Санкт-Петербургский политехнический университет   
петра великого

Институт металлургии, машиностроения и транспорта

Отделение технологий машиностроения

Кафедра «Мехатроника и роботостроение» (при ЦНИИ РТК)

Работа допущена к защите

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.В. Лопота

«\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2019 г.

ВЫПУСКНАЯ РАБОТА МАГИСТРА

Тема: «Исследование системы сопряжения силового многофункционального тренажера с бортовой сетью питания РС МКС»

Направление подготовки: 15.04.06 «Робототехника»

|  |  |
| --- | --- |
| Выполнил студент группы 23345/2 | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ В.С. Подлесный |
|  |  |
| Руководитель, доцент | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ В.Н. Уланов |
|  |  |
|  |  |
| Консультант по нормоконтролю, инженер | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Д.С. Варфоломеев |

Санкт-Петербург 2019

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

**Институт металлургии, машиностроения и транспорта**

**Кафедра «Мехатроника и роботостроение» при ЦНИИ РТК**

«УТВЕРЖДАЮ»

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.В.Лопота

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение выпускной работы магистра

\_\_\_\_\_Подлесному Василию Сергеевичу\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

студенту гр.\_\_23345/2\_\_

**1.Тема проекта (работы)**

\_\_\_\_\_\_Исследование системы сопряжения силового многофункционального тренажера с бортовой сетью питания РС МКС\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**2.Срок сдачи студентом законченного проекта (работы)**

\_\_\_\_\_\_\_04.06.2019\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**3. Исходные данные к проекту (работе)**

\_\_\_\_Конструкторская документация на силовой многофункциональный тренажер с двумя\_\_ синхронными электродвигателями с постоянными магнитами и датчиком положения ротора, чертеж ротора и статора двигателя\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**4.Содержание расчетно-пояснительной записки**

\_\_\_Введение, анализ существующих решений по достижению совместимости в цепях\_\_\_\_ питания, описание объекта исследования, разработка программы исследований и\_\_\_\_\_\_\_\_ технических требований, исследование магнитостатических свойств электродвигателя в\_\_ программе компьютерного моделирования, исследование электромагнитной\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ совместимости и целостности питания печатных плат в программе компьютерного\_\_\_\_\_\_\_ моделирования, проведение лабораторных испытаний по исследованию качества работы\_\_ системы управления, анализ полученных результатов, заключение\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**5.Перечень графического материала (с точным указанием чертежей)**

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**6.Консультанты по проекту (с указанием относящихся к ним разделов)**

консультант по нормоконтролю – инженер Д.С. Варфоломеев

**7.Дата выдачи задания** \_\_\_\_07.02.2019\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Руководитель \_\_\_\_\_\_\_\_\_доцент Уланов В.Н.\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Задание принял к исполнению\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(дата)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(подпись студента)

РЕФЕРАТ

41 с., 24 рис., 3 табл., 4 прил.

СИСТЕМА СОПРЯЖЕНИЯ, СИЛОВОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ТРЕНАЖЕР, БОРТОВАЯ СЕТЬ ПИТАНИЯ, РС МКС, ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ.

Объект исследования – система сопряжения силового многофункционального тренажера с бортовой сетью РС МКС.

Предмет исследования – влияние системы питания тренажера на качество отработки режимов работы и на бортовую сеть РС МКС.

Цель работы – исследование системы сопряжения силового многофункционального тренажера с бортовой сетью питания МКС.

Работа проводится с применением следующих методов исследования:

* метод информационного поиска и систематизации данных;
* метод компьютерного моделирования;
* метод экспериментальных исследований.

Задачи, решаемые в рамках данной работы:

* проведение аналитического обзора существующих решений по достижению совместимости систем в цепях питания;
* описание объекта исследования;
* разработка программы исследований и технических требований;
* исследование магнитостатических свойств электродвигателя в программе компьютерного моделирования;
* исследование электромагнитной совместимости и целостности питания печатных плат в программе компьютерного моделирования;
* проведение лабораторных испытаний по исследованию качества работы системы управления;
* анализ полученных результатов;

Исследование системы сопряжения является актуальной задачей, так как к системе управления тренажером предъявляются высокие требования по безопасности и качеству отработки тренировочных режимов, также на электронную часть тренажера накладываются требования по электромагнитной совместимости изделий аэрокосмического предназначения.

Рассмотрены существующие решения по достижению совместимости систем в цепях питания. Рассмотрен и изучен объект исследования. Разработана программа проведения лабораторных испытаний. Сформированы технические требования. Осуществлено исследование магнитостатических свойств электродвигателя в программе компьютерного моделирования. Проведено исследование электромагнитной совместимости и целостности питания в программе компьютерного моделирования. Проведена серия лабораторных испытаний по устранению излишней энергии в приводной системе. Проведен анализ результатов. По итогам исследований проведена оценка качества разработанной системы сопряжения и сформированы рекомендации по улучшению как аппаратной части электроники, так и по алгоритму системы управления.

СОДЕРЖАНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 6](#_Toc8478324)

[1 Анализ существующих решений по достижению совместимости в цепях питания 8](#_Toc8478325)

[1.1 Устранение избыточной энергии 8](#_Toc8478326)

[1.2 Электромагнитная совместимость 9](#_Toc8478327)

[1.3 Целостность питания 10](#_Toc8478328)

[1.4 Выводы по разделу 10](#_Toc8478329)

[2 Описание объекта исследования 11](#_Toc8478330)

[2.1 Аппаратное решение системы сопряжения 14](#_Toc8478331)

[2.2 Программное решение системы сопряжения 14](#_Toc8478332)

[2.4 Выводы по разделу 14](#_Toc8478333)

[3 Разработка программы исследований и технических требований 16](#_Toc8478334)

[3.4 Выводы по разделу 17](#_Toc8478335)

[4 Исследование магнитостатических свойств электродвигателя в программе компьютерного моделирования 18](#_Toc8478336)

[4.1 Выводы по разделу 18](#_Toc8478337)

[5 Исследование электромагнитной совместимости и целостности питания печатных плат в программе компьютерного моделирования 19](#_Toc8478338)

[5.1 Исследование платы драйвера 19](#_Toc8478339)

[5.2 Исследование платы интерфейсной 19](#_Toc8478340)

[5.3 Выводы по разделу 19](#_Toc8478341)

[6 Лабораторные испытания по исследованию качества работы системы управления 20](#_Toc8478342)

[6.1 Выводы по разделу 22](#_Toc8478343)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 23](#_Toc8478344)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 24](#_Toc8478345)

# ВВЕДЕНИЕ

Выпускная квалификационная работа магистра посвящена исследованию системы сопряжения силового многофункционального тренажера с бортовой сетью питания РС МКС. Исследования напрямую связаны с действующими научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами Центрального научного исследовательского института робототехники и технической кибернетики.

Разрабатываемый силовой многофункциональный тренажер предназначен для проведения силовых физических тренировок основных групп мышц экипажа МКС с целью профилактики неблагоприятных последствий воздействия невесомости. Необходимая активная и реактивная нагрузка для выполнения спортивных упражнений создается электромеханической системой многофункционального тренажера, состоящей из двух синхронных электродвигателей с постоянными магнитами. В процессе выполнения упражнений на тренажере выделяется значительная энергия. Часть энергии выделяется в виде тепла, а часть возвращается обратно в систему питания РС МКС. Энергия, возвращаемая обратно в сеть, оказывает негативное влияние на бортовую сеть питания РС МКС со стороны потребителя и может вызывать ошибки в системе управления тренажером. Для решения обозначенных проблем разработана система сопряжения.

Целью работы является исследование системы сопряжения силового многофункционального тренажера с бортовой сетью питания МКС. В ходе её выполнения подлежат решению следующие задачи:

* проведение аналитического обзора существующих решений по достижению совместимости систем в цепях питания;
* описание объекта исследования;
* разработка программы исследований и технических требований;
* исследование магнитостатических свойств электродвигателя в программе компьютерного моделирования;
* исследование электромагнитной совместимости и целостности питания печатных плат в программе компьютерного моделирования;
* проведение лабораторных испытаний по исследованию качества работы системы управления;
* анализ полученных результатов.

Исходными данными для работы является конструкторская документация на силовой многофункциональный тренажер с двумя синхронными электродвигателями с постоянными магнитами и датчиком положения ротора, чертеж ротора и статора двигателя.

# Анализ существующих решений по достижению совместимости в цепях питания

Задача достижения совместимости в цепях питания технических систем возникает ввиду следующих проблем:

* возникновение избыточной энергии;
* достижение электромагнитной совместимости;
* обеспечение целостности питания.

Решения обозначенных проблем рассматриваются применительно к электромеханическим системам с электродвигателями.

## Устранение избыточной энергии

В электромеханических системах одним из способов устранения избыточной энергии является диссипация электрической энергии в форме тепла на балластных резисторах [1]. Также балластные резисторы активно применяются при динамическом торможении электродвигателей постоянного тока, когда на резисторах выделяется энергия, возникшая при переходе двигателя в генераторный режим [2]. Внешний вид балластного резистора представлен на рисунке 1.

Иногда, чтобы не выделять энергию на резисторах впустую, осуществляют её рекуперацию, то есть направляют на подзаряд аккумуляторных батарей или обратно в сеть источника [3]. В системе разработанного силового многофункционального тренажера нет аккумуляторных батарей, поэтому принято решение ограничиться использованием балластных резисторов и не перенаправлять энергию в источник, так как это сможет пагубно отразиться на качестве питания бортовой сети МКС.



Рисунок – Балластные резисторы

Основным алгоритмом управления устранением энергии является наблюдение за общим уровнем напряжения питания и потребляемого тока в системе и включением ветви схемы с балластниками по достижению установленного граничного значения напряжения питания в системе. Включение балластной цепи может осуществляться по пороговому алгоритму, по гистерезисному закону, по закону широтно-импульсной модуляции.

В случае порогового алгоритма при малейшем превышении порога, назначаемого равным номинальному напряжению питания, происходит открытие балластной цепи. Недостаток алгоритма состоит в очень частой смене состояний включения и выключения, что с программной точки зрения занимает значительное процессорное время, а с аппаратной приводит к появлению большого количества пульсаций напряжения. Преимуществом является простота программной реализации.

В случае гистерезисного закона, графически представленного на рисунке 2, назначается номинальный уровень напряжения питания Uпит, равный напряжению питания в системе, назначается ширина петли гистерезиса h, которую иначе можно назвать зоной нечувствительности. В момент достижения напряжением питания уровня Uпит+h включается балластная цепь и отключается только тогда, когда напряжение в системе опустится до Uпит. Преимуществом является простота программной реализации и устранение недостатка предыдущего алгоритма по занятости процессорного времени. Также уменьшение количества переключений уменьшает число пульсаций. Недостатком алгоритма является недостаточная гибкость управления, так как совершенно непонятно, что происходит с системой в зоне нечувствительности.

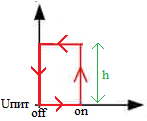


Рисунок – Гистерезисный закон управления

В случае широтно-импульсной модуляции сигнала управления балластной цепью, балластная цепь открывается на время, пропорциональное величине превышения номинального напряжения питания. Недостатком является повышенная математическая сложность реализации. Достоинством является гибкость и повышенная управляемость. Графическое представление вид алгоритма широтно-импульсной модуляции изображено на рисунке 3.

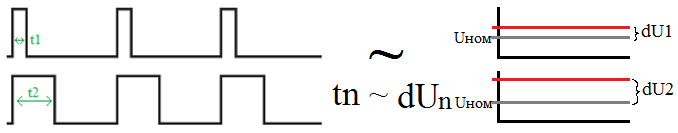


Рисунок 3 – ШИМ управление

## Электромагнитная совместимость

Электромагнитная совместимость характеризуется помехоустойчивостью электронного оборудования к импульсным помехам сети питания, а также уровнем собственных импульсных помех, измеряемых на цепях питания [4]. Проблема электромагнитной совместимости заключается как в негативном влиянии электромагнитных излучений, создаваемых токами и напряжениями высокоскоростных импульсов, генерируемых электронными печатными платами СМТ, на ботовую систему питания РС МКС, так и в помехоустойчивости электронных компонентов СМТ от влияния электромагнитного излучения бортовой системы питания РС МКС [5]. Задача достижения электромагнитной совместимости состоит в уменьшении обоюдного влияния систем друг на друга. Структурная схема взаимного влияния двух систем представлена на рисунке 4.

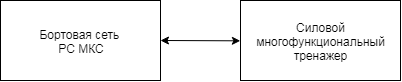


Рисунок – Структурная схема взаимного влияния

При проведении испытаний по проверке электромагнитной совместимости изделия основными измеряемыми параметрами является напряженность электрического поля излучаемых изделием помех и величина пульсаций напряжения питания, создаваемых изделием в цепях питания. Напряженность магнитного поля характеризует густоту силовых линий электромагнитного поля и несет в себе смысл «внешнего поля» [6]. Единицей измерения напряженности магнитного поля является величина ампер на метр.

Электромагнитные помехи делятся на два типа: передаваемые по проводникам, называемые кондуктивные помехи, и передаваемые через окружающее пространство, называемые излучаемые помехи. Кондуктивные помехи в свою очередь разделяются на синфазную и дифференциальную составляющие [7]. Излучаемые помехи от бортовой сети питания РС МКС порождают кондуктивные помехи в цепи питания тренажера. В свою очередь кондуктивные помехи, генерируемые цепями самого тренажера, создают излучаемые помехи, оказывающие влияние на бортовую сеть РС МКС. Поэтому необходимо как ограничивать выбросы электромагнитных излучений электронными компонентами печатных плат, так и принять меры для подавления негативного влияния внешнего излучения.

Для устранения дифференциальной составляющей кондуктивных помех применяется синфазный дроссель, представляющий собою две катушки, намотанные на общий сердечник. Магнитные поля, индуцированные дифференциальными протекающими токами, взаимно уничтожают друг друга. Структура и принцип работы синфазного дросселя представлен на рисунке 5.

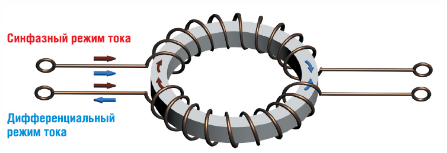


Рисунок 5 – Структура и принцип работы синфазного дросселя

Синфазная составляющая кондуктивных помех влияет на такие параметры качества напряжения питания, как уровень пульсаций. Подавление синфазной составляющей кондуктивных помех достигается фильтрацией входного напряжения питания с помощью RC фильтра нижних частот, представленном на рисунке 6.

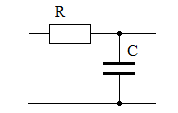


Рисунок 6 – Фильтр нижних частот

Подбирая параметры R, C достигают значения частоты среза фильтра, рассчитываемой по формуле 1, выше которой подавляются электромагнитные высокочастотные помехи, как на входе, так и на выходе цепей питания [8].

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Для блокировки электромагнитных помех внутри устройства и одновременно для защиты устройства от влияния помех извне используют экранирование, покрытие токопроводящим материалом электронных изделий с дальнейшим их заземлением. Электропроводный экран позволяет защитить оборудование от высокочастотной электромагнитной составляющей электромагнитного поля помех. Экран заземляют с целью привязки его электрического потенциала [9]. Графическое изображение экранирования представлено на рисунке 7.

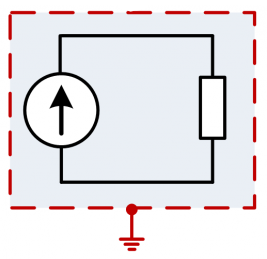


Рисунок 7 – Экранирование и заземление

В различных конструктивных исполнениях функцию экрана выполняет корпус аппаратуры с общим проводом экранированных кабелей. В виду негерметичности конструкций, наличия щелей и отверстий, электромагнитные помехи проникают в устройство и достигают максимального значения в непосредственной близости от этих отверстий и щелей. Напряженность поля в случае отверстий убывает обратно пропорционально кубу расстояния, а в случае со щелью убывает обратно пропорционально его квадрату. В связи с этим наиболее чувствительные элементы электроники размещают вдали от щелей и отверстий. Значительно снижают экранирующие свойства разъемы. Чем больше будет контактное сопротивление разъема, тем больше будет влияние помехи [10].

## Целостность питания

Обеспечение целостности питания позволит микросхемам получать стабильное напряжение, что позволит формировать устойчивые информационные и тактовые сигналы в сигнальных цепях схемы [11]. Достижение целостности питания заключается в равномерном распределении импеданса, рассчитываемого по формуле 2, в схеме распределения питания [12]. Не позволяет достигнуть равномерного распределения избыточная индуктивность, устранить которую становится возможным лишь установкой дополнительных развязывающих конденсаторов, которые компенсируют лишнюю индуктивность и обеспечивают согласованный импеданс между модулем регулятора напряжения и печатной платой.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

## Выводы по разделу

Представленные технические решения и рекомендации позволят наиболее эффективно решить задачу достижения совместимости в цепях питания сопряженных систем, а именно позволят устранить избыточную энергию в системе, защитить разрабатываемую систему от влияния электромагнитных помех, обеспечить целостность питания.

Рассмотрим, каким образом эти решения реализованы в объекте исследования – спроектированной системе сопряжения силового многофункционального тренажера.

# Описание объекта исследования

Объектом исследования является система сопряжения силового многофункционального тренажера, представленного на рисунке 4, с бортовой сетью РС МКС. Система сопряжения представляет собой сочетание аппаратных и программных средств, направленных на достижение совместимости в цепях питания силового многофункционального тренажера и бортовой сети питания РС МКС и решение проблем, связанных с целостностью питания, электромагнитной совместимостью и устранению вырабатываемой излишней энергии, а также на предостережение от возникновения ошибок в системе управления тренажером.



Рисунок – Силовой многофункциональный тренажер

Основное негативное воздействие на сопряжение силового многофункционального тренажера с бортовой сетью РС МКС оказывает электромеханическая система многофункционального тренажера с электронной системой управления, которая в составе тренажера образует блок управления, представленный на рисунке 5.



Рисунок 5 – Блок управления

Блок управления состоит из блока моторов и блока электроники.

Блок моторов, представленный на рисунке 6, содержит в своем составе два синхронных электродвигателя с постоянными магнитами. Система управления тренажером с помощью двух электродвигателей создает как активную, так и реактивную нагрузку для выполнения упражнений космонавтом. В процессе выполнения упражнений и преодоления нагрузки может вырабатываться энергия до 1,5 кВт, которая является источником распространения электромагнитных помех и при этом потенциально способна оказывать влияние на внутренний токовый контур системы управления.



Рисунок 6 – Блок моторов

Блок электроники, представленный на рисунке 7, содержит в себе платы драйверов управления двигателями, плату интерфейсную и плату управления вентилятором.



Рисунок 7 – Блок электроники

Плата драйвера предназначена для реализации управления приводами, а также отвечает за передачу данных параметров управления плате интерфейсной, осуществляет прием команд от платы интерфейсной. Управляющим микроконтроллером является Миландр 1986ВЕ1Т. Обмен данными осуществляется посредством интерфейса стандарта ГОСТ Р 52070-2003. Микроконтроллером осуществляется опрос оптического энкодера по интерфейсу SPI. Внешний вид платы драйвера представлен на рисунке 8. Плата управления вентилятором аналогична по составу плате драйвера.



Рисунок 8 – Плата драйвера

Плата интерфейсная, представленная на рисунке 9, предназначена для сбора данных с плат драйверов. Управляющим микроконтроллером является Миландр 1986ВЕ1Т. Обмен данными осуществляется посредством последовательного синхронного интерфейса и интерфейса стандарта ГОСТ Р 52070-2003.

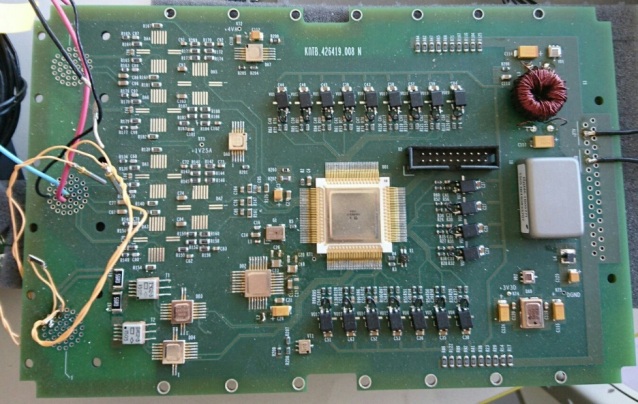


Рисунок 9 – Плата интерфейсная

В итоге конечными элементами сборки тренажера, способными оказывать негативное влияние на сопряжение тренажера с бортовой сетью РС МКС, являются электродвигатели приводной системы, платы драйверов управления двигателями, плата интерфейсная и плата управления вентилятором.

Система сопряжения силового многофункционального тренажера с бортовой сетью питания состоит как из аппаратных, так и из программных решений, направленных на устранение негативного влияния составляющих блока электроники силового многофункционального тренажера. Аппаратные решения реализованы в каждом элементе блока электроники по отдельности, а программное решение включено в алгоритм управления электродвигателями.

## Аппаратное решение системы сопряжения

Для решения проблем электромагнитной совместимости на входе цепи питания блока электроники тренажера установлен блок фильтров и балластных сопротивлений, представленный на рисунке 10. Он предназначен для фильтрации входного напряжения, а также для выделения реактивной энергии на балластных резисторах.

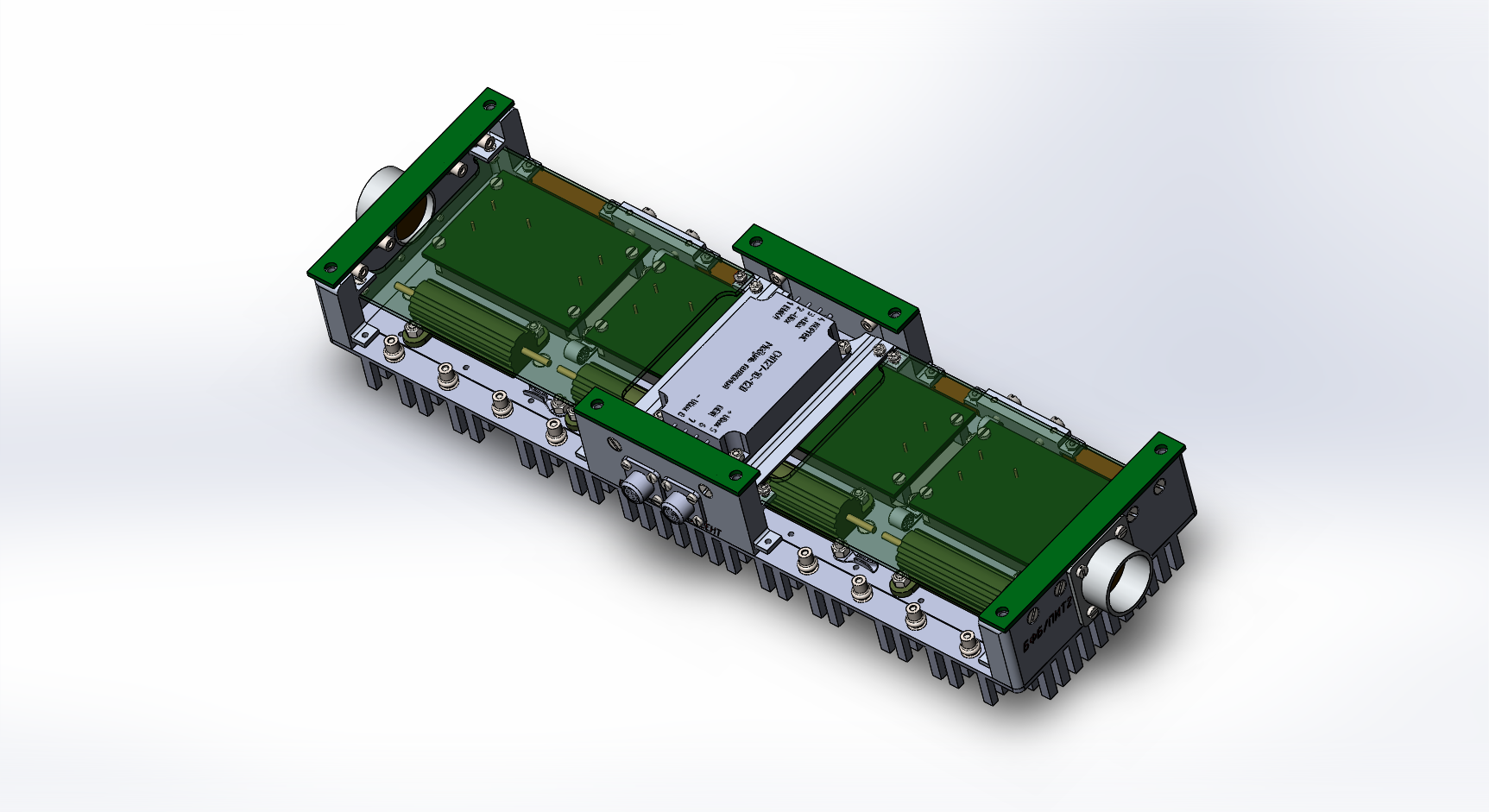


Рисунок 10 – Блок фильтров и балластных сопротивлений

На плате интерфейсной реализована система аппаратной фильтрации входного и выходного напряжения, представленная на рисунке 11. Аппаратное решение представляет собой последовательное включение диода, изолирующего общую цепь питания от цепей питания платы, применение синфазного дросселя, устраняющего синфазные помехи входного питания, фильтрующих конденсаторов, подавляющих электромагнитные выбросы входного и выходного напряжения и конденсаторов, соединенных с корпусом изделия для устранения электростатических разрядов. Модуль питания выполняет роль регулятора и стабилизатора выходного напряжения для питания цифровой части электрической схемы.



Рисунок 11 – Вход питания платы интерфейсной

Плата драйвера управляет приводами, коммутирует значительный поток электромагнитной энергии и представляет собой основной источник негативного влияния. На плате драйвера реализована система аппаратной фильтрации входного и выходного напряжения, представленная на рисунке 11. Аппаратное решение представляет собой последовательное включение диода, изолирующего общую цепь питания от цепей питания платы, применение фильтрующих конденсаторов суммарной емкостью более 2000 мкФ, подавляющих электромагнитные выбросы входного и выходного напряжения, а также выполняющих роль емкостей подзарядки, установку двунаправленного силового стабилитрона, выполняющего роль стабилизатора.



Рисунок 11 – Вход питания платы драйвера

В виду значительной коммутируемой мощности становится вопрос надежной изоляции силовой части питания от питания цифровых микросхем. Для решения вопроса на плате реализован прямоходовой преобразователь напряжения с гальванической изоляцией в виде трансформатора.



Рисунок 12 – Гальваническая изоляция

В процессе тренировки спортсмен оказывает сопротивление моменту нагрузки, создаваемому электродвигателями. Прикладываемая механическая мощность переводит электродвигатели в генераторный режим, способствуя тем самым выработки значительной электромагнитной энергии, которую становится необходимым устранять из системы. Для её устранения аппаратно реализована коммутаторная цепь, представленная на рисунке 13, с обратной связью по напряжению, состоящая из транзистора, диода, и резистивного делителя. К входам коммутаторной балластной цепи подключаются балластные резисторы суммарной мощностью в 400 Вт и сопротивлением 5 Ом.



Рисунок 13 – Цепь подключения балластных резисторов

## Программное решение системы сопряжения

Программная часть системы сопряжения состоит в реализации алгоритма управления коммутаторной балластной цепью, представленной на рисунке 13. Алгоритм управления встроен в циклограммы отработки тренировочных режимов спортсменом. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 14.

В процессе отработки программы тренировочного режима микроконтроллер на плате драйвера на каждом цикле осуществляет измерение уровня напряжения на входе питания с выхода резистивного делителя. В случае превышения напряжения на входе, возникшего в результате выработки избыточной электромагнитной энергии, микроконтроллер подает управляющий сигнал, включающий коммутаторную цепь и открывающий транзистор, и держит его открытым до тех пор, пока величина напряжения не достигнет номинальной, равной 27 В. Режим переключения является пороговым. Время включения коммутаторной цепи линейно зависит от уровня превышения напряжения питания.

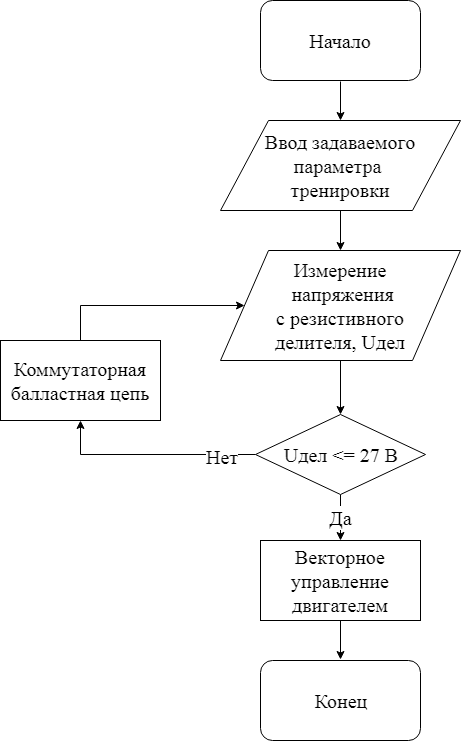


Рисунок 14 – Блок-схема алгоритма тренировки

## Выводы по разделу

Сформировано описание объекта исследования – системы сопряжения силового многофункционального тренажера с бортовой сетью РС МКС. Отмечены элементы сборки тренажера, оказывающие негативное влияние на сопряжение тренажера с бортовой сетью РС КМС. Аппаратные и программные решения системы сопряжения спроектированы с целью устранения возможного негативного влияния.

Необходимо провести исследование разработанных аппаратных и программных решений, оценить их качество и в случае необходимости предложить способы улучшения. Перейдем к формулировке технических требований и постановке программы исследований.

# Разработка программы исследований и технических требований

Требуется провести исследование спроектированной системы исследовать то, как система сопряжения отрабатывает на каждом вредном объекте и как при этом помогает отрабатывать блок фильтров и балластных сопротивлений

Требования к системе управления

В электромеханическую систему входит:

* два синхронных электродвигателя с постоянными магнитами;
* две платы драйвера управления электродвигателями;
* плата интерфейсная.

Приводная система тренажера состоит из электродвигателей – синхронных машин на постоянных магнитах. Особый интерес представляет исследование магнитостатических свойств электродвигателя и получения его электромеханических характеристик. Знание характеристик позволит оценить соответствие характеристик разработанного электропривода требованиям к создаваемой тренажером нагрузки, позволит предусмотреть явления магнитных процессов и разработать алгоритмы для системы управления, а также способствует проведению лабораторных испытаний по исследованию распределения мощности в приводной системе.

Цель исследований – исследовать магнитную систему синхронной машины на постоянных магнитах для электропривода.

Исходные данные – чертеж ротора и статора синхронной машины постоянного тока с постоянными магнитами.

Задачи исследований:

* получение распределения силовых линий магнитного поля машины;
* построение графика зависимости синхронизирующего момента от угла поворота;
* построение графика зависимости синхронизирующего момента от плотности тока в обмотках;

## Выводы по разделу

Полученные результаты соответствуют предъявляемым требованиям. Обладая недостающей информацией о свойствах электродвигателей и объединив оба электропривода в единую приводную систему, появляется возможность перейти к созданию системы управления, установке требований к её работе и функционированию.

Управление скоростью и направлением вращения электропривода осуществляется с помощью двух регуляторов тока и скорости. Регулятор скорости получает данные с датчика положения ротора, регулятор тока получает данные с токового шунта, установленного на плату драйвера. Регулятор тока является внутренним контуром управления, регулятор скорости-внешним контуром.

# Исследование магнитостатических свойств электродвигателя в программе компьютерного моделирования

В качестве исходных данных имеется чертеж ротора и статора электродвигателя силового многофункционального тренажера. Чертеж представлен на рисунке



Рисунок 7 – Чертеж ротора и статора электродвигателя

## Выводы по разделу

Разработанная система управления позволит управлять скоростью и направлением вращения приводов по двум параметрам: току и скорости, чем обеспечивается большая точность. Перед тем, как приступать к программированию режимов работы тренажера, получив возможность управления приводной системой, необходимо обратить внимание на факторы, которые могут повлиять на нашу систему управления и вывести её из строя.

Одним из самых важных физических параметров, вносящим нелинейность в систему управления, а также способным нарушить работу регулятора тока, является выделяемая в процессе рекуперации мощность. Необходимо научиться управлять состоянием теплового равновесия и баланса мощностей в системе, чтобы не нарушить работу регуляторов управления приводами.

Перейдем к задаче исследования распределения мощности, вырабатываемой в приводной системе, с целью совершенствования системы управления, регулирования термодинамического нагрева приводов во избежание искажений магнитных характеристик, вызванных перегревом, а также во избежание проблем, возникающих в контуре управления по току.

# Исследование электромагнитной совместимости и целостности питания печатных плат в программе компьютерного моделирования

## Исследование платы драйвера

## Исследование платы интерфейсной

## Выводы по разделу

# Лабораторные испытания по исследованию качества работы системы управления

Певрый опыт: влияние слива через балластник на ток электрической машины

Второй опыт: влияние слива через балластник на контура тока

Качество исполнения тренировочных режимов зависит от качества работы системы управления силового многофункционального тренажера.

Ввиду создания тренажером реактивной и активной нагрузки становится актуальным вопрос рекуперации энергии, вырабатываемой приводами в генераторном режиме работы. Проявляется эффект рекуперации, когда спортсмен мешает вращению тренажера, вращая его самостоятельно, тем самым вводя его в генераторный режим работы.

Схема распределения прикладываемой мощности представлена на рисунке 20. Система запитана напряжением 27 В. Прикладывая усилие, спортсмен заставляет вращаться двигатель в генераторном режиме. Вся приложенная спортсменом механическая мощность преобразуется электроприводом в электрическую энергию, которая выделяется и копится в трех элементах системы: в обмотках электродвигателя в виде тепловой мощности, в конденсаторах в виде запасаемой электрической энергии, оставшаяся часть выделяется в виде тепловой энергии на балластных резисторах малого сопротивления. Так как в конденсаторах больше определенного количества накопить энергию нельзя, а температуру и ток обмотки следует внимательно контролировать во избежание выхода обмотки статора двигателя из строя, то всю основную лишнюю энергию следует удалять из системы путем пропускания избыточного тока через балластные резисторы.

На входе питания установлен выпрямительный диод, включенный в обратном направлении. Его установка обусловлена двумя причинами:

* энергия не возвращается в источник питания, тем самым образуется замкнутая система распределения мощности, что позволяет получить достоверные результаты исследований;
* при попытках устранения избыточного тока через балластные резисторы, часть избыточного тока попадала в контур управления по току, нарушая тем самым работу регулятора.



Рисунок – Схема распределения мощности в приводной системе

Необходимо провести испытания по исследованию распределения мощности в приводной системе в трех режимах работы: изометрическом, изокинетическом и изотоническом. В изокинетическом режиме исследования проводились как для концентрической фазы выполнения упражнения, так и для эксцентрической. В изотоническом режиме исследована только концентрическая фаза. Исследования проводились для правого и левого двигателя по отдельности.

В каждом из режимов спортсмен оказывает сопротивление моменту нагрузки, создаваемому приводной системой. Прикладываемое механическое усилие преобразуется в механическую энергию, которая характеризуется параметром механической мощности Wмех, вычисление которой осуществляется по формуле 1. Механическая мощность перераспределяется в приводной системе в следующих её компонентах:

* в виде тепловой энергии в обмотках двигателя Wобм, вычисление которой осуществляется по формуле 2;
* в виде тепловой энергии выделяемой на балластных резисторах Wбалласт, вычисление которой осуществляется по формуле 4;

(1)

(2)

(3)

Величина прикладываемого механического усилия Fмех измеряется с помощью динамометра, перемещение s штанги тренажера измеряется с помощью линейки, время t с помощью секундомера. Величина силы тока в обмотках Iобм и протекающего через балластный резистор Iбалласт определяется с помощью токовых клещей. Емкость конденсаторов С, сопротивление балластного резистора Rбалласт и сопротивление обмоток Rобм известны и равны соответственно.

## Выводы по разделу

Разработанная программа лабораторных испытаний позволит количественно и качественно оценить распределение мощности в приводной системе тренажера.

Научившись полноценно управлять приводной системой с учетом фактора влияние накапливаемой мощности необходимо рассмотреть вопрос передачи информации о параметрах управления системы пульту управления. Для этого следует задаться созданием протокола информационно-логического сопряжения.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе магистра проведен аналитический обзор существующих решений по достижению совместимости систем в цепях питания. Обозначен перечень проблем, решаемых построением эффективной системы сопряжения. Приведено описание объекта исследования – системы сопряжения силового многофункционального тренажера. Разработана программа исследований и сформированы технические требования. Осуществлено исследование магнитостатических свойств электродвигателей, получены статические характеристики, что позволило до конца сформировать технические требования. Выполнено исследование электромагнитной совместимости и целостности питания печатных плат управления в программе компьютерного моделирования. Проведена серия опытов по исследованию качества работы системы управления. По итогам исследований проведена оценка качества разработанной системы сопряжения и сформированы рекомендации по улучшению как аппаратной части электроники, так и по алгоритму системы управления.

В ходе подготовки к исследованиям расширена область знаний и получена дополнительная информация по теории электромагнитной совместимости. Изучены принципы моделирования печатных плат в среде инженерного компьютерного моделирования Cadence Sigrity, приобретены навыки программирования на языке Си.

Задачи выпускной квалификационной работы магистра решены полностью.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Информационный портал ELECTRIK INFO. [Электронный ресурс] URL: <http://electrik.info/main/fakty/1172-rekuperaciya-elektricheskoy-energii.html> (дата посещения 21.05.2019).
2. Информационный портал ELQUANTA. [Электронный ресурс] URL: https://elquanta.ru/teoriya/rekuperaciya.html (дата посещения 21.05.2019).
3. Шевлюгин М.В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и в метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. — М.: МГУПС (МНИТ), 2009. — С. 51.
4. ГОСТ 33991-2016 Электрооборудование автомобильных транспортных средств. Электромагнитная совместимость. Помехи в цепях. Требования и методы испытаний.
5. Сборник «Электромагнитная cовмеcтимоcть в электронике» [Электронный ресурс] URL: https://www.nasa.gov/mission\_pages/station/research/experiments/976.html (дата посещения 21.05.2019).
6. Информационный портал ZAOCHNIK. [Электронный ресурс] URL: <https://zaochnik.com/spravochnik/fizika/magnitnoe-pole/naprjazhennost-magnitnogo-polja/> (дата посещения 21.05.2019).
7. Официальный сайт КОМПЭЛ [Электронный ресурс] URL: <https://www.compel.ru/lib/ne/2014/5/6-sinfaznyie-drosseli-kompanii-sumida-dlya-poverhnostnogo-montazha> (дата посещения 21.05.2019).
8. Информационный портал ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОАКУСТИКИ. [Электронный ресурс] URL: <http://audioakustika.ru/node/1450> (дата посещения 21.05.2019).
9. Информационный портал L-CARD. [Электронный ресурс] URL: <http://www.lcard.ru/lexicon/shielding> (дата посещения 21.05.2019).
10. Информационный портал CТУДМИ. [Электронный ресурс] URL: <https://studme.org/>shielding (дата посещения 21.05.2019).
11. Информационный портал ВРЕМЯ ЭЛЕКТРОНИКИ. [Электронный ресурс] URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2327/doc/52968/> (дата посещения 21.05.2019).
12. Тепикин, А.И. Обеспечение целостности питания и сигналов на практике / А.И. Тепикин // Электронные компоненты. – 2018. - №8. – С.10-14.
13. Презентация Johnson Space Center [Электронный ресурс] URL: http://www.hunchdesign.com/uploads/2/2/0/9/22093000/cevis\_handles\_presentation.pdf (дата посещения 06.06.2018).
14. Официальный сайт NASA [Электронный ресурс] URL: https://www.nasa.gov/mission\_pages/station/research/experiments/1001.html (дата посещения 06.06.2018).
15. Журнал предполетной подготовки. Саманта Кристофоретти [Электронный ресурс] URL: https://samlogbook-ru.livejournal.com/tag/cevis (дата посещения 06.06.2018).
16. Technische Universität Wien [Электронный ресурс] URL: https://www.tuwien.ac.at/aktuelles/news\_detail/article/7244/ (дата посещения 01.06.2018).
17. Официальный сайт Renishaw [Электронный ресурс] URL: http://www.renishaw.ru/ru/resolute-encoder-series--37823 (дата посещения 06.06.2018).
18. СИЛОВОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ТРЕНАЖЕР «СМТ». Пояснительная записка СМЕ01.00.000 ПЗ – 2015 г.
19. Мак-Дугалл Дж. Дункан, Уэнгер Говард Э., Грин Говард Дж. Физиологическое тестирование спортсмена высокого класса Киев: Олимпийская литература, 1998. — 432 с.
20. Нетреба А.И. Специфические изменения скоростно-силовых возможностей скелетных мышц под влиянием тренировки в изотоническом и изокинетическом режимах мышечного сокращения и при гипокинезии, 2017. – 120 с.