квазисферического МГД-измерителя скорости потока жидкости. Рассмотрен вопрос повышения точности МГД измерителя пульсаций скорости потока жидкости за счет уменьшения влияния синфазных помех промышленных частот. Выполнен анализ зависимости чувствительности измерителя от конструктивных параметров преобразователя. Определены расстояния между электродами преобразователя, обеспечивающие равные чувствительности измерителя по продольной и поперечной составляющим скорости. Полученные результаты могут быть применены в разработках МГД-измерителей турбулентных пульсаций скорости для исследования структуры потоков слабо проводящих жидкостей.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, точность измерения, скорость потока, помеха, чувствительность, турбулентность.

Общая постановка проблемы.

В натуральных исследованиях турбулентности русловых потоков, гидротехнических сооружений и открытых водоемов используются магнитогидродинамические измерители (МГД-измерители), определяющие скорость (или пульсации скорости) потока по значению разности потенциалов электрического поля, индуцируемого в жидкости, движущейся в поле рассеяния магнитной системы МГД-преобразователя скорости. Широко применяются МГД-преобразователи с двухполюсной магнитной системой, заключённой в обтекатель в форме хорошо обтекаемого тела вращения с эллипсоидальным носовым обводом, вследствие их высоких эксплуатационных и метрологических характеристик. Они обладают хорошей чувствительностью (порядка нескольких мкВ/мм/с), достаточной механической прочностью, могут эксплуатироваться в потоках агрессивных жидкостей, имеют линейную характеристику преобразования, не зависящую от физико-химических свойств жидкости, низкий уровень собственных гидродинамических шумов. Такой преобразователь позволяет измерять одновременно две составляющие вектора пульсаций скорости исследуемого потока: продольную и поперечную, лежащую в плоскости симметрии его магнитной системы. При этом продольная составляющая пропорциональна разности потенциалов, воспринимаемых чувствительными электродами преобразователя в исследуемом потоке, а поперечная - их сумме [1, 2, 3].

Электрические потенциалы, индуцируемые в рабочей области МГД-преобразователя измеряемыми составляющими пульсаций скорости исследуемого потока жидкости и воспринимаемые его чувствительными электродами, малы по уровню (от нескольких мкВ). Поэтому в устройствах вычитания (канале измерения продольной составляющей) и суммирования (канале измерения поперечной составляющей) электродных потенциалов, где происходит формирование сигналов измеряемых составляющих скорости, обязательно применение специальных мер подавления помех промышленных частот (синфазных помех), поступающих на входы каналов с электродов преобразователя, обусловленных работой промышленного оборудования и имеющих уровень, превосходящий полезный сигнал. В канале измерения

продольной составляющей скорости их подавление обеспечивает измерительный усилитель, имеющий дифференциальный (разностный) входной каскад с высоким коэффициентом ослабления синфазного сигнала (КОСС). Он выполняет одновременно две функции: вычитания потенциалов чувствительных электродов преобразователя и подавления синфазной помехи, поступающей на вход канала.

Суммирование электрических потенциалов, индуцируемых в потоке и воспринимаемых чувствительными электродами преобразователя, на первых этапах разработки схемы измерителя выполнялось посредством суммирующего усилителя, который не подавляет синфазную помеху. Поэтому актуальна замена сумматора в канале измерения поперечной составляющей дифференциальным усилителем, нечувствительным к синфазным помехам.

Измерение составляющих вектора пульсаций скорости потока трехэлектродным преобразователем.

На рисунке 1 показана конструкция квазисферического МГД-преобразователя пульсаций скорости потока проводящей жидкости. Потенциальное электрическое поле, содержащее информацию о скорости потока, формируется в жидкости в окрестности эллипсоидального (квазисферического) носового обвода преобразователя в поле рассеивания его двухполюсной рогообразной магнитной системы 1, заключённой в электроизоляционный обтекатель 2 в форме хорошо обтекаемого тела вращения. В исследуемом потоке преобразователь ориентируется продольной осью OZ вдоль направления вектора скорости осредненного течения, набегающего на носовой обвод. Наличие поперечного зазора 3 магнитной системы обеспечивает “выдув” магнитного поля \vec{B} в рабочую зону преобразователя – примыкающую к носовому обводу область исследуемого течения. Съём потенциалов электрического поля, индуцируемого в потоке исследуемой жидкости, движущейся в магнитном поле преобразователя, осуществляется посредством трех чувствительных электродов E_0 , E_1 и E_2 , расположенных симметрично в зазоре магнитной системы и торцами выходящих на поверхность обтекателя в носовой части (центральный электрод E_0 соединяется с «общей точкой» схемы, которая надежно заземляется, что повышает помехоустойчивость измерителя).

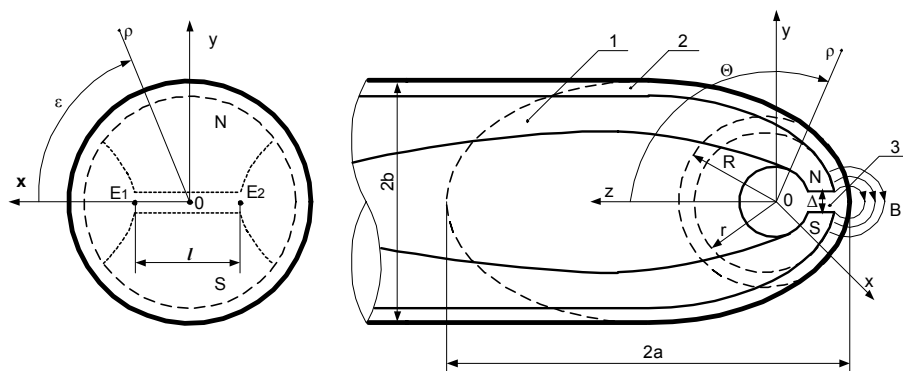


Рисунок 1 – Конструкция МГД-преобразователя пульсаций скорости.

Преобразователь, позволяет измерять одновременно две составляющие вектора пульсаций скорости потока – продольную V'_z и поперечную V'_x , лежащие в плоскости симметрии магнитной системы XOZ [1, 3]. При этом выходной сигнал канала измерения продольной составляющей скорости определяется разностью потенциалов электродов E_1 и E_2 и пропорционален мгновенному значению продольной составляющей скорости $V'_z = [\varphi(E_1) - \varphi(E_2)]/S_u$, где S_u – чувствительность измерителя по продольной составляющей (канала измерения продольной составляющей). Значение поперечной составляющей скорости определяется: $V'_x = [\varphi(E_1) + \varphi(E_2)]/S_v$, где S_v – чувствительность измерителя по поперечной составляющей (канала измерения поперечной составляющей). Для измерения второй поперечной составляющей скорости V'_y надо повернуть преобразователь вокруг продольной оси на 90 °.

Постановка задачи исследований.

В результате функционирования различных электрических устройств (электрических станций, линий электропередач, электрических машин и т.п.) наблюдается протекание токов промышленных частот различного происхождения в почве и водоемах. Кроме того, эти же устройства порождают в окружающем пространстве (в том числе – и в исследуемом потоке жидкости) переменные электромагнитные поля. В совокупности указанные поля и токи наводят в цепи чувствительных электродов МГД преобразователя паразитные сигналы, значительно превышающие полезный скоростной сигнал и не связанные с измеряемой скоростью, - помехи промышленных частот. Учитывая, что длина волны даже самой высокочастотной помехи значительно (на несколько порядков) превышает расстояние между чувствительными электродами преобразователя (≈ 10 мм), можно считать такую помеху синфазной.

Измерение скорости (или пульсаций скорости) потока проводящей жидкости электромагнитным методом традиционно основывается на измерении **разности потенциалов** электрического поля, индуцируемого в жидкости, движущейся в магнитном поле преобразователя. Уже на ранних стадиях развития электромагнитного метода измерения скорости для борьбы с синфазными помехами промышленных частот применялся дифференциальный способ измерения индуцируемой в движущейся жидкости **разности потенциалов** посредством трех чувствительных электродов, размещаемых в потоке в рабочей области преобразователя. При этом средний (центральный) электрод E_0 подключается к «общей точке», а крайние электроды E_1 и E_2 – к информационным входам измерительного усилителя, на выходе которого формируется сигнал, пропорциональный разности потенциалов $[\varphi(E_1) - \varphi(E_2)]$. Таким способом достигается ослабление синфазной составляющей входного сигнала измерителя на уровне (120...140) дБ, что обеспечивает ничтожно малое значение синфазной составляющей инструментальной погрешности измерителя.

Таким образом, получение разности потенциалов - $[\varphi(E_1) - \varphi(E_2)]$ - в канале измерения продольной составляющей скорости и одновременное подавление синфазной помехи на выходе канала не представляет особой сложности. Это достигается подключением электродов E_1 и E_2 преобразователя к инструментальному усилителю с дифференциальным входным каскадом и высоким КОСС. Усилитель также должен иметь высокое входное сопротивление ($R_{вх\delta} \geq 20$ Мом по каждому входу) и низкий уровень собственного шума (приведенный ко входу шум не должен превышать 0,5 мкВ в полосе частот от 0,1 до 100 Гц). Во входном каскаде инструментального усилителя хорошо зарекомендовали себя подобранные пары полевых транзисторов КПС 104А. Использование ОУПТ общего применения неоправданно по понятным причинам.

Сумму потенциалов измерительных электродов E_1 и E_2 преобразователя измерить непосредственно нельзя. Поэтому в канале измерения поперечной составляющей скорости была использована схема, приведенная на рисунке 2.

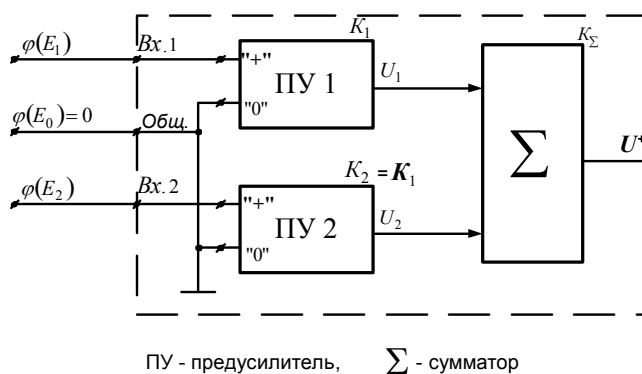


Рисунок 2 – Схема измерения суммы потенциалов электродов

В этой схеме на вход каждого низкошумящего предварительного усилителя «ПУ 1» и «ПУ 2» поступает разность потенциалов соответствующего измерительного электрода (E_1 или E_2) и заземленного электрода E_0 . Неинвертирующие ПУ реализованы на основе схемотехники инструментального усилителя канала измерения продольной составляющей путем охвата глубокой отрицательной обратной связью по инвертирующему входу. Поэтому по входному сопротивлению и шумовым свойствам они полностью соответствуют предъявляемым требованиям. Сигнал, пропорциональный сумме потенциалов электродов $[\varphi(E_1) + \varphi(E_2)]$, формируется на выходе сумматора выходных сигналов «ПУ 1» и «ПУ 2». Основным недостатком приведенной схемы – незащищенность от действия синфазных помех [1, 2], для снижения уровня которых необходимо ограничить сверху полосу пропускания канала (<50 Гц).

Таким образом, дальнейшее совершенствование измерителя должно включать меры по минимизации влияния синфазных помех промышленных частот на результат измерения не только продольной, но и поперечной составляющей скорости. Желательно при этом сохранить ортогональные свойства преобразователя и предусмотреть возможность адаптации к условиям задачи измерения чувствительностей по измеряемым составляющим скорости.

Решение поставленной задачи. Результаты исследований.

Анализ показал, что преобразователь с тремя электродами невозможно подключить к схеме измерения таким образом, чтобы непосредственно получить сумму потенциалов измерительных электродов исходя только из дифференциального включения измерительных усилителей. Поэтому в преобразователе потребовалось добавить два чувствительных электрода и применить иную схему измерения суммы потенциалов электродов. На рисунке 3 изображен квазисферический двухполосный преобразователь (показано сечение преобразователя плоскостью, проходящей через чувствительные электроды), содержащий две пары чувствительных электродов, и схема подключения электродов к предложенной схеме измерения суммы (и разности потенциалов – пунктиром) электродов.

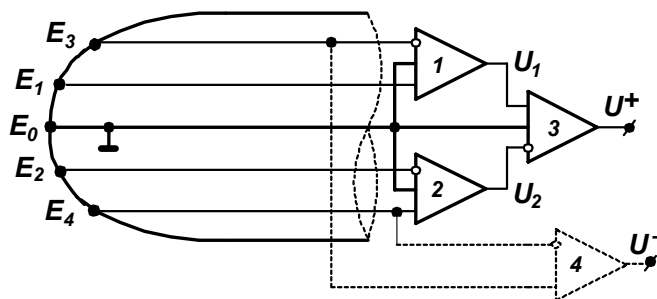


Рисунок 3 – Схема измерения суммы (U^+) и разности (U^-) потенциалов электродов преобразователя на основе дифференциальных измерительных усилителей

Для приведенной схемы:

$$U_1 = \varphi_1 - \varphi_3; \quad U_2 = \varphi_4 - \varphi_2; \quad U^- = \varphi_3 - \varphi_4;$$

$$U^+ = U_1 - U_2 = (\varphi_1 + \varphi_2) - (\varphi_3 + \varphi_4).$$

Таким образом, выходные напряжения схемы U^+ и U^- , пропорциональные сумме и разности потенциалов чувствительных электродов преобразователя, формируется исключительно дифференциальными измерительными усилителями, выполняющими и функцию подавления синфазной помехи.

Из последнего уравнения следует, что для получения высокой чувствительности измерителя к поперечной составляющей скорости надо одновременно иметь максимальное значение суммы потенциалов электродов E_1 и E_2 и минимальное значение суммы потенциалов E_3 и E_4 .

Нижче показано, що запропонований спосіб виділення сигналу поперечної складової швидкості дозволяє вимірювати її з прогнозованою чутливістю S_v , яка визначається конструктивними параметрами преобразователя, і може бути адаптована к умовам задачі вимірювання.

С целью определения оптимальных значений конструктивных параметров преобразователя (в частности - расстояний между чувствительными электродами) выполнен компьютерный анализ зависимости чувствительности измерителя по продольной и поперечной составляющим скорости от конструктивных параметров преобразователя. Анализ выполнен в приближении осредненного течения с использованием сферической модели преобразователя, вписанной в его носовой обвод (см. рис. 1).

Исследованы преобразователи с разной эллипсностью носового обвода $1 \leq \alpha \leq 3$ ($\alpha = 2a/2b$), различным значением безразмерного межэлектродного расстояния $0 \leq l \leq 2$ ($l = \sqrt{E_1 E_2} / R$), безразмерной толщиной электроизоляционного покрытия $1 \leq \delta \leq 1,1$ ($\delta = R/r$) для магнитных систем с межполюсным зазором Δ , который изменялся от 2 до 8 мм.

На рисунке 4 приведены зависимости безразмерной (относительной) чувствительности МГД-измерителя от величины межэлектродного расстояния l преобразователя по продольной (а) и поперечной (б) составляющим скорости.

Безразмерная чувствительность (чувствительность измерителя единичного радиуса, приходящаяся на единицу магнитной индукции), как функция указанных конструктивных параметров преобразователя, рассчитывалась:

а) по продольной составляющей скорости -
$$S_{ou} = \frac{\varphi(E_1) - \varphi(E_2)}{V_z \cdot B_0 \cdot R};$$

б) по поперечной составляющей скорости -
$$S_{ov} = \frac{\varphi(E_1) + \varphi(E_2)}{V_x \cdot B_0 \cdot R}.$$

В приведенных выше выражениях:

$\sqrt{E_1 E_2}$ - расстояние между чувствительными электродами E_1 и E_2 ; R - радиус сферической модели преобразователя; r - радиус сферической модели магнитной системы преобразователя; B_0 - характерное значение индукции магнитного поля преобразователя (её значение в лобовой точке магнитной системы).

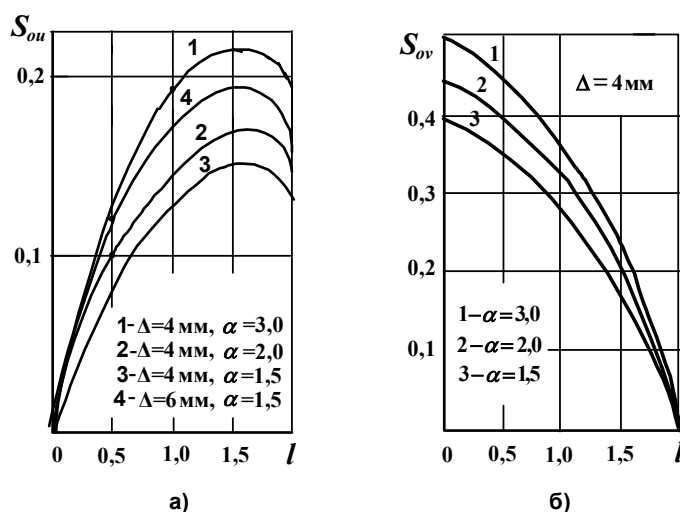


Рисунок 4 – Зависимости безразмерной чувствительности МГД-измерителя скорости от величины межэлектродного расстояния преобразователя:

а) по продольной составляющей; б) по поперечной составляющей.

На рисунке 5 приведены зависимости фактической (размерной) чувствительности МГД-измерителя скорости от величины межэлектродного расстояния l преобразователя при измерении продольной (а) и поперечной (б) составляющих.

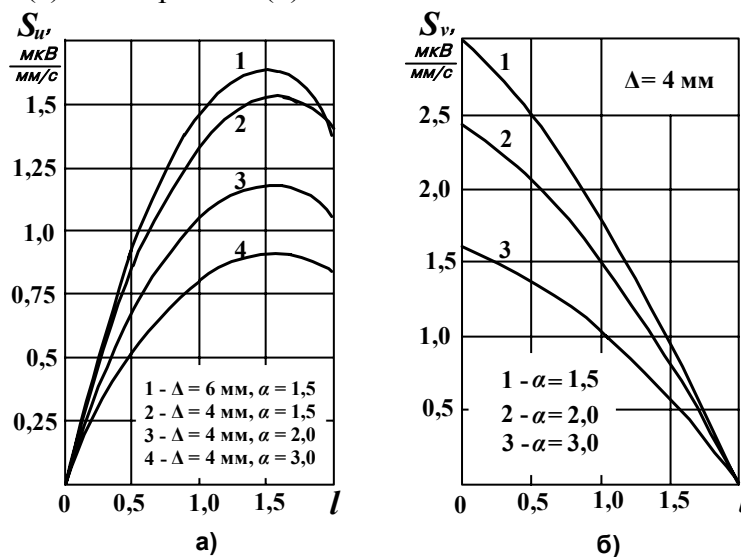


Рисунок 5 – Зависимости фактической (размерной) чувствительности МГД-измерителя скорости от величины межэлектродного расстояния преобразователя: а) по продольной составляющей; б) по поперечной составляющей.

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- чувствительности S_{ou} и S_{ov} существенно зависят от безразмерного межэлектродного расстояния преобразователя; чувствительность S_{ou} максимальна при $l \approx 1,6$ и $S_{ou} \rightarrow 0$ при $l \rightarrow 0$; чувствительность S_{ov} максимальна при $l \rightarrow 0$ и $S_{ov} \rightarrow 0$ при $l \rightarrow 2$;

- безразмерные чувствительности S_{ou} и S_{ov} зависят от степени эллипсности носового обвода преобразователя α и обе растут с увеличением α ; однако обе фактические (размерные) чувствительности $S_u = S_{ou} \cdot B_o \cdot R$ и $S_v = S_{ov} \cdot B_o \cdot R$ растут при уменьшении α и максимальны при $\alpha = 1$ (несмотря на рост относительной чувствительности с увеличением α , уменьшение характерного значения индукции магнитного поля B_o при этом приводит к снижению фактической чувствительности измерителя с ростом α);

- обе фактические чувствительности S_u и S_v максимальны при зазоре магнитной системы преобразователя ($4 < \Delta < 6$) мм и уменьшаются с увеличением толщины электроизоляционного покрытия преобразователя δ . Наконец зависимости, приведенные на рисунке 5, позволяют выбирать для преобразователя такие межэлектродные расстояния $l_1 = \sqrt{E_1 E_2}$ и $l_2 = \sqrt{E_3 E_4}$, которые обеспечивали бы нужное соотношение между чувствительностями измерителя по измеряемым составляющим скорости. Например определено, что преобразователь, характеризуемый такими конструктивными параметрами:

$$\Delta = 4 \text{ мм}, \delta = 1,02 \text{ и } \alpha = 1,5 \text{ (} 2b=50 \text{ мм, } r=20 \text{ мм),}$$

имеет примерно равные чувствительности по двум составляющим скорости ($S_u \approx S_v = 1,5$ мкВ/мм/с) при безразмерных расстояниях $l_1 = \sqrt{E_1 E_2} = 0,5$ и $l_2 = \sqrt{E_3 E_4} = 1,6$.

Выводы.

1. Предложен способ повышения точности квазисферического МГД-измерителя двух составляющих вектора пульсаций скорости потока проводящей жидкости путем доработки

преобразователя и схемы электронного устройства канала измерения поперечной составляющей скорости; при реализации способа обеспечивается высокая степень подавления синфазной помехи в каналах измерения и продольной, и поперечной составляющих скорости.

2. Установлено, что изменение межэлектродных расстояний двух пар чувствительных электродов преобразователя дает возможность адаптировать чувствительности измерителя по измеряемым составляющим скорости к условиям задачи измерения. При этом, можно получать одинаковые чувствительности по продольной и поперечной составляющим скорости при сохранении максимального значения по первой, либо увеличивать чувствительность по поперечной составляющей в ущерб чувствительности по продольной.

Литература

1. Коренев В.Д. Разработка и исследование МГД-измерителей двух составляющих вектора пульсаций скорости потоков жидкости: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.11.01 / Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений – М., 1989. – 25 с.
2. Коренев В.Д. // К вопросу исследования характеристик магнитогидродинамических измерителей пульсаций скорости // Магнитная гидродинамика - 1991 - №4 – С. 127-128.
3. Зори А.А., Коренев В.Д. Исследование ортогональности МГД-измерителя пульсаций скорости //Материалы 2-го международного научно-технического семинара «Практика и перспективы развития индустриального партнерства». Донецк-Таганрог, 2000 г.- С. 105-113.

Abstract

Korenev V.D., Krikun Y.V. Increase of accuracy of spherical measuring MHD-device of speed of stream of liquid. The question of increase of exactness of the MHD measuring device of pulsations of speed of stream of liquid due to diminishment of influencing of direct hindrances of industrial frequencies is considered. The analysis of dependence of sensitiveness of measuring device from the structural parameters of transformer is executed. Distances between the electrodes of transformer are certain, providing equal to the sensitiveness of measuring device on the longitudinal and transversal constituents of speed. The got results can be applied in developments of measuring MYD-devices of speed for research of structure of turbulent streams.

Keywords: measuring transformer, accuracy of measuring, speed of stream, hindrance, sensitiveness, turbulence.

Анотація

Коренєв В.Д., Крикун Я.В. Підвищення точності квазісферичного МГД-вимірювача швидкості потоку рідини. Розглянуто питання підвищення точності МГД-вимірювача пульсацій швидкості потоку рідини за рахунок зменшення впливу синфазних завад промислових частот. Виконаний аналіз залежності чутливості вимірювача від конструктивних параметрів перетворювача. Визначені відстані між електродами перетворювача, що забезпечують рівні чутливості вимірювача з подовжньої і поперечної складових швидкості. Результати, що отримані в роботі, можуть бути застосовані в розробках МГД-вимірювачів турбулентних пульсацій швидкості для дослідження структури потоків рідини.

Ключові слова: вимірювальний перетворювач, точність вимірювання, швидкість потоку, завада, чутливість, турбулентність.

Здано в редакцію:
01.03.10р.

Рекомендовано до друку:
д.т.н, проф. Зорі А.А.