

## **Разработка и изготовление прототипа ондулятора с периодом магнитной структуры 27мм с сопутствующей оснасткой**

Целью выполнения опытно-конструкторской работы (ОКР) является изготовление прототипа ондулятора с периодом магнитной структуры 27 мм (далее – прототип ондулятора) с сопутствующей оснасткой (технологическая оснастка для установки постоянных магнитов, тележка для перемещения прототипа ондулятора, ЗИП-комплект) для определения конечного конструкторского решения по реализации ондулятора. Прототип ондулятора способен воспроизвести основные технические характеристики конечного устройства (в части создания требуемой конфигурации магнитного поля в зазоре), которое планируется изготавливать серийно.

Прототип ондулятора предназначен для демонстрации достижимости технических требований (создание периодической магнитной системы с периодом 27 мм, изменяющимся магнитным зазором в диапазоне от 12 мм до 512 мм, с величиной магнитного поля в максимумах его продольного распределения не менее 0,46 Тл (при зазоре 12 мм), которые предъявляются к прототипу ондулятора с целью дальнейшей проработки конструкции экспериментального образца ондулятора. Периодическое магнитное поле создается за счет расположения чередующихся постоянных магнитов с различной ориентацией намагниченности (рис.2). Величина магнитного поля измеряется в процессе пуско-наладочных работ на территории Заказчика с использованием оборудования Заказчика.

В ходе выполнения работы должны быть выполнены следующие задачи:

- Проведение прочностных расчетов изготавливаемой конструкции прототипа ондулятора и сопутствующей оснастки.
- Изготовление элементов прототипа ондулятора.
- Сборка прототипа ондулятора.
- Изготовление технологической оснастки для установки постоянных магнитов.
- Разработка и изготовление тележки для перемещения прототипа ондулятора.
- Монтаж системы управления движением челюстей прототипа ондулятора.
- Разработка документации в следующем составе:
  - эскизная конструкторская документация (далее – ЭКД) на прототип ондулятора;
  - ЭКД на технологическую оснастку для установки магнитов;
  - паспорт на прототип ондулятора;
  - руководство по эксплуатации прототипа ондулятора;
  - программа и методика испытаний прототипа ондулятора (без магнитов);
  - программа и методика испытаний прототипа ондулятора в сборе;
  - отчет о выполненной ОКР, содержащий, в том числе: 1) прочностные расчеты конструкции прототипа ондулятора и сопутствующей оснастки; 2) рекомендации по повышению эффективности методик подготовки, монтажа, крепления и юстировки магнитных элементов, а также настройки прототипа ондулятора
- Изготовление упаковки для транспортировки прототипа ондулятора, технологической оснастки, постоянных магнитов (промаркированных по

порядковому номеру), тележки для перемещения прототипа ондулятора, ЗИП-комплекта.

- Монтаж и проведение пуско-наладочных работ на территории Заказчика
- Проведение испытаний прототипа ондулятора в сборе

В результате выполнения ОКР должны быть изготовлены и предоставлены:

1. Прототип ондулятора, состоящий из элементов:
  - набора постоянных магнитов для магнитной сборки в индивидуальных упаковках (не менее 600 шт);
  - набора постоянных магнитов концевых элементов (не менее 40 шт);
  - механической части (опора юстируемая – 1 шт., рама в сборе – 1 шт., каретки – 4 шт., челюсти с системой компенсации магнитных сил – 2 шт., ходовые винты – 2 шт., элементы крепления систем магнитной сборки – 10 шт.);
  - системы питания и управления движением челюстей, включающей: комплект шаговых двигателей – 2 шт., редукторы – 2 шт., контроллер движения – 1 шт., управляющий компьютер в стойке – 1 шт.
2. ЗИП-комплект – 1 комплект состоящий из:
  - набора постоянных магнитов (100 штук магнитов);
  - держателей постоянных магнитов (всего 10 штук держателей);
  - набора концевых элементов (4 комплекта концевых магнитных элементов с держателями).
3. Упаковка для транспортировки прототипа ондулятора;
4. Технологическая оснастка для установки постоянных магнитов – 1 комплект;
5. Тележка для перемещения прототипа ондулятора – 1 шт.;
6. Документация к прототипу ондулятора

На стадиях подготовки магнитных элементов, монтажа и крепления постоянных магнитов, а также юстировки магнитных элементов и настройки прототипа ондулятора должны быть разработаны рекомендации по повышению эффективности методик этих стадий, оптимизации полного цикла работ на этапе монтажа прототипа ондулятора, доработки конструкции (при необходимости) исходя из проведенных прочностных расчетов с целью дальнейшей проработки конструкции экспериментального образца ондулятора.

### **1. Основные технические характеристики прототипа ондулятора**

- длина периода магнитной структуры:  $27 \pm 0,1$  мм;
- расстояние оси пучка от опорной плоскости ондулятора:  $1200 \pm 0,1$  мм;
- количество периодов: не менее 58 штук;
- длина прототипа ондулятора вдоль оси пучка электронов не превышает 1618 мм;
- ширина прототипа ондулятора не превышает 925 мм;
- высота прототипа ондулятора не превышает 2350 мм;
- скорость изменения магнитного зазора не менее 5 мм/с;
- повторяемость позиционирования зазора между челюстями  $\pm 20$  мкм;
- отклонение от параллельности челюстей на длине прототипа ондулятора: не более 50 мкм во всем диапазоне изменения зазора в диапазоне магнитного зазора;

- элементный состав постоянных магнитов:  $Nd_2Fe_{14}B$ ;
- защитное покрытие поверхности магнитов: NiCuNi;
- толщина покрытия магнитов защитным слоем: 15-21 мкм;
- величина остаточной магнитной индукции постоянных магнитов не менее: 1,2 Тл;
- величина коэрцитивной силы по намагниченности постоянных магнитов не менее: 2200 кА/м;
- температурный коэффициент остаточной магнитной индукции постоянных магнитов:  $\alpha = -0,07 \div -0,12 \text{ \%}/K$ ;
- срок службы – 5 лет.

## 2. Конструктивные требования к прототипу ондулятора

Габаритные размеры прототипа ондулятора не более 1618×925×2350 мм (будут уточнены при проектировании).

Вид исполнения прототипа ондулятора – блочный, состоит из частей: 1) опорная рама (включает в себя рама, система компенсации магнитных сил, ходовые винты) 2) верхняя и нижняя челюсти (включает в себя , элементы крепления систем магнитной сборки), на которых закрепляются 3) постоянные магниты (постоянные магниты поставляются в индивидуальных упаковках и маркируются по порядковому номеру), 4) шаговые двигатели для изменения зазора между челюстями, 5) опора юстируемая, 6) система питания и управления (включает в себя контроллер движения и управляющий компьютер), 7) каретки.

Схематический вид элементов прототипа ондулятора в сборе изображен на рис. 1.

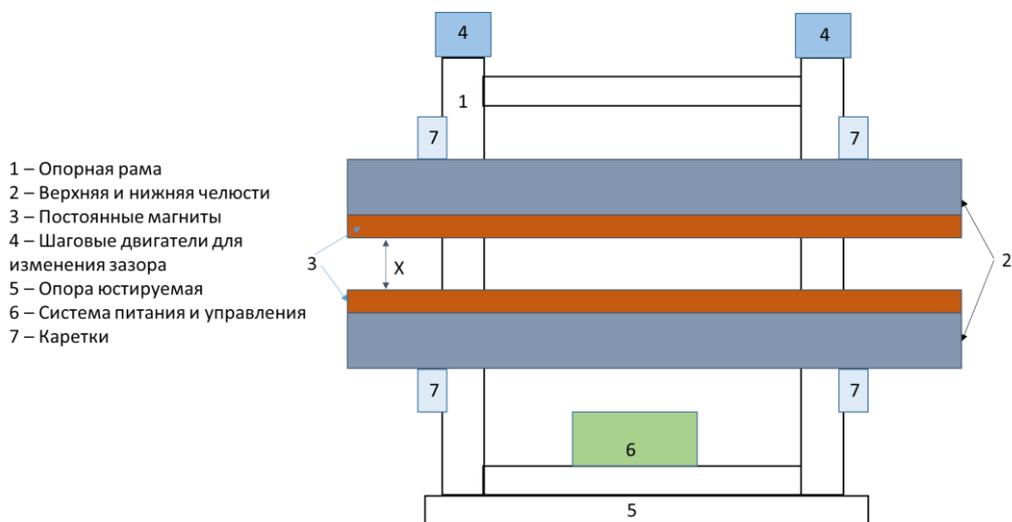


Рисунок 1. Схематическое изображение основных элементов механической части прототипа ондулятора. Система питания и управления движением челюстей обозначена условно.

Масса прототипа ондулятора (без стойки управления) не более 2000 кг (уточняется при проектировании).

Магнитная сборка ондуляторной системы должна вмещать в себя не менее чем 58 периодов.

На концах прототипа ондулятора должны располагаться концевые элементы, изготовленные из постоянных магнитов и служащие для снижения интегральных ошибок

магнитных полей. Концевые элементы должны располагать отдельными системами крепления и иметь возможность замены.

Ориентация намагниченности поставляемых магнитов должна обеспечить возможность реализации сборки, схематический вид которой указан на рис. 2 (сборка Хальбаха).

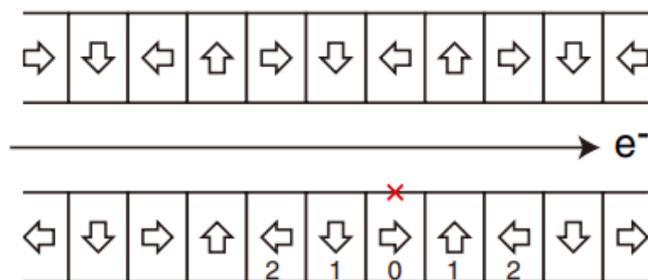


Рисунок 2. Схема чередования ориентации намагниченности (указаны стрелками) в магнитной структуре прототипа ондулятора. Горизонтальной стрелкой обозначена ось пучка.

## 2.1 Требования к юстировочной опоре

Юстировочная опора должна обеспечивать возможность изменения положения рамы прототипа ондулятора с механической системой по шести осям и систему фиксации его положения после настройки. Настройка положения прототипа ондулятора в горизонтальной плоскости производится 6 винтами М12, с дальнейшей фиксацией прижимными уголками. Для минимизации трения между пластинами прокладываются вставки из полиэтилена высокого давления, работающие в качестве подшипников скольжения. Настройка положения прототипа ондулятора по высоте и углу положения производится при помощи двух гаек М24, установленных на трёх аналогичных шпильках. Для компенсации возможного закусывания резьбы под каждую гайку подкладываются сферические шайбы.

- класс прочности шпилек и гаек – 10.9, исходя из их несущей способности;
- количество юстировочных опор – 1 шт.

## 2.2 Требования к опорной раме

Реализацию рамы прототипа ондулятора необходимо выполнить в виде сварной конструкции из стандартных элементов, а именно труб 150x100x8 (ГОСТ 8645 - 68 «Трубы стальные прямоугольные. Сортамент.»), 200x100x8 (ГОСТ 32931 - 2015 «Трубы стальные профильные для металлоконструкций. Технические условия»), двутавров типа 18ДКЗ 200x186 (ГОСТ Р 57837-2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок Технические условия.»), листов горячекатаных (ГОСТ 19903-2015 «Прокат листовой горячекатаный. Сортамент.»). Материал деталей рамы – СтЗсп.

По окончании сварных работ будет необходимо произвести фрезерную обработку рамы с целью соблюдения геометрических допусков и допусков на размеры для дальнейшего крепежа направляющих, ходового винта и кронштейнов для системы компенсации магнитных сил. После сборки рамы производится фиксация элементов на ней посредством штифтовых соединений. Рама должна иметь отверстия для дальнейшего

крепления блоков электроники. Покрытие рамы должно обладать антикоррозионными свойствами и будет уточнено в процессе проектирования. Изготовленную раму необходимо дополнительно отжечь с целью снятия остаточных закалочных напряжений.

Количество рам – 1 шт.

### **2.3 Требования к кареткам прототипа ондулятора**

Каретка прототипа ондулятора представляет из себя сварную конструкцию с дальнейшей фрезерной обработкой. Перемещение кареток по вертикали происходит по двум направляющим, одна из которых плоская, а другая имеет V-образный вырез. На каретках должны быть предусмотрены отверстия для дальнейшего крепления систем обратной связи (требования к точности, а также тип системы уточняются при проектировании).

Количество кареток – 4 шт.

### **2.4 Требования к челюстям прототипа ондулятора и системе компенсации магнитных сил**

Система компенсации магнитных сил прототипа ондулятора должна снижать динамические нагрузки на конструкцию и ходовой винт, возникающие из-за магнитных взаимодействий элементов прототипа ондулятора и зависящие от зазора между челюстями. Система компенсации должна фиксироваться на раме прототипа ондулятора и обеспечивать максимальную компенсирующую силу при минимальном зазоре между магнитами (12 мм). Челюсти прототипа ондулятора выполняются цельнофрезерованными из материала Д16Т с пазом для направляющей типа «ласточкин хвост», используемой при установке магнитной системы. Челюсти также должны быть обеспечены отверстиями для дальнейшего крепления магнитных катушек (количество отверстий, их расположение, диаметр уточняется при проектировании), компенсирующих ошибку в ондуляторе. Магнитные катушки не входят в состав прототипа.

Количество челюстей – 2 шт.

### **2.5 Требования к ходовым винтам**

Для обеспечения необходимого усилия между винтом и двигателем должен быть установлен прецизионный планетарный редуктор с передаточным отношением равным пяти. Выходной вал редуктора соединяется с винтом посредством безлюфтовой гибкой мембранной муфты. Опорами винта служат два подшипниковых узла. Верхний подшипниковый узел является фиксирующей опорой, содержащей комбинированный роликовый радиально-упорный подшипник. Нижний подшипниковый узел является плавающей опорой, содержащей шариковый сферический подшипник, компенсирующий несоосность винта и отверстия в нижней челюсти. С нижней стороны к ходовому винту посредством жёсткой муфты крепится абсолютный энкодер, служащий датчиком обратной связи для шагового двигателя.

Количество ходовых винтов – 2 шт.

## **2.6 Требования к элементам крепления систем постоянных магнитов**

К каждой челюсти прототипа ондулятора через паз вида «ласточкин хвост» крепятся пять пакетов магнитной сборки: три (один центральный и два промежуточных) на основную часть магнитной сборки и два, включающие в себя место под крепление концевых элементов. Крепление держателей отдельных магнитных элементов к промежуточной плите происходит при помощи Т-образных гаек, вставляющихся в паз пластины. Установка постоянных магнитов осуществляется в процессе пуско-наладочных работ с целью проверки величины магнитного поля в зазоре ондулятора. Система держателей должна обеспечивать возможность замены отдельных магнитов без необходимости разбора всей магнитной системы.

Количество элементов крепления магнитной системы – 10 шт.

## **2.7 Требования к шаговым двигателям**

- количество шаговых двигателей – 2 шт.
- момент удержания не менее 6 Н•м;
- наличие тормоза – да;
- угловой шаг не более 1,8 градуса;
- диаметр вала 14 мм;
- инерция ротора: не менее 2,8 кг•см<sup>2</sup>;
- наличие встроенного энкодера с разрешением не хуже 1000 имп/оборот.

Требования к шаговому двигателю могут быть изменены по согласованию с Заказчиком.

## **2.8 Требования к редукторам**

- количество редукторов – 2 шт.;
- передаточное число 5;
- максимально допустимый момент нагрузки на выходном валу 250 Н\*м;
- максимально допустимый люфт выходного вала 10 угл. минут;

Требования к редуктору могут быть изменены по согласованию с Заказчиком.

## **2.9 Требования к контроллеру движения**

- количество контроллеров движения – 1 шт.
- количество управляемых осей: не менее 2;
- язык: объектно-ориентированная многопоточность ACSPL+;
- количество программируемых пользователем буферов (поток): 6;
- частота цикла программы: 1 кГц;
- максимальная скорость сбора данных: 1 на 2 цикла MPU;
- ОЗУ: не менее 256 МБ;
- флэш-память: не менее 1 ГБ;
- наличие интерфейсов: Ethernet: TCP/IP 100 Мбит/с, Modbus, Ethernet/IP; RS-232: до 115 200 бит/с;

Требования к контроллеру движения могут быть изменены по согласованию с Заказчиком.

## **2.10 Требования к персональному компьютеру**

- размещается в 19 дюймовой стойке (стойка входит в комплект поставки);
- частота процессора, не менее 2.9 ГГц;
- объем установленной оперативной памяти, не менее 16 Гб;
- тип памяти DDR4;
- разъемы 4xDDR4 DIMM, DB15(VGA), HDMI, DP;
- источник питания не менее 500Вт с резервированием;
- масса, не более 20 кг;
- HDD 2x1Тб SATA;
- количество персональных компьютеров – 1 шт.

Требования к персональному компьютеру могут быть изменены по согласованию с Заказчиком.

## **2.11 Требования к технологической оснастке для установки постоянных магнитов**

- оснастка для установки постоянных магнитов должна выдерживать нагрузки, возникающие в процессе монтажа постоянных магнитов, и обеспечивать безопасную работу оператора;
- конструкция технологической оснастки должна содержать присоединительное крепление под элементы крепления постоянных магнитов, а также направляющую и ходовой винт для установки отдельных постоянных магнитов;
- ресурс работы изготавливаемой оснастки: установка не менее 1000 магнитов.

## **2.12 Требования к тележке для перемещения прототипа ондулятора**

- тележка для перемещения прототипа ондулятора должна выдерживать нагрузку со стороны транспортируемого собранного прототипа ондулятора;
- габаритные размеры тележки не должны превышать (ДхШ) не более: 2000 × 1100 мм;
- тележка должна быть рассчитана на перемещение прототипа ондулятора по любому твердому покрытию;
- ресурс тележки: не менее 1 (одного) года работы при условии ежедневной эксплуатации.

## **2.13 Требования к монтажу системы управления движением челюстей прототипа ондулятора**

- движение ходовых винтов должно реализовываться за счет работы шаговых двигателей через редуктор;
- управление работой шаговых двигателей должно реализовываться при помощи контроллера движения;

- сигнал об угле поворота вала шаговых двигателей задается встроенными энкодерами и передается на контроллер движения;
- силовой кабель питания двигателей и кабель с цифровыми сигналами от энкодера должны быть разведены;
- кабель для передачи цифровых сигналов с энкодера должен быть с оплеткой для минимизации внешних шумов;
- команды управления на контроллер движения должны задаваться с персонального компьютера. Система управления подвижными челюстями должна иметь возможность интегрироваться в систему управления SCADA с инструментальной средой Tango (уточняется при проектировании). Программное обеспечение управления не входит в комплект поставки, разрабатывается Заказчиком.

### **3. Требования к эксплуатации, хранению, удобству технического обслуживания и ремонта прототипа ондулятора**

Прототип ондулятора должен сохранять свои параметры, установленные в настоящем ТЗ, в климатических условиях (уточняется в ходе выполнения работ):

- температура окружающей среды  $22 \pm 1$  °С;
- относительная влажность воздуха 20 – 70 %;
- атмосферное давление 86 – 106 кПа.

Допускается хранение прототипа ондулятора при температуре от 15 °С до 30 °С с относительной влажностью воздуха от 20% до 70% . После возвращения устройства в климатические условия, требуемые для его использования, оно должно удовлетворять заданным требованиям.

Должна быть обеспечена доступность к отдельным элементам прототипа ондулятора для технического обслуживания и ремонта. Прототип ондулятора должен быть приспособлен к выполнению текущего ремонта силами эксплуатационного персонала.

Прототип ондулятора должен сохранять работоспособность и обеспечивать заявленные технические параметры с установленными постоянными магнитами при периодическом техническом обслуживании раз в год.

ЗИП-комплект прототипа ондулятора должен включать набор постоянных магнитов (100 штук магнитов), держатели постоянных магнитов (всего 10 штук держателей), набор концевых элементов (4 комплекта концевых магнитных элементов с держателями).

### **4. Требования по транспортированию прототипа ондулятора**

Транспортирование прототипа ондулятора (без сохранности требований к его настройке) в таре должно допускаться всеми видами транспорта при температуре окружающего воздуха от минус 20 °С до плюс 40 °С, относительной влажности воздуха не более 70 % при температуре 35 °С и атмосферном давлении от 75 до 115 кПа. Установочная платформа должна допускать транспортирование с жёсткой фиксацией в транспортном средстве без упаковки. Платформы для установки управляющей системы, ЗИП и измерительное оборудование упаковывается в специальные ящики или в заводскую тару.

## 5. Требования к видам обеспечения

- эскизная конструкторская, технологическая и эксплуатационная документации должны разрабатываться в соответствии с требованиями ЕСКД и ЕСТД;
- документация программных изделий должна разрабатываться в соответствии с требованиями ЕСПД (ГОСТ 19.101-77\* (СТ СЭВ 1626-79). Государственный стандарт Союза ССР. Единая система программной документации. Виды программ и программных документов);
- документация автоматизированных систем должна разрабатываться в соответствии с требованиями комплекса стандартов на автоматизированные системы (ГОСТ 34.201-2020. Межгосударственный стандарт. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем);
- средства измерения из состава Госреестра средств измерений должны быть поверены в установленном порядке;
- методики выполнения измерений должны быть аттестованы по ГОСТ Р 8.563-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений.

## 6. Требования к материалам

Магнитная восприимчивость используемых материалов, которые не являются постоянными магнитами и находятся в непосредственной близости к постоянным магнитам, не должна превышать  $4\pi \cdot 10^{-4}$  (в системе СИ) (уточняется в ходе выполнения работ).

В прототипе ондулятора допускается использование изделий внешней поставки импортного производства, утвержденных по согласованию с Заказчиком.

При изготовлении прототипа ондулятора и его элементов предполагается использование следующих металлов и сортов:

- дюралюминий Д16Т ГОСТ 4784-2019. Межгосударственный стандарт. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки;
- латунь Л63 (ЛС59-1) ГОСТ 15527-2004. Межгосударственный стандарт. Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки;
- сталь коррозионно-стойкая 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-2014. Межгосударственный стандарт. Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки;
- сталь коррозионно-стойкая 08Х18Н10Т ГОСТ 5632-2014. Межгосударственный стандарт. Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки;
- сталь Ст3сп ГОСТ 380-2005. Межгосударственный стандарт. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки;
- трубы прямоугольные 150x100x8 и 200x100x8 по ГОСТ 8645-68. Межгосударственный стандарт. Трубы стальные прямоугольные. Сортамент;
- листы горячекатаные 5,10,12,15,30 по ГОСТ 19903-2015. Межгосударственный стандарт. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент.