Министерство образования и науки Российской Федерации

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт металлургии, машиностроения и транспорта

Кафедра «Мехатроника и роботостроение» при ЦНИИ РТК

Работа допущена к защите

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.В. Лопота

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

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СОПРЯЖЕНИЯ СИЛОВОГО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА С БОРТОВОЙ СЕТЬЮ ПИТАНИЯ РС МКС**

по направлению подготовки магистров 15.04.06 Мехатроника и робототехника

по образовательной программе

15.04.06\_04 Робототехника

Выполнил

студент гр.23345/2 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ В.С. Подлесный

Руководитель

доцент кафедры МиР, к.т.н. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ В.Н. Уланов

Научный консультант \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.Н. Юсупов

Консультант

по нормоконтролю \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ С.Г. Чупров

Санкт-Петербург

2019

РЕФЕРАТ

41 с., 24 рис., 3 табл., 11 источников.

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 – определить эффективность спроектированной системы сопряжения силового многофункционального тренажера с бортовой сетью питания РС 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 7](#_Toc10113657)

[1 Анализ существующих решений по достижению совместимости в цепях питания 9](#_Toc10113658)

[1.1 Устранение избыточной энергии 9](#_Toc10113659)

[1.2 Электромагнитная совместимость 11](#_Toc10113660)

[1.3 Целостность питания 14](#_Toc10113661)

[1.4 Выводы по разделу 15](#_Toc10113662)

[2 Описание объекта исследования 16](#_Toc10113663)

[2.1 Аппаратное решение системы сопряжения 21](#_Toc10113664)

[2.2 Программное решение системы сопряжения 24](#_Toc10113665)

[2.4 Выводы по разделу 25](#_Toc10113666)

[3 Разработка программы исследований и технических требований 26](#_Toc10113667)

[3.1 Устранение избыточной энергии 26](#_Toc10113668)

[3.2 Электромагнитная совместимость 27](#_Toc10113669)

[3.3 Целостность питания 28](#_Toc10113670)

[3.4 Выводы по разделу 28](#_Toc10113671)

[4 Исследование магнитостатических свойств электродвигателя в программе компьютерного моделирования 29](#_Toc10113672)

[4.1 Выводы по разделу 31](#_Toc10113673)

[5 Исследование электромагнитной совместимости и целостности питания печатных плат в программе компьютерного моделирования 32](#_Toc10113674)

[5.1 Исследование платы драйвера 32](#_Toc10113675)

[5.2 Исследование платы интерфейсной 32](#_Toc10113676)

[5.3 Выводы по разделу 32](#_Toc10113677)

[6 Лабораторные испытания по исследованию качества работы системы управления 33](#_Toc10113678)

[6.1 Выводы по разделу 33](#_Toc10113679)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 34](#_Toc10113680)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 35](#_Toc10113681)

Обозначения и сокращения

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| РС | – | Российский сегмент |
| МКС | – | Международная космическая станция |
| СМТ | – | Силовой многофункциональный тренажер |

# 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 определение эффективности спроектированной 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

## Балластные резисторы

В электромеханических системах одним из способов устранения избыточной энергии является диссипация электрической энергии в форме тепла на балластных резисторах, иногда называемых тормозными [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.



Рисунок 1 – Балластные резисторы

Устранение энергии путем её диссипации активно применяется при реостатном торможении такого электрифицированного транспорта, как троллейбус, трамвай, электропоезда [3]. Практически вся энергия выделяется на тормозных резисторах и повторно не используется. Изменение тормозного усилия осуществляется с помощью изменения сопротивления. Это приводит к резким переменам напряжения в сети. Внешний вид тормозных резисторов на крыше электропоезда представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Тормозные резисторы на крыше электропоезда

## Рекуперация в сеть

Чтобы не выделять энергию на резисторах впустую, осуществляют её рекуперацию, то есть аккумулируют с целью дальнейшего использования [4]. Первым изобретением оказалась система рекуперации энергии в сеть питания, представленная на рисунке 3. Зная расположение точек остановки электротранспорта, интервалов ускорения и торможения становится возможным отдавать энергию обратно в сеть для того, чтобы её могли расходовать другие потребители [5]. Способ отдачи энергии в сеть позволяет устранить недостаток мощности на отдельных участках движения, однако технически сложно реализуем, и требует разработки мощных стационарных накопителей энергии, распределенных по траектории движения электротранспорта.

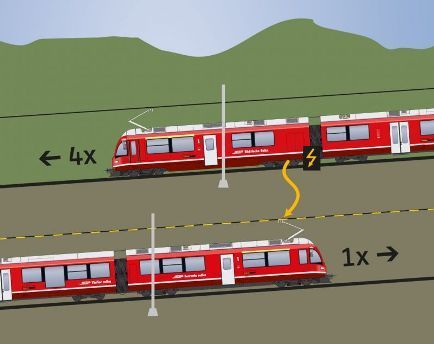


Рисунок 3 – Рекуперация энергии торможения в сеть

## Рекуперация в маховик

Способ отдачи энергии в сеть оказывается нерациональным, когда возникает вопрос одновременного выброса энергии со всех потребителей. Кроме того, большинство электрифицированного транспорта имеет рваный ритм движения и непостоянные интервалы ускорения и торможения. Поэтому следующим изобретением стала система рекуперации, в которой рекуперируемая энергия раскручивала маховик, кинетическая энергия вращения которого затем использовалась для разгона. Изначально применение система нашла в строительной технике, представленной на рисунке 4, где вращающиеся крупные маховики передавали энергию через гидравлические или электрические системы [6]. В наши дни маховичные накопители энергии крупных размеров находят активное применение в вагонах метро, мусоровозах и грузовиках.



Рисунок 4 – Рекуперация в строительной технике

Значительные размеры маховиков с течением времени уменьшили, стали делать маховики из нитей, поместили их в вакуумный контейнер, добавили газовые подшипники. Преимуществом стала высокая емкость накопления энергии, однако недостатками так и остались гироскопический эффект и высокие потери в подвеске маховика, сложная конструкторская реализация. В результате в автомобилях и в мобильной технике применение маховика, представленного на рисунке 5, осталось узкоспецифичным и дорогим решением, реализованным в основном на машинах Формулы-1, Porsche, Ferrari.

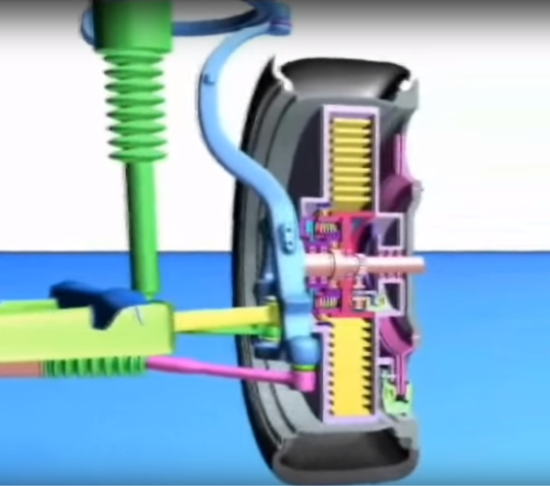


Рисунок 5 – Маховик

## Пневмогидравлическая рекуперация

## Пневмогидравлическая рекуперация

Рекуперация энергии торможения повсеместно используется в современных гибридных автомобилях и электромобилях. Энергия торможения запасается в аккумуляторах электромобиля и в дальнейшем повторно используется.

В виду того, что на МКС бортовая сеть обеспечивает российский сегмент бесперебойным питанием и что разработка электроники для преобразования и накопления рекуперативной электрической энергии в аккумуляторах очень трудозатратна, принято решение не устанавливать в системе силового многофункционального тренажера аккумуляторных батарей, а ограничиться использованием балластных резисторов.

Процесс устранения избыточной энергии из системы способен привести к значительному электромагнитному излучению, а в случае потери контроля над алгоритмом управления и к выходу из строя всей электроники в целом. В связи с этим к алгоритму управления цепью с балластными резисторами предъявляются повышенные требования по качеству работы.

Алгоритм управления цепью с балластными резисторами состоит из наблюдения за общим уровнем напряжения питания и потребляемого тока в системе и включения ветви схемы с балластниками по достижению установленного граничного значения напряжения питания в системе. Включение балластной цепи может осуществляться в релейном режиме, по гистерезисному закону, по закону широтно-импульсной модуляции.

В случае релейного режима при малейшем превышении порога, равном номинальному напряжению питания, происходит открытие балластной цепи. Недостаток алгоритма состоит в очень частой смене состояний включения и выключения цепи нагрузки, что с аппаратной точки зрения приводит к появлению большого количества пульсаций напряжения питания. 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.

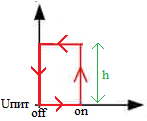


Рисунок 6 – Гистерезисный закон управления

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

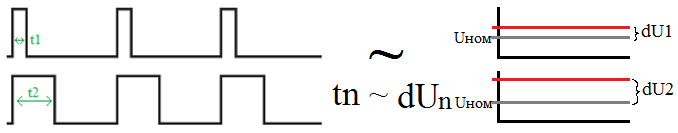


Рисунок 7 – ШИМ управление

## Электромагнитная совместимость

Электромагнитная совместимость характеризуется помехоустойчивостью электронного оборудования к импульсным помехам сети питания, а также уровнем собственных импульсных помех, измеряемых на цепях питания [7]. 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 [8]. Задача достижения электромагнитной совместимости состоит в уменьшении обоюдного влияния систем друг на друга. Структурная схема взаимного влияния двух систем представлена на рисунке 4.

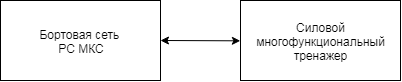


Рисунок 8 – Структурная схема взаимного влияния

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» [9]. 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 [10]. 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.

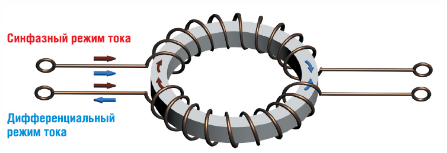


Рисунок 5 – Структура и принцип работы синфазного дросселя

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.

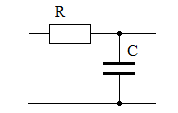


Рисунок 6 – Фильтр нижних частот

Подбирая параметры R, C достигают значения частоты среза фильтра, рассчитываемой по (1), выше которой подавляются электромагнитные высокочастотные помехи, как на входе, так и на выходе цепей питания [11].

|  |  |
| --- | --- |
|  | (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 [12]. Графическое изображение экранирования представлено на рисунке 7.

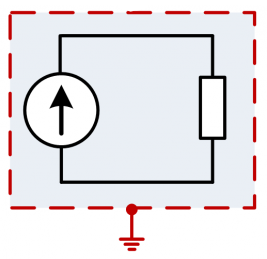


Рисунок 7 – Экранирование и заземление

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 [13].

## Целостность питания

Проблема целостности питания вызвана такими аспектами, как плотность рассеиваемой мощности, многообразие шин питания и наличие шумов. Обеспечение целостности питания позволит микросхемам получать стабильное напряжение, что позволит формировать устойчивые информационные и тактовые сигналы в сигнальных цепях схемы [14]. Достижение целостности питания заключается в равномерном распределении импеданса, рассчитываемого по (2), по схеме питания [15]. Не позволяет достигнуть равномерного распределения избыточная индуктивность, устранить которую становится возможным лишь установкой дополнительных развязывающих конденсаторов, которые компенсируют лишнюю индуктивность.

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

В процессе проектирования электронного устройства полигоны цепей питания подлежат тщательному исследованию и моделированию. Участки с неравномерной индуктивностью могут создавать как слишком узкие места в полигонах питания, так и слишком широкие, и отдаленные. Неравномерно распределенный импеданс цепей питания может привести к генерации импульсных помех большой величины, что повлечет за собой не только сбои в работе микросхем, но и значительное излучение электромагнитного поля.

## 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 СМТ, представленного на рисунке 8, с бортовой сетью питания РС МКС. Система сопряжения представляет собой сочетание аппаратных и программных средств, направленных на достижение совместимости в цепях питания СМТ 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 8 – Силовой многофункциональный тренажер

Входящая в состав СМТ электроника состоит из правого и левого двигателей, плат драйверов управления двигателями, платы интерфейсной, пульта управления и системы тензоизмерений. Структурная схема электронных компонентов в составе СМТ представлена на рисунке 9. Плата интерфейсная отвечает за сбор данных с плат драйверов двигателей и с системы тензоизмерений. Пульта управления осуществляет отправку команд и сбор статистики работы всех элементов системы.

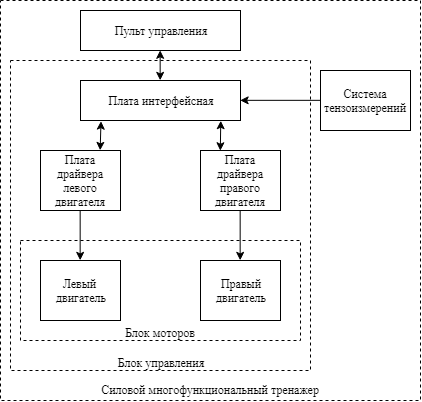


Рисунок 9 – Структурная схема электронных компонентов СМТ

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 9. Подключение силового многофункционального тренажера к бортовой сети питания осуществляется с помощью кабеля питания, подключаемого к блоку управления.



Рисунок 9 – Блок управления

Блок управления состоит из блока синхронных двигателей с постоянными магнитами и блока электроники.

Блок синхронных двигателей с постоянными магнитами, представленный на рисунке 10, содержит в своем составе два синхронных вентильных электродвигателя с постоянными магнитами.



Рисунок 10 – Блок моторов

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 [16], которая является источником распространения электромагнитных помех и при этом потенциально способна оказывать влияние на внутренний токовый контур системы управления. Схема распределения вырабатываемой мощности представлена на рисунке 11. 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 на платах управления двигателями, 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.



Рисунок 11 – Схема распределения мощности в приводной системе

Прикладываемое механическое усилие преобразуется в механическую энергию, которая характеризуется параметром механической мощности Wмех, вычисление которой осуществляется по (3). Механическая мощность перераспределяется в приводной системе в следующих её компонентах:

* в виде тепловой энергии в обмотках двигателя Wобм, вычисление которой осуществляется по (4);
* в виде тепловой энергии выделяемой на балластных резисторах Wбалласт, вычисление которой осуществляется по (5);

(3)

(4)

(5)

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.

Блок электроники, представленный на рисунке 12, содержит в себе платы драйверов управления двигателями, плату интерфейсную и плату управления вентилятором.



Рисунок 12 – 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 13. К плате драйвера подключаются балластные резисторы, на которых осуществляется диссипация избыточной электромагнитной энергии в системе управления двигателем.



Рисунок 13 – Плата драйвера

Плата интерфейсная, представленная на рисунке 14, 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.

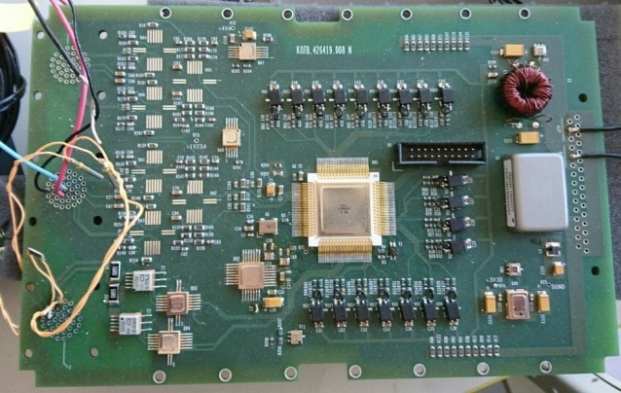


Рисунок 14 – Плата интерфейсная

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 15. Он предназначен для фильтрации входного напряжения, а также для диссипации электрической энергии на балластных резисторах. Блок фильтров состоит из четырех последовательно соединенных модулей питания и десяти балластных резисторов.

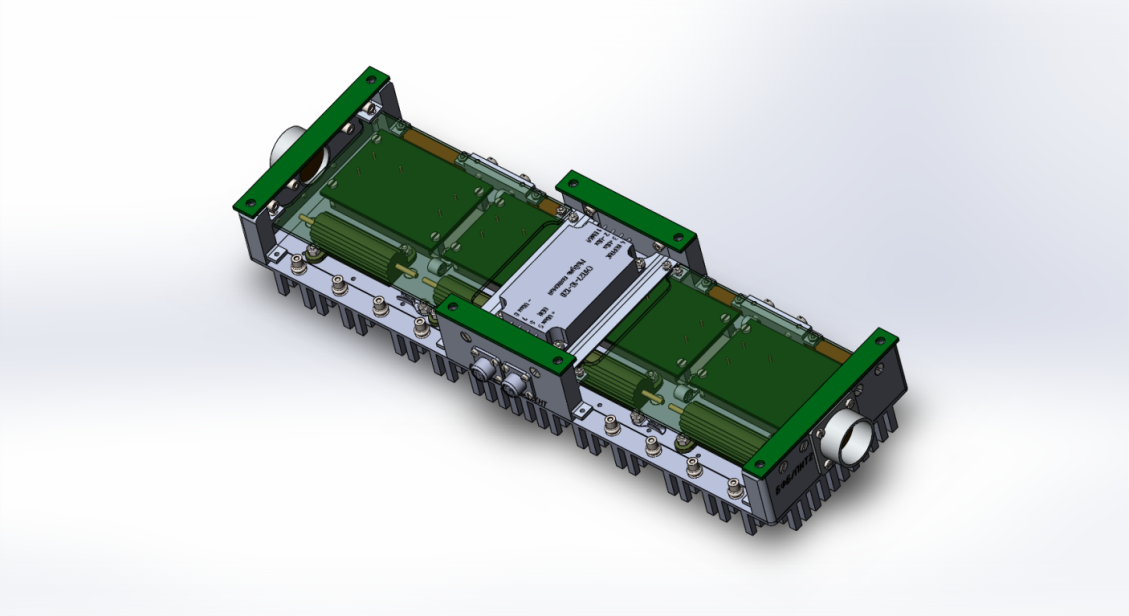


Рисунок 15 – Блок фильтров и балластных сопротивлений

На плате интерфейсной реализована система аппаратной фильтрации входного и выходного напряжения, представленная на рисунке 16. 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. Также предусмотрено экранирование платы интерфейсной помещением её в металлический корпус. Для решения задачи экранирования на плате введен дополнительный слой EGND, который винтами соединяется с корпусом изделия.



Рисунок 16 – 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 17. 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. На плате драйвера решения задачи экранирования осуществляется также с помощью введения дополнительного слоя EGND по контуру платы, который винтами соединяется с корпусом изделия.



Рисунок 17 – 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, схема которого представлена на рисунке 18.



Рисунок 18 – 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 19, 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 19 – Цепь подключения балластных резисторов

## Программное решение системы сопряжения

Программная часть системы сопряжения состоит в реализации алгоритма управления коммутаторной балластной цепью, представленной на рисунке 15. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 20.

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.

Вводится звено с зоной нечувствительности, применяемый режим переключения становится гистерезисным. Включение цепи происходит не по достижению порогового значения, а с учетом ширины петли гистерезиса.

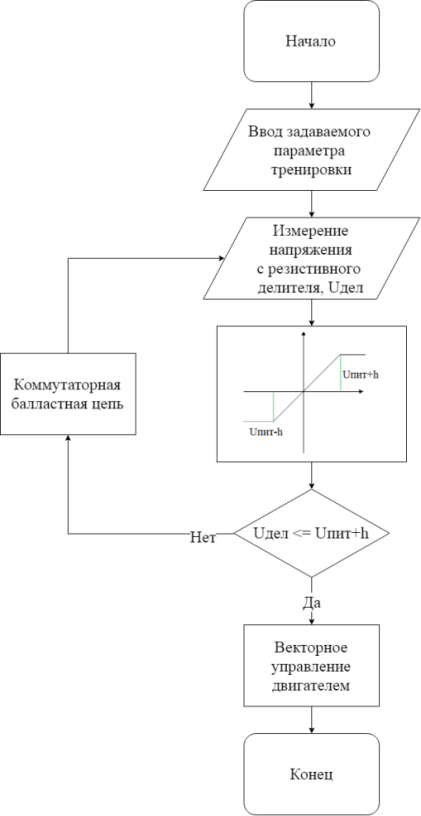


Рисунок 20 – Блок-схема алгоритма тренировки

## 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

Рассмотренные аппаратные и программные решения системы сопряжения позволяют достигнуть совместимости в цепях питания технических систем и решить проблемы, связанные с необходимостью устранения избыточной энергии, электромагнитной совместимостью и целостностью питания. Построим программу испытаний для каждого решения в отдельности. Для определения количественной оценки качества воспользуемся техническими требованиями из технического задания на разработку силового многофункционального тренажера.

## Устранение избыточной энергии

Устранение избыточной энергии осуществляют с помощью переключения балластной цепи по гистерезисному закону. Балластная цепь находится во внутреннем электрическом контуре управления двигателем. В момент открытия балластной цепи происходит протекание тока величиной в 10 А, направление протекания которого остается неопределенным. Балластный ток может негативно повлиять как на токовый контур управления двигателем, так и на распределение токов в цепях электродвигателя. Появление неопределенности в системе управления недопустимо. Поэтому исследование влияния балластного тока на токовый контур управления и на ток электродвигателя во многом определит качество работы системы управления силового многофункционального тренажера.

Для проведения исследований необходимо:

* построить модель векторного управления;
* ввести балластную цепь в контур управления;
* замкнуть балластную цепь и наблюдать за распределением токов в фазных обмотках двигателей;
* при регулировании тока замкнуть балластную цепь и наблюдать за работой регулятора тока;
* провести анализ результатов.

## Электромагнитная совместимость

Согласно требованиям радиоэлектронной защиты в техническом задании силовой многофункциональный тренажер должен функционировать в условиях электромагнитной обстановки, возникающей при его совместной работе на МКС, и не должен создавать помех другим техническим средствам [16]. Рабочая частота драйверов двигателей составляет 13 кГц.

Напряженность электрического поля излучаемых электромагнитных помех не должна превышать 36 мкВ/м при рабочей частоте 13 кГц [17]. Основными источниками электромагнитных помех являются электродвигатели, плата интерфейсная и платы драйверов управления двигателя. Необходимо определить суммарное значение напряженности излучаемого электромагнитного поля. Величина напряженности зависит от величины тока. Согласно техническому заданию электродвигатель силового многофункционального тренажера должен создавать момент вращения не менее 230 кгс.

Для проведения исследований необходимо:

* провести моделирование электродвигателя в программе FEMM;
* определить при каком токе электродвигатель разовьет требуемый момент;
* провести моделирование платы интерфейсной и плат управления электродвигателей на предмет электромагнитного излучения;
* определить суммарное значение напряженности;
* сравнить полученные значения с требуемыми ограничениями.

Реализованные аппаратные решения системы сопряжения можно считать эффективными, только если значение напряженности поля не будет превышать заданное в техническом задании.

## Целостность питания

Согласно техническому заданию напряжение кондуктивных помех, создаваемых силовым многофункциональным тренажером, не должно превышать 103 мкВ при рабочей частоте 13 кГц [17]. Потенциальным источником кондуктивных помех является плата управления электродвигателем, на которой на частоте 13 кГц происходит коммутация обмоток под напряжением 27 В. Чтобы определить амплитуду кондуктивных помех необходимо построить амплитудно-частотную характеристику распределения импеданса в цепях питания на печатной плате управления электродвигателем.

Для проведения исследований необходимо:

* провести моделирование платы управления электродвигателями;
* построить амплитудно-частотную характеристику распределения импеданса;
* определить частоту резонанса;
* рассчитать величину амплитуды напряжения на частоте резонанса на основе знания величины тока из предыдущих исследований;
* сравнить полученное значение с требуемыми ограничениями.

Реализованные аппаратные решения системы сопряжения можно считать эффективными, только если значение кондуктивной помехи не будет превышать заданное в техническом задании.

## 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

# 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 21.



Рисунок 21 – Чертеж ротора и статора электродвигателя

Проведем исследование электродвигателя в программе моделирования FEMM, рассчитаем статическое магнитное поле электродвигателя [18]. Сначала разобьём модель на конечные элементы [19]. Результат разбиения представлен на рисунке 22.

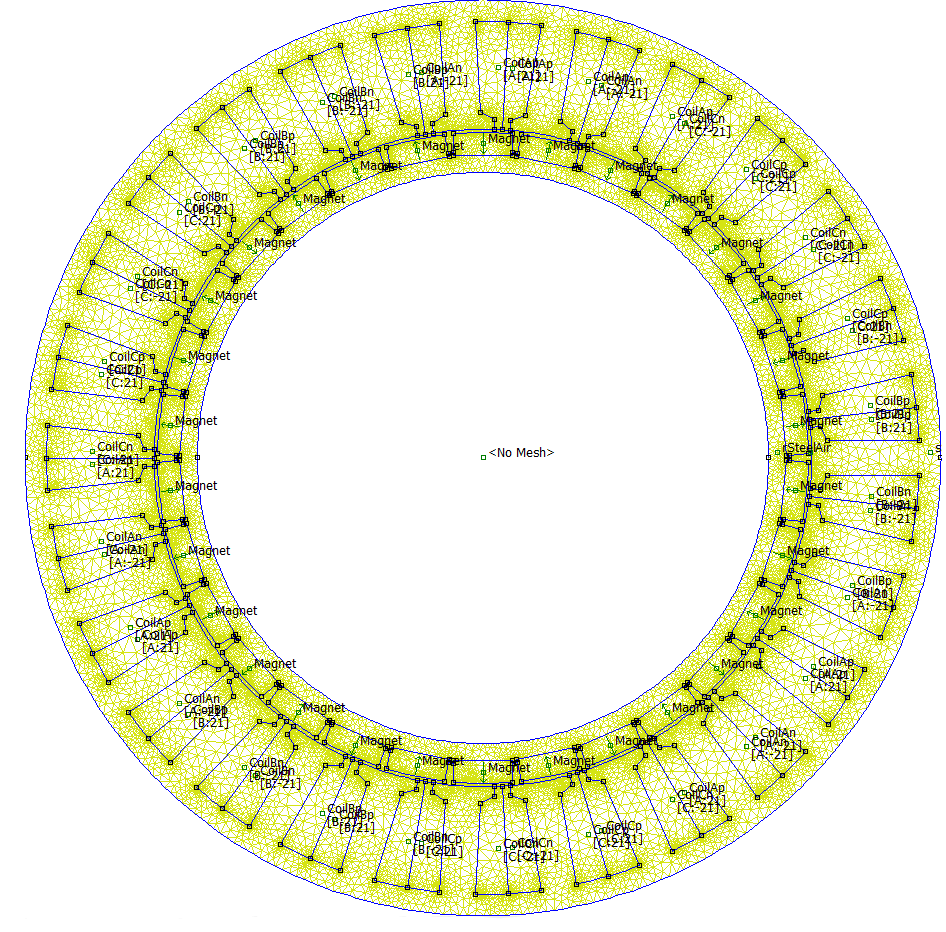


Рисунок 22 – Результат разбиения на конечные элементы

Целью исследований является определения величины тока, которого будет достаточно для того, чтобы электродвигатель тренажера развил момент величиной в 230 кгс, и напряженности излучаемого электромагнитного поля при этом значении тока. Возьмем для начала величину тока равной 20 А. Зададим противоположный по знаку ток в фазах В и С и устраним ток в фазе А для сохранения общей суммы токов в обмотках равной нулю. Задаваемые параметры токов в программе представлены н рисунке 23.

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |

Рисунок 23 – Величины токов фаз двигателя

Картина напряженности электромагнитного поля представлена на рисунке 24. Напряжённость магнитного поля сконцентрирована внутри воздушного зазора двигателя и не выходит за пределы статора.

Величина результирующего момента представлена на рисунке 25 и равна 25 Н\*м.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Рисунок 24 – Картина напряженности электромагнитного поля

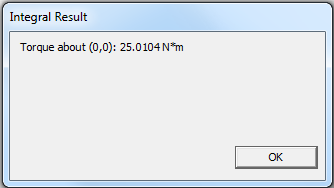


Рисунок 25 – Величина результирующего момента

## Выводы по разделу

Полученное значение величины тока теперь можно использовать в дальнейших исследованиях. Полученные значение напряженности необходимо учесть в общей сумме.

Перейдем к исследованию электромагнитной совместимости и целостности питания печатных плат.

# 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

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.

## 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 обращения 21.05.2019).
2. Информационный портал ELQUANTA. [Электронный ресурс] URL: https://elquanta.ru/teoriya/rekuperaciya.html (дата обращения 21.05.2019).
3. Официальный сайт [КИНЕМАК](http://www.kinemak.ru/) [ThemeGrill](http://themegrill.com/). [Электронный ресурс] URL: <http://www.kinemak.ru/?page_id=35> (дата обращения 21.05.2019).
4. 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.
5. Информационный портал Wikireading.ru [Электронный ресурс] URL: <https://tech.wikireading.ru/3521> (дата обращения 21.05.2019).
6. Информационный портал КОЛЕСА.RU [Электронный ресурс] URL: <https://www.kolesa.ru/article/tormozit-i-zapasat-sistemy-rekuperacii-v-sovremennyh-mashinah-2015-12-03> (дата обращения 21.05.2019).
7. ГОСТ 33991-2016 Электрооборудование автомобильных транспортных средств. Электромагнитная совместимость. Помехи в цепях. Требования и методы испытаний.
8. Сборник «Электромагнитная cовмеcтимоcть в электронике» [Электронный ресурс] URL: <https://www.nasa.gov/mission_pages/> station/research/experiments/976.html (дата обращения 21.05.2019).
9. Информационный портал ZAOCHNIK. [Электронный ресурс] URL: <https://zaochnik.com/spravochnik/fizika/magnitnoe-pole/naprjazhennost-magnitnogo-polja/> (дата обращения 21.05.2019).
10. Официальный сайт КОМПЭЛ [Электронный ресурс] URL: <https://www.compel.ru/lib/ne/2014/5/6-sinfaznyie-drosseli-kompanii-sumida-dlya-poverhnostnogo-montazha> (дата обращения 21.05.2019).
11. Информационный портал ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОАКУСТИКИ. [Электронный ресурс] URL: <http://audioakustika.ru/node/1450> (дата обращения 21.05.2019).
12. Информационный портал L-CARD. [Электронный ресурс] URL: <http://www.lcard.ru/lexicon/shielding> (дата обращения 21.05.2019).
13. Информационный портал CТУДМИ. [Электронный ресурс] URL: <https://studme.org/>shielding (дата обращения 21.05.2019).
14. Информационный портал ВРЕМЯ ЭЛЕКТРОНИКИ. [Электронный ресурс] URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2327/doc/52968/> (дата обращения 21.05.2019).
15. Тепикин, А.И. Обеспечение целостности питания и сигналов на практике / А.И. Тепикин // Электронные компоненты. – 2018. - №8. – С.10-14.
16. 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.
17. СИЛОВОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ТРЕНАЖЕР «СМТ». Пояснительная записка СМЕ01.00.000 ПЗ – 2015 г.
18. Милых В.И., Полякова Н.В. Автоматизированные расчеты в программной среде FEMM динамики электромагнитных процессов турбогенераторов / Милых В.И., Полякова Н.В. // Электротехника и электромеханика. – 2015. - №6. – С.24-30.
19. Володин В. Моделирование в программе FEMM. Краткая пошаговая инструкция. [Электронный ресурс] URL: [http://valvolodin.narod.ru/ articles/femm\_mod.pdf](http://valvolodin.narod.ru/%20articles/femm_mod.pdf) (дата обращения 21.05.2019).
20. Презентация Johnson Space Center [Электронный ресурс] URL: http://www.hunchdesign.com/uploads/2/2/0/9/22093000/cevis\_handles\_presentation.pdf (дата обращения 06.06.2018).