

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ РАБОЧЕГО ЗАЗОРА МАГНИТНЫХ ПОДВЕСОВ ЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА**

**В. М. Амосков<sup>1</sup>, Е. Н. Андреев<sup>1</sup>, В. А. Беляков<sup>1,2</sup>,  
В. Н. Васильев<sup>1</sup>, О. С. Васильева<sup>1</sup>, А. А. Дёмина<sup>1</sup>,  
М. В. Капаркова<sup>1</sup>, В. П. Кухтин<sup>1</sup>, Е. А. Ламзин<sup>1</sup>,  
А. А. Ланцетов<sup>1</sup>, В. А. Ланцетов<sup>1</sup>, М. С. Ларионов<sup>1</sup>,  
А. Н. Неженцев<sup>1</sup>, И. Ю. Родин<sup>1</sup>, С. К. Самойлов<sup>1</sup>,  
С. Е. Сычевский<sup>1,2</sup>, А. А. Фирсов<sup>1</sup>, Н. А. Шатиль<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup> – АО «Научно-исследовательский институт электрофизической  
аппаратуры им. Д.В. Ефремова»**

**<sup>2</sup> – Санкт-Петербургский государственный университет  
(Санкт-Петербург, Россия)**

## **DYNAMIC MEASUREMENTS OF TRAIN-TO-TRACK AIR GAP FOR LEVITATED TRANSPORT**

**V. M. Amoskov<sup>1</sup>, E. N. Andreev<sup>1</sup>, V. A. Belyakov<sup>1,2</sup>,  
A. A. Dyomina<sup>1</sup>, A. A. Firsov<sup>1</sup>, M. V. Kaparkova<sup>1</sup>,  
V. P. Kukhtin<sup>1</sup>, E. A. Lamzin<sup>1</sup>, A. A. Lantzetov<sup>1</sup>,  
V. A. Lantzetov<sup>1</sup>, M. S. Larionov<sup>1</sup>, A. N. Nezhentzev<sup>1</sup>, I. Yu. Rodin<sup>1</sup>,  
S. K. Samoilov<sup>1</sup>, S. E. Sytchevsky<sup>1,2</sup>, N. A. Shatil<sup>1</sup>, V. N. Vasiliev<sup>1</sup>,  
O. S. Vasilieva<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup> – Joint Stock Company «D.V. Efremov Scientific Research Institute of  
Electrophysical Apparatus»**

**<sup>2</sup> – Saint Petersburg State University  
(St. Petersburg, Russia)**

Важнейшей задачей магнитного подвеса является обеспечение устойчивой левитации транспортного средства, что невозможно без достаточно точного динамического контроля величины левитационного (рабочего) зазора в заданных границах. В системах электромагнитного подвеса (ЭМП) величина зазора обычно составляет 5 – 20 мм. Результаты моделирования электромагнитного подвеса показали, что для устойчивого функционирования измерение зазора должно осуществляться с точностью не хуже чем одна сотая миллиметра и частотой не менее 200 Гц, что определило первичные требования к выбору датчиков.

Существует большое количество датчиков для контроля зазора: индуктивные, ультразвуковые, лазерные и т.д.

Ультразвуковой датчик имеет, по сравнению с оптическими, меньшие диапазон и скорость измерения. Точность измерения определяется свойствами среды распространения, а так же свойствами отражающего материала.

Принцип работы индукционных датчиков базируется на изменении амплитуды колебаний генератора при внесении в активную зону датчика проводящего материала. При работе датчика зазора в области его чувствительной поверх-

ности образуется переменное магнитное поле, наводящее в ферромагнитной направляющей путевой структуры вихревые токи. В результате вырабатывается аналоговый выходной сигнал, величина которого изменяется в зависимости от расстояния между датчиком и направляющей. Зависимость выходного сигнала от величины зазора во всем рабочем диапазоне, как правило, нелинейная, поэтому для более точного определения величины зазора необходимо использовать калибровочную зависимость датчика. В АО «НИИЭФА» разработана методика калибровки датчиков, обеспечивающая точность определения зазора не хуже 1мм. Датчики подобного типа промышленного исполнения применены в измерительной системе разработанных макетов элементов ЭМП.

Лазерные датчики имеют линейную характеристику во всем рабочем диапазоне, а разрешающая способность составляет доли микрон. Их существенным недостатком является высокая стоимость, а также необходимость использования специальных противоударных, пыле- и влагозащитных корпусов.

Таким образом, для применения в системе контроля были рассмотрены два наиболее подходящие типа датчиков – индуктивные и лазерные триангуляционные датчики. Особое внимание уделено скоростным и точностным параметрам системы сбора и обработки данных.

В докладе описывается методика и реализация системы контроля левитационного зазора для макета ЭМП, а также для макета ВТСП-2 модуля системы электродинамического подвеса (ЭДП). Приведены результаты предварительных исследований наиболее перспективных для использования в этой системе контроля датчиков.

Система контроля и управления левитационным зазором (СКУЛЗ) используется для управления током в электромагнитах (ЭМ) систем электромагнитного и комбинированного подвесов для удержания в заданных пределах величины зазора. Такая система может быть реализована как на базе цифровых систем, так и на базе аналоговых электронных схем. В обоих случаях имеются достоинства и недостатки. Для цифровых систем характерна гибкость и возможность оперативного изменения алгоритмов управления. Основной недостаток состоит в существовании времени задержки при аналого-цифровой обработке сигналов. Аналоговым схемам присуща высокая скорость работы, (десятки килогерц), однако имеется сложность оперативного внесения изменений в алгоритм. Независимо от принципа реализации система контроля условно может быть разделена на несколько основных узлов, выполняющих следующие функции:

1. измерение величины зазора между полюсом электромагнита и путевой структурой;
2. нормализация сигнала датчика зазора для последующей обработки;
3. обработка сигнала по специальному (запрограммированному) алгоритму;
4. формирование управляющих сигналов для управляемого источника тока.

Для отработки алгоритмов и вариантов реализации СКУЛЗ в АО «НИИЭФА» разработан ряд макетов, в которых использованы различные подходы к реализации системы контроля. Для питания электромагнитов разработаны и изготовлены специальные управляемые источники тока. Управление обеспечи-

валось посредством вычисления необходимых величин тока в ЭМ по разработанной управляющей функции. Для этих вычислений использовался персональный компьютер с быстродействующей платой аналого-цифрового ввода-вывода. Программный код, разработанный в среде Borland Delphi, позволяет задавать, контролировать и удерживать величину левитационного зазора в процессе работы системы. В результате обеспечивалась устойчивая левитация при заданном зазоре с точностью не хуже 0.01мм.

Для макета элемента ЭДП разработаны алгоритмы и специальная система управления левитационным зазором, которые позволяют решить проблему управления подъемной силой СП (ВТСП-2) модуля элемента ЭДП. Эта система решает следующие основные задачи:

1. измерение величины зазора,
2. измерение напряжения с катушек ВТСП, с целью их защиты,
3. анализ положения платформы в зависимости от нагрузки и величины тока в катушках (величина магнитной индукции),
4. изменение величины тока для стабилизации положения платформы.

Измерительно-управляющая система состоит из четырех датчиков зазора, модулей аналого-цифрового преобразователя (АЦП), одного модуля цифро-аналогово преобразователя (ЦАП), управляющего контроллера, компьютера верхнего уровня (КВУ) и двух источников питания (ИП). Контроллер реального времени обеспечивает управление работой модулями АЦП и ЦАП. Модуль АЦП представляет собой четырехканальный шестнадцатититный преобразователь, с погрешность измерения 0,05%. Модуль ЦАП представляет собой четырехканальный шестнадцатититный преобразователь, с разрешением  $5 \cdot 10^{-4}$  В. Использовались источники питания фирмы Delta Electronics с функцией дистанционного управления.

Программное обеспечение системы контроля левитационного зазора для ВТСП модуля было разработано в среде инженерного программирования LabView. ПО позволяет визуально контролировать параметры системы и управлять источниками питания как в ручном режиме, так и по заданному алгоритму, который использует элемент PID-регулирования.

В результате проведенных в АО «НИИЭФА» работ:

- исследованы и выбраны датчики для измерения величин левитационных зазоров, разработаны методики их калибровки, которые обеспечивают требуемую практическую точность измерений;
- для обоих перспективных вариантов левитационных подвесов (ЭМП и ЭДП) разработаны принципы и алгоритмы работы систем контроля и управления левитационным зазором;
- изготовлены макеты для исследования и отработки алгоритмов управления;
- разработаны, изготовлены и испытаны макеты аналоговой и цифровой систем контроля и управления левитационным зазором;
- при разработке цифровых систем использованы как различные подходы к реализации аппаратной части так и различная среда разработки, что позволит в дальнейшем выполнить оптимизацию и унификацию СКУЛЗ;

• разработаны требования к быстродействующим управляемым источникам питания электромагнитов ЭМП.

**Сведения об авторах:**

Амосков Виктор Михайлович, avm@sintez.niiefa.spb.su  
Андреев Евгений Николаевич andreev@sintez.niiefa.spb.su  
Беляков Валерий Аркадьевич, belyakov@niiefa.spb.su  
Васильев Вячеслав Николаевич, vasilievvn@sintez.niiefa.spb.su  
Васильева Ольга Сергеевна, vasilieva@sintez.niiefa.spb.su  
Демина Анна Андреевна, demina@sintez.niiefa.spb.su  
Капаркова Марина Викторовна, sytch@sintez.niiefa.spb.su  
Кухтин Владимир Петрович, kukhtin@sintez.niiefa.spb.su  
Ламзин Евгений Анатольевич, elamzin@sintez.niiefa.spb.su  
Ланцетов Андрей Анатольевич lancetov@sintez.niiefa.spb.su  
Ланцетов Владислав Андреевич, firsov@sintez.niiefa.spb.su  
Ларионов Михаил Сергеевич, larionov@sintez.niiefa.spb.su  
Неженцев Андрей Николаевич, nezhtentsev@sintez.niiefa.spb.su  
Родин Игорь Юрьевич, rodin@sintez.niiefa.spb.su  
Самойлов Сергей Константинович, samoilov@sintez.niiefa.spb.su  
Сычевский Сергей Евгеньевич, sytch@sintez.niiefa.spb.su  
Фирсов Алексей Анатольевич, firsov@sintez.niiefa.spb.su  
Шатиль Николай Александрович, shatiln@sintez.niiefa.spb.su

**Information about authors:**

Amoskov V. M., avm@sintez.niiefa.spb.su  
Andreev E. N., andreev@sintez.niiefa.spb.su  
Belyakov V. A., belyakov@niiefa.spb.su  
Dyomina A. A., demina@sintez.niiefa.spb.su  
Firsov A. A., firsov@sintez.niiefa.spb.su  
Kaparkova M. V., sytch@sintez.niiefa.spb.su  
Kukhtin V. P., kukhtin@sintez.niiefa.spb.su  
Lamzin E. A., elamzin@sintez.niiefa.spb.su  
Lantzetov A. A., lancetov@sintez.niiefa.spb.su  
Lantzetov V. A., firsov@sintez.niiefa.spb.su  
Larionov M. S., larionov@sintez.niiefa.spb.su  
Nezhentzev A. N., nezhtentsev@sintez.niiefa.spb.su  
Rodin I. Yu., rodin@sintez.niiefa.spb.su  
Samoilov S. K., samoilov@sintez.niiefa.spb.su  
Shatil N. A., shatiln@sintez.niiefa.spb.su  
Sytchevsky S. E., sytch@sintez.niiefa.spb.su  
Vasiliev V. N., vasilievvn@sintez.niiefa.spb.su  
Vasilieva O. S. vasilieva@sintez.niiefa.spb.su

---

© Амосков Виктор Михайлович, Андреев Евгений Николаевич, Беляков Валерий Аркадьевич, Васильев Вячеслав Николаевич, Васильева Ольга Сергеевна, Демина Анна Андреевна, Капаркова Марина Викторовна, Кухтин Владимир Петрович, Ламзин Евгений Анатольевич, Ланцетов Андрей Анатольевич, Ланцетов Владислав Андреевич, Ларионов Михаил Сергеевич, Неженцев Андрей Николаевич, Родин Игорь Юрьевич, Самойлов Сергей Константинович, Сычевский Сергей Евгеньевич, Фирсов Алексей Анатольевич, Шатиль Николай Александрович