

ПРОЕКТ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ  
дисциплины  
*«ЦИФРОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»*  
для подготовки бакалавров  
по направлению  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
по профилю  
«Электропривод и автоматика»

старший преподаватель Прокшин А.Н.  
кафедра РАПС

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Санкт-Петербург  
2022

# 1 СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Обеспечивающий факультет	ФЭ
Обеспечивающая кафедра	РАПС
Общая трудоемкость (ЗЕТ)	3
Курс	3
Семестр	5
<b>Виды занятий</b>	
Лекции (академ. часов)	34
Лабораторные занятия (академ. часов)	
Практические занятия (академ. часов)	17
Иная контактная работа (академ. часов)	1
Все контактные часы (академ. часов)	52
Самостоятельная работа, включая часы на контроль (академ. часов)	56
Всего (академ. часов)	108
<b>Вид промежуточной аттестации</b>	
Зачет с оценкой (курс)	3
Курсовая работа (курс)	

## **2 АННОТАЦИЯ ДИСЦИПЛИНЫ «ЦИФРОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»**

Изучаются архитектура современных цифровых систем управления с микроконтроллерами, основные этапы анализа, синтеза и проектирования таких систем. Подробно рассматриваются вопросы математического описания систем управления с микроконтроллерами, анализ и синтез с использованием методов как классической, так и современной теории управления. Теоретическая часть курса сопровождается практическими и лабораторными занятиями для практического освоения изученного материала.

### **3 Актуальность**

- упрощение системы управления с использованием ковариантных (измеряемых) и контравариантных (неизмеряемых) координат;
- создание мобильных лабораторных стендов;
- использование российского программного обеспечения;
- использование российских микроконтроллеров в части задач

## 4 Компетенции

**ОПК-2** Способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач

### Знать

- геометрические основы измерения трехфазного тока
- среды разработки и моделирования встроенного программного обеспечения систем управления электродвигателями, технологическими комплексами

### Уметь

- применить среды разработки и моделирования MexBios Development Studio, SimInTech, Texas Instrument CCS, Motor Control Workbench, GCC toolchain для создания программы управления инвертором электрическими машинами

### Владеть

- настройкой взаимодействия сред разработки с микроконтроллером и конечным оборудованием, отладка, поиск и устранение неисправностей в программе

## **5 Используемые в обучении информационные и «сквозные» технологии, цифровые инструменты**

- Современные проблемы инфраструктуры электродвижения «НП Совет рынка», АО «АТС», криптография ГОСТ, PKI, ocsp, проверка электронных подписей
- 11 тем связанных с изображающими векторами Современная геометрия, ковариантные и контравариантные координаты векторов, двойственные дуальные базисы, overleaf.com, geogebra.com, www.latex4technics.com, <https://www.tflex.com>.
- Преобразование базисов и координат из одной системы в другую Матричный анализ, reduce-algebra, maxima, overleaf.com, geogebra.com, www.latex4technics.com, <https://www.tflex.com>.
- Интегрированные системы программирования микроконтроллеров MexBIOS, среда НПФ Вектор, CodeComposerStudio, STM32CubeIDE, arm-none-eabi-\* toolchain, st-link, DFU
- Принципы работы одно- и трех-фазного мостового инвертора напряжения Моделирование работы инвертора на сервисе кафедры РАПС, geda, ngspice, easyEDA, SimInTech
- Отладка программ и блоков в MexBIOS, SimInTech и в облачных сервисах песочница C, песочница C++, gcc, overleaf.com
- Отчеты оформляются исключительно по ЕСКД latex, overleaf.com
- Исходные коды блоков, шаблоны заданий и отчетов располагаются в системе Git, github.com, песочница C, overleaf.com

## 6 Лекционный блок

**Тема 1** Современные проблемы инфраструктуры электродвижения

- недостаточная мощность и кол-во зарядных станций (преобразователей электрической энергии) для электрических автомобилей, судов
- логистика и планирование заряда/разряда батарей автономного электрического транспорта
- транспондеры, смартконтракты, российская криптография, блокчейн

**Тема 2** Передача активной и реактивной мощности между электрической машиной и промышленной сетью

- изображающие векторы напряжения и тока
- реактивная мощность стекает с повышенного напряжения
- вектор напряжения передающей активную мощность электрической машины обгоняет вектор приемника
- вектор тока одинаков для обеих машин

**Тема 3** Принципы работы однофазного мостового инвертора напряжения

- чисто активная нагрузка,
- нагрузка или источник содержит индуктивность или дроссель,
- работа обратного диода,
- передаваемая мощность при медленно меняющемся токе и быстро меняющемся напряжении в зависимости от скважности

**Тема 4** Принципы работы трехфазного мостового инвертора напряжения

- порядок переключения ключей,
- график токов в фазах при активной нагрузке,
- графики фазных и линейных напряжений,
- изображающие вектора фазных и линейных напряжений и токов

**Тема 5** Работа ключей при векторной широтно-импульсной модуляции в трехфазном мостовом инверторе напряжения

- таблица векторов состояний,
- нулевой вектор состоит из 2-х состояний,
- изображающий вектор как центр тяжести состояний взвешенных по времени нахождения в данном состоянии,
- потенциалы фаз и нуля

**Тема 6** Синусоидальная широтно-импульсная модуляция в однофазном или трехфазном мостовом инверторе напряжения

- наличие реального или «виртуального» нулевого провода,
- отличие активной мощности при синусоидальной и векторной широтно-импульсной модуляциях

**Тема 7** Системы координат. Преобразование базисов и координат из одной системы в другую

- разложение вектора по координатным осям по правилу параллелограмма,
- матрица преобразования

**Тема 8** Системы координат в современной геометрии, косоугольная система координат, ковариантные и контравариантные координаты в косоугольной системе координат

- формула длины вектора в косоугольной системе координат  $|\vec{x}| = \sqrt{x_1x^1 + x_2x^2}$ ,
- скалярное произведение двух векторов  $\vec{x} \cdot \vec{y} = x_iy^i = x^iy_i$ ,
- правило Эйнштейна ,
- сравнение с прямоугольной декартовой системой координат

**Тема 9** Измеряемые мгновенные значения токов и напряжений и их связь с ковариантными координатами

- преобразование Блонделя  $\vec{i} = \frac{2}{3}(i_a\vec{e}_a + i_b\vec{e}_b + i_c\vec{e}_c)$ ,

- формула для  $\vec{i}$  в симметричной системе координат, полусумма контравариантных координат равна контравариантной координате

$$i_a = \frac{1}{2} (i_{\text{в осях AB}}^a + i_{\text{в осях AC}}^a)$$

**Тема 10** Управление ШИМ через центр тяжести весов векторов состояния инвертора и связь с контравариантными координатами

- правило рычага Архимеда для определения цента тяжести весов, векторов состояния инвертора
- матрица преобразования ковариантных (измеренных) координат к контравариантным (координатам управления) изображающего вектора напряжения

**Тема 11** Активная мощность, скалярное произведение в косоугольной системе координат

- физическая величина есть сумма произведений ковариантной и контравариантной координат  $i_k \cdot u^k$ ,
- поднимание и опускание индексов  $i_k \cdot u^k = i^k \cdot u_k$ ,
- линейное напряжение как контравариантная координата в осях фазного тока,
- формула мощности в трехфазной сети через ковариантные и контравариантные координаты

**Тема 12** Реактивная мощность в координатах косоугольной системы

- связь реактивной мощности с векторным произведением

**Тема 13** Напряжение индукции в координатах косоугольной системы

- при неизменном амплитудном значении тока напряжение индукции перпендикулярно вектору тока,
- перпендикуляр к вектору через двойственные координаты  $(I_A, I_B) \cdot (-I^B, I^A)$ , где  $I^i$  в двойственном базисе

**Тема 14** Генерация широтно-импульсной модуляции с помощью таймера, варианты пилообразных сигналов, определение скважностей  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$

- принцип работы таймера, период, время срабатывания таймера,
- виды пилы таймеров,
- запись и извлечение уставок таймера в теневой (shadow) регистра,
- формула перевода весов состояний в уставки таймеров  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$

**Тема 15** Использование неопределенности скважностей  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  для уменьшения нагрева силовых ключей

- мощность потерь силовых ключей,
- спектральный состав

**Тема 16** Аналогово-цифровое преобразование

- принцип работы АЦП,
- зависимость точности АЦП от времени оцифровки,
- запуск АЦП от прерывания ШИМ

**Тема 17** Интегрированные системы программирования микроконтроллеров

- российские системы MexBIOS, VectorIDE, SimInTech
- зарубежные системы фирм Texas Instrument, STM, Infineon

**Тема 18** Построение систем управления в MexBIOS

- распределение памяти в микроконтроллере,
- драйверы GPIO,
- драйверы АЦП,
- драйверы ШИМ,
- драйверы SPI,
- осциллограф,
- блоки управления

**Тема 19** Написание пользовательских блоков в системе MexBIOS

- переменные портов ввода-вывода

- внутренние переменные
- компиляция блоков, библиотек, ядра системы

## Тема 20 Отладка программ и блоков в MexBIOS

- отладка алгоритмов в облачных песочницах
- отладка вызова прерываний и вызовов блоков в MexBIOS
- отладка алгоритмов вне среды MexBIOS с помощью программ C/C++
- отладка программ с помощью осциллографа

## 7 Практические занятия

**Пр. 1** Получение зависимости  $T_A, T_B, T_C$  в трехфазной симметричной системе через измеренные значения фазных токов/линейных напряжений

- вывод и проверка зависимости с помощью reduce-algebra, latex overleaf.com
- вывод и проверка сложения  $L \frac{\partial \vec{i}}{\partial t}$  и вектора напряжения  $\vec{u}$

**Пр. 2** Основы работы с MexBIOS, загрузка программы в микроконтроллер через st-link, usb, jtag, x100/x200

- произвести загрузку программы на микроконтроллер используя интерфейс указанный в варианте
- контроль - микроконтроллер производит выдачу светового сигнала в соответствии с вариантом

**Пр. 3** Информационный обмен с микроконтроллером с использованием MexBIOS, связь через com-port, usb, ethernet

- произвести загрузку управляющей программы на микроконтроллер
- произвести осциллографирование нажатия кнопки используя интерфейс указанный в варианте

## 8 Кейсы

**Кейс 1** Создание программы для управления асинхронным двигателем

- Моделирование системы управления инвертором в средах ngspice, MexBIOS или SimInTech
- Загрузка программы в микроконтроллер и управление асинхронным двигателем

**Кейс 2** Создание программы для управления инвертором, сопряженным с трехфазной сетью

- Моделирование системы управления инвертором в средах ngspice, MexBIOS или SimInTech
- Загрузка программы в микроконтроллер и управление зарядом, разрядом батареи, подключенной с помощью инвертора к трехфазной сети

**Кейс 3** Создание программы для управления синхронным двигателем

- Моделирование системы управления инвертором в средах ngspice, MexBIOS или SimInTech
- Загрузка программы в микроконтроллер и управление синхронным двигателем

**Кейс 4** Создание программы для управления СТАТКОМом

- Моделирование системы управления СТАТКОМом в средах ngspice, MexBIOS или SimInTech
- Загрузка программы в микроконтроллер и управление перетоками реактивной мощности с помощью СТАТКОМ

## 9 Самостоятельная работа студентов

- Отчетность по стандарту ЕСКД и обмен кодом и шаблонами в группах
  - Оформлять отчеты по ЕСКД в latex [overleaf.com](#)
  - обмен кодами и шаблонами в группах вести используя систему контроля версий Git [github.com](#), [gitlab.com](#) или [bitbucket.org](#) с интеграцией с [overleaf.com](#)
- Работа со справочными системами
  - ознакомиться со справочными системами компилятора
  - ознакомиться со справочниками блоков MexBIOS
  - ознакомиться со справочниками блоков SimInTech

## 10 Фонд оценочных средств

- Вопросы выходного контроля
  1. Если уменьшить количество переменных то программа может быть написана более эффективно?
  2. Трехфазная система токов и/или напряжений является декартовой системой?
  3. Измеряемые мгновенные значения тока/напряжения являются перпендикулярными проекциями на оси фаз.
  4. Перпендикулярные проекции на оси фаз А,В являются координатами разложения вектора тока/напряжения по правилу параллелограмма?
  5. Что называется координатами вектора: перпендикулярные проекции или координатами разложения вектора по правилу параллелограмма?
  6. Переход из косоугольной системы координат в декартову систему координат уменьшает количество координат?
  7. Изобразить ковариантные(перпендикулярные проекции на оси фаз) к контравариантные(координаты разложения вектора по правилу параллелограмма) координаты.
  8. Длина вектора в косоугольной системе координат.
  9. Скалярное произведение двух векторов в косоугольной системе координат.
  10. Провести разложение вектора пользуясь только перпендикулярными проекциями вектора на оси фаз.
  11. Двойственный базис, разложение вектора по двойственному базису
  12. Линейное напряжение и фазный ток это проекции на двойственные оси
  13. Производная по координате направлена по двойственному базису и перпендикулярна оси данной координаты.
  14. Производная по времени от вектора с постоянной длиной перпендикулярна самому вектору.
  15. Первая производная в точке касания окружности с центром в точке из которой проведен перпендикуляр к оси совпадает

с этой осью, а вторая производная в точке касания совпадает с перпендикуляром к этой оси.

16. Входные координаты преобразования Кларка являются ковариантными координатами (перпендикулярными проекциями вектора тока на оси фаз).
17. Входные координаты обратного преобразования Кларка являются контравариантными координатами (координатами разложения вектора по правилу параллелограмма).
18. Преобразование ковариантных координат в контравариантные и обратно.
19. Состояния ключей трехфазного инвертора и потенциал в каждой из фаз.
20. Векторная диаграмма тока и напряжений трехфазных двух электрических машин, соединенных дросселем.
21. Активная мощность и её связь со скалярным произведением тока и напряжения
22. Мощность трехфазной электрической машины и связь мощности со скалярным произведением двойственных координат тока и напряжения.
23. Компилятор toolchain.
24. Организация памяти микроконтроллера.
25. Реализация ШИМ средствами таймера.
26. Принцип работы аналого-цифрового преобразователя и его настройка.
27. GPIO и его настройка.
28. Передача входных параметров в блоке MexBIOS
29. Выходные параметры в блоке MexBIOS
30. Квант времени в блоке MexBIOS
31. Цифровой фильтр для выделения частоты

- Для кейса должен быть достигнут результат управления с помощью инвертора электрической машиной:
  - Асинхронный, синхронный двигатель должны вращаться в указанном направлении и выдавать указанную мощность
  - Активная мощность для заряда или разряда батареи должна течь в указанном направлении и выдавать указанную мощность
  - Реактивная мощность в СТАТКОМ должна течь в указанном направлении и выдавать указанную реактивную мощность

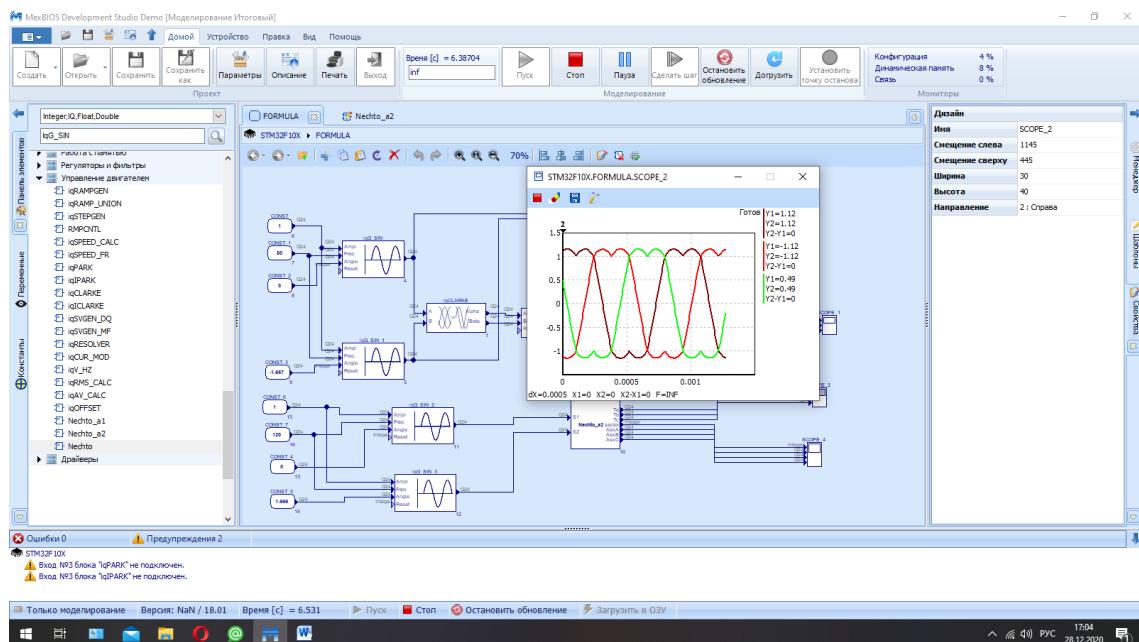


Рис. 1: проверка алгоритма с использованием ковариантных и контравариантных координат для управления двигателем в среде MexBIOS



Рис. 2: результат работы программы на stm32f103c8t6 для кейса №1



Рис. 3: фазный ток и линейное напряжение на выходе инвертора

## 11 Учебно-методическое и информационное обеспечение

- Перечень основной учебной литературы
  1. Прокшин А.Н. и др. Измерение тока и напряжения в **косоугольных координатах** в трехфазной обобщенной электрической машине XXIV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2021)
  2. Прокшин А.Н. и др. Создание и апробирование **лабораторных работ по дисциплине «микроконтроллеры»** и «цифровая и микропроцессорная техника в управлении» Сборник докладов 72 научно-технической конференции ППС, 2019г, с. 134-138
  3. Прокшин А.Н. и др. **Создание лабораторных работ** по дисциплине «Цифровая и микропроцессорная техника в управлении» с использованием российского программного обеспечения «MexBIOS Development Studio 6.21»
  4. Прокшин А.Н. и др. О системах координат для математического описания систем управления электропривода Сборник докладов 71-й научно-технической конференции ППС, СПб, 2018, с.172-175
  5. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учебник для студ. высш.учеб.заведений. – М. «Академия», 2007 - 272 с.
  6. Ю.Н. Калачев SimInTech: моделирование в электроприводе – М.изд. ДМК, 2019 – 95 с.
  7. С.Г.Герман-Галкин и др. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech – М.изд. ДМК, 2020 – 494 с.
- Перечень дополнительной литературы
  1. А.А.Горев Переходные процессы синхронной машины – М.,Л., Гос. энергетическое изд., 1950. – 551 с.
  2. Программа для векторной широтно-импульсной модуляции для системы управления трехфазной электрической машиной с использованием **ковариантных и контравариантных координат изображающего вектора**. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020662398 от 13 октября 2020
  3. Программа для системы управления трехфазной электрической машиной с векторной широтно-импульсной модуляцией. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020662398 от 13 октября 2020
  4. **Веб интерфейс к ngspice** (NG-Spice web interface). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
- Учебно-методическое и информационное обеспечение
  1. **overleaf** или **sharelatex**
  2. **github, gitlab, bitbucket**
  3. **MexBIOS**

4. SimInTech
5. песочница С
6. easyEDA