

Такой комплекс выведет проверки производственных процессов на совершенно иной уровень, покрыв львиную часть ручного труда, максимально исключая возможные ошибки, при этом существенно выигрывая по общей скорости работы.

Предполагается, что габариты стенда, форма, количество камер в каждом случае будут подбираться индивидуально под конкретную задачу. Это позволит, не создавая универсального решения и в то же время не перерабатывая программное ядро системы, эффективно решать широчайший класс задач каждого конкретного потребителя.

Отдельным направлением применения предлагаемой системы могут являться какие-то площадки, где сборка (и разборка) используется как вспомогательный и необходимый процесс. К примеру, это автосервисы, шиномонтажи и другие заведения подобного рода. При наличии достаточного количества созданных эталонов можно существенно упростить сам процесс сборки, снизить требования к персоналу. Особенно это будет актуально при использовании «ассистента» сборщика.

**Б.И. Резников**  
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»  
**А.В. Щенников**  
ФГБНУ «НИРФИ»

## МЕТОДИКА СОВРЕМЕННЫХ МОРСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

С точки зрения электродинамики море представляет собой проводящую среду, в которой развиты динамические процессы различных временных и пространственных масштабов, приводящие в присутствии геомагнитного поля к возникновению в морской воде электрических полей и токов [1]. В докладе в основном приведены сведения лишь по электрической компоненте поля, поскольку напряженность электрического поля имеет локальную связь с порождаемым ее полем скорости, т.е. более информативна в отличие от магнитной компоненты, которая всегда определяется интегральным эффектом от индуцируемых токов по всему пространству.

Решение задачи об индукции электромагнитных полей полем скорости  $V(x,y,z,t)$  произвольного вида получается из системы уравнений Максвелла с соответствующими граничными условиями. Учет баланса сил, действующих на заряд, движущийся в магнитном поле Земли  $F$ , со скоростью  $V$ , приводит к закону Ома для неоднородного участка цепи в дифференциальной форме:

$$\nabla\varphi = -E = V \times F - J\sigma \quad (1)$$

где

$\varphi$  – электростатический потенциал,  
 $E$  – напряженность электрического поля,  
 $J$  – плотность тока,  
 $V \times F$  – поле сторонней фарадеевской эдс.

Необходимо заметить, что при наличии прибора, обеспечивающего одновременные и независимые измерения напряженности электрического поля и плотности электрического тока, можно было бы вычислять поле  $V$  непосредственно по уравнению (1). Пока это технически не удается сделать, хотя принципиальных запретов не существует.

Точное решение задачи для одномерных течений имеет вид:

$$\Delta\phi = L V_y^* F_z ,$$

где

$$V_y^* = \frac{\int_0^H \sigma V_y dz}{\int_0^H \sigma dz} - \text{средняя взвешенная по электропроводности величина скорости.}$$

Достаточно часто в океанологии работает приближение «короткого замыкания» (бароклинные течения, поверхностные течения в глубоком море). Из уравнения (1) при этом имеем:  $J/\sigma = V \times F$ , а  $E = 0$ . Измерители напряженности (разности потенциалов) электрического поля окажутся бесполезными. Необходимую информацию можно получить только датчиками плотности тока.

Для измерения электрических полей в основном используется контактный способ измерений основанный на фиксации разности потенциалов  $\Delta\phi$  на некоторой базе  $L$  с помощью специальных устройств – электродов. При этом основным источником погрешностей измерений является собственная электрохимическая эдс электрода  $\epsilon_0$ , величина которой и ее флуктуации накладываются на полезный сигнал.

Для измерения плотности электрического тока в проводящих средах нами разработан, изготовлен и испытан трансформаторный датчик (ТД) плотности электрического тока в проводящих средах. В литературе [2] отмечается, что принцип работы трансформаторного датчика (ТД) основан на двух законах электродинамики: законе полного тока (теорема о циркуляции) и законе электромагнитной индукции, в результате датчик измеряет полный ток  $I$ , протекающий сквозь его свободное окно (рис. 1).

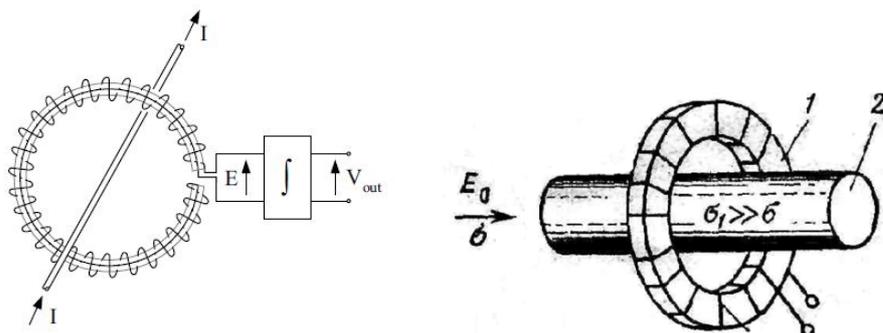


Рис. 1. Принцип работы трансформаторного датчика (ТД) плотности тока

Конструктивно датчик представляет собой тороидальный сердечник 1, на котором намотана катушка, подсоединенная к измерительному усилителю. Фактически датчик представляет собой трансформатор с объемным первичным витком, в катушке которого индуцируется э.д.с.:

$$e = i \frac{1}{2\pi} \mu\mu_0 N \sigma \omega E S_0 h \ln \left( \frac{D_n}{D_s} \right), \quad (1)$$

Здесь  $i$  – мнимая единица,  $\sigma$  – электропроводность морской воды ( $\sigma = 4 \text{ Мо/м}$ ),  $E$  – напряженность электрического поля,  $S_0$  – площадь окна,  $N$  – количество витков. Чувствительность ТД существенно возрастает при использовании сгустителя тока 2 (металлический стержень, проводимость которого выше проводимости морской воды). При использовании сгустителя первичного тока эффективный ток сквозь окно датчика возрастает в  $K$  раз:

$$K = \frac{a^2/b^2}{\ln(2a/b) - 1}, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – большая и малая полуоси (размеры) сгустителя, если  $a/b \sim (3-10)$ , то с погрешностью менее 5% выигрыш в токе составит один-два порядка.

На рис. 2 представлен внешний вид разработанного нами трансформаторного датчика (ТД) плотности тока. Датчик выполнен в герметичном корпусе, предварительный усилитель размещен в отдельном контейнере. Металлические «щеки» с торцов позволяют увеличить площадь окна для измерения тока, сквозное продольное отверстие позволяет использовать сгуститель тока. Основные характеристики устройства сведены в таблице 1.



Рис. 2. Внешний вид трансформаторного датчика (ТД) плотности тока

Таблица 1

Диаметр датчика	240 мм
Длина без концентратора	340 мм
Резонансная частота	100 Гц
Количество витков	900
Количество витков обратной связи	12
Импеданс на резонансе	10 мОм
Индуктивность	2 500 Гн
Емкость	340 пФ
Вес датчика	45 кг

На рис. 3 приведена измеренная амплитудно-частотная характеристика двух датчиков, а на рис. 4, соответственно, фазово-частотная характеристика пары испытуемых датчиков. Плоский участок на АЧХ, полученный с использованием обратной связи по полю, простирается от 1 Гц примерно до 10 кГц по частоте, чувствительность на плоском участке равна 0,05 В/мкА. В указанном частотном диапазоне изменение фазы достаточно гладкое, что позволяет математически смоделировать характеристики датчиков с высокой точностью. Следует отметить также идентичность указанных характеристик для испытуемой пары датчиков, что позволяет надеяться на возможность использования датчиков в дифференциальном включении.

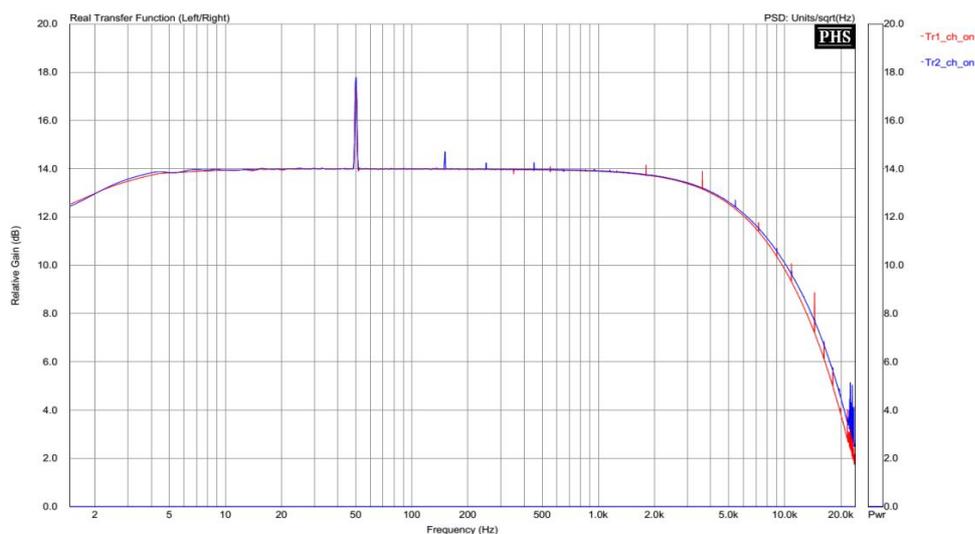


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика пары датчиков

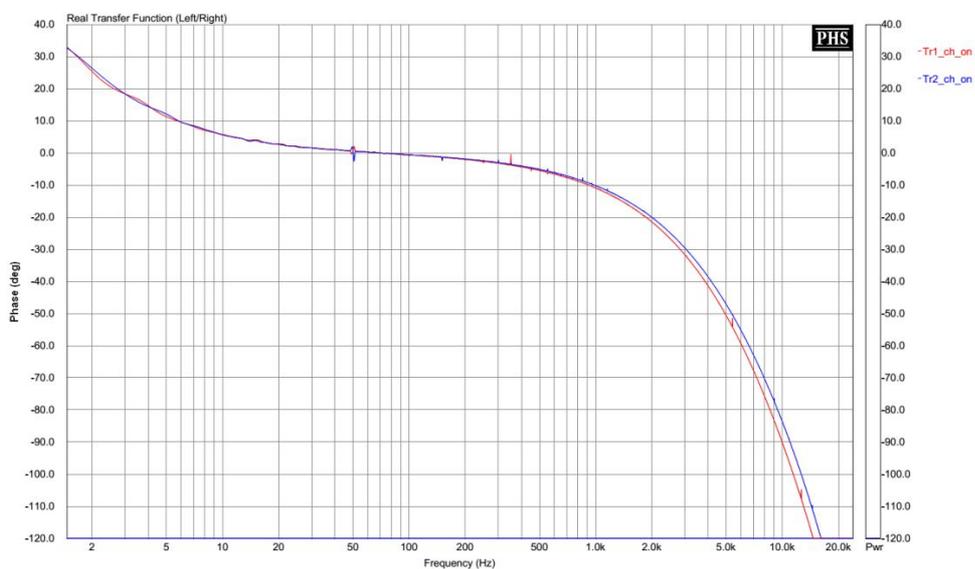


Рис. 4. фазово-частотная характеристика пары испытуемых датчиков

Использование разработанного нами датчика в океанологии позволяет надеяться на возможность проведения одновременных и независимых измерений напряженности электрического поля и плотности электрического тока, что позволит по этим результатам непосредственно вычислять поле  $V$  любых гидродинамических источников.

#### Список литературы:

- [1] Sanford T.B. Motionally induced electric and magnetic fields in the sea //J.Geophys. Res. 1971. V.76, № 15. P. 3476–3492.
- [2] Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.