

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Общая теория электромеханического преобразования энергии
(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Современные методы диагностики электроприводных систем»

Студент

А.В. Асташкин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

В.В. Ермаков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы к.т.н., профессор В.В. Ермаков

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2017 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2017 г.

Тольятти 2017

Содержание

Введение.....	4
1 Аналитический обзор. Алгоритмы управления двигателем постоянного тока.....	11
1.1 Общие понятия.....	11
1.2 Прямое изменение коэффициента заполнения.....	12
1.3 Контроль коммутации коллекторных пластин.....	17
1.4 Прямое измерение противо-ЭДС.....	23
1.5 Контроль напряжения.....	29
1.6 Измерение скорости вращения аналоговым датчиком.....	39
1.7 Фазовая автоподстройка частоты вращения.....	42
1.8 Положительная обратная связь по силе тока якоря.....	44
1.9 Наблюдатель противо-ЭДС.....	47
1.10 Системы подчиненного регулирования.....	57
1.11 Выводы.....	83
2 Существующие способы диагностики неисправностей в регуляторах.....	84
2.1. Проверка электронных компонентов по отдельности.....	84
2.2. Проверка функционирования всей панели.....	87
2.3 Выводы.....	89
3 Разработка диагностического стенда.....	90
3.1 Разработка алгоритма работы стенда.....	90
3.2 Разработка усилителя напряжения.....	93
3.3 Разработка принципиальной схемы.....	101
Заключение.....	104
Список использованных источников.....	105

Введение

Актуальность

Развитие современного производства промышленной продукции, повышение продуктивности сельского хозяйства и ускорение перевозок грузов невозможно без регулируемого электропривода. В настоящее время большая часть используемых в промышленности и быту автоматизированных электрических приводов использует электрические двигатели постоянного тока. Системой управления их являются полупроводниковые электронные блоки. Однако, несмотря на то, что в большинстве экономически развитых стран мира массовое производство регулируемых электроприводов постоянного тока прекращен десять лет назад, установленные электроприводы постоянного тока еще долгие годы будут применяться в промышленности, так как их замена требует больших капитальных и организационных затрат, вредит экологии.

Организационные мероприятия по замене устаревших электроприводов ДПТ, кроме НИОКР, пуско-наладки, утилизации, включают еще аффинаж драгоценных металлов содержащихся в электронном блоке. Драгоценными металлами являются: платина, осмий, иридий, рутений, палладий, родий, серебро, золото. Все эти металлы используются как химически пассивные проводники. Металлы платиновой группы (платина, осмий, иридий, рутений, палладий, родий) используются в приборах, где требуется прочность или высокая температура плавления: контакты, переключатели, реле, термодпары, резисторы, микросхемы, конденсаторы, оси приборов с настраиваемыми параметрами. Золото используется там, где кроме химической пассивности требуется еще пластичность. Его можно найти почти в любых типах электронных компонентах. Серебру отдают предпочтение за его дешевизну относительно других пассивных металлов. Поэтому используется в любых типах электронных компонентов и еще в качестве антикоррозионного покрытия проводов, металлических корпусов, охладителей и экранов. Аффинаж

регулируются инструкцией, утвержденной приказом Минфина [2]. Нарушение правил аффинажа наказывается по статье 192 УК РФ и может привести к 5 годам лишения свободы [1].

Так же электронные блоки содержат чрезвычайно опасные вещества:

- бериллий и кадмия оксид в контактах;
- ртуть в малогабаритных реле;
- трихлордифенил и пентахлордифенил в мощных неполярных конденсаторах;
- свинец, оксид свинца и другие его неорганические соединения, литий в припое;
- кадмия стеарат и трикрезилфосфат в пропитке изоляции проводов для гибкости;
- теллур в термопарах;
- мышьяк и селен в полупроводниковых приборах;
- никель в покрытии медных шин;
- стеклоэмаль в проволочных резисторах;
- оксид ванадия в термисторах;
- кадмий в краске, припое, золотистых винтах, контактах;
- оксид хрома в проволочных резисторах и варисторах;
- оксид вандия в полупроводниковых резисторах;
- гидроцианида соли в литиевых батарейках.

Список веществ составлен по трем нормативным документам: ГН 2.2.5.1313-03 [6], СанПиН 2.1.4.1074-01 [5], ГОСТ 12.1.005-88 [57]. Нарушение оборота таких веществ наказывается по статье 247 УК РФ, санкции по которой предусматривают лишение свободы до 8 лет [1].

Жизненный цикл новой системы управления будет значительно меньше. Это вызвано несколькими причинами.

1. Замена металлического корпуса на пластмассовый. Прогресс в области сигнальной и информационной электронике, привёл к уменьшению

размера плат устройства управления. В результате вместо дорогого, но надёжного крепления плат резьбовыми соединениями к металлическим стойкам и корпусу в старых блоках, используется крепление при помощи защёлок к пластмассовому корпусу который, через несколько лет эксплуатации, рассыпается в труху из-за нагрева. В результате платы, просто вываливаются из корпуса. В некоторых случаях пластмассовый корпус блока может одновременно являться несущей конструкцией пускателя на ток в несколько сотен ампер, как в блоке плавного пуска siemens sirius 3rw40. Что приводит к необходимости выкидывать блок в случае деградации контактов пускателя.

2. Увеличение температуры внутри системы управления электроприводом, которая негативно влияет на платы, пластмассу и электронные компоненты. Прогресс производства электронных компонентов приводит к росту их допустимой температуры. Например, электролитические конденсаторы использовались только с максимальной допустимой температурой 85 градусов Цельсия, теперь они в основном производятся с предельно допустимой температурой 105 градусов. Тоже самое происходит с силовыми модулями: новые серии полупроводниковых силовых модулей допускают предельную температуру кристалла (T_j) в 175 градусов, что на 25-50 градусов больше, чем было допустимо в полупроводниковых приборах 20 лет назад. В будущем этот процесс продолжится, ибо начался переход на полупроводниковые приборы на основе карбида кремния, который теоретически допускает поднятие температуры кристалла до 500.

3. Увеличение плотности монтажа. Увеличение плотности монтажа приводит к уменьшению расстояния между выводами элементов электронного устройства, что приводит к их замыканию в случае попадания токопроводящего мусора, например металлической стружки возникающей при металлообработке. Если такое замыкание произошло в цепи измерения напряжения или формирователя управляющих сигналов на силовой модуль, то произойдёт выгорание связанных элементов схемы.

4. Использование электронных компонентов недостаточной мощности. Часто используют резисторы с номинальной мощностью меньше рассеиваемой им при работе, что приводит к превращению в труху платы в области пайки резистора.

5. Уменьшение долговечности электронных компонентов. Например, использование дешёвого порошкового железа вместо дорого феррита приводит к ускорению деградации электронных компонентов.

6. Использование бессвинцовых припоев. Характеристики шва бессвинцовых припоев, возникающие при длительной эксплуатации также хуже, чем у припоев, содержащих свинец. То есть со временем, после нескольких тысяч циклов нагревания-остывания, что неизбежно при перерывах в работе оборудования, так как при работе блок нагревается на несколько десятков градусов, компоненты отваливаются от места пайки.

Все это можно назвать «планируемым устареванием».

Из-за всего выше перечисленного (материальных затрат, аффинажа драгметаллов, утилизации особо опасных отходов и планируемого устаревания новых блоков) имеет смысл восстанавливать системы управления ДПТ. Тем более они будут полностью восстанавливаемыми ещё длительное время, так как в них используются малой степени интеграции и дискретные компоненты.

Задача диагностики неисправностей системы управления электроприводом ДПТ является важной и актуальной.

Цель и задачи исследования

Электропривод, смонтированный в промышленном предприятии, является действующей электроустановкой, то есть совокупностью машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования, предназначенного для преобразования электрической энергии в другой вид энергии, которая находится под напряжением, либо на которую напряжение может быть подано включением коммутационных аппаратов. В большинстве случаев, напряжение

электроустановки ниже 220 кВ. Поэтому эксплуатация, а значит и ремонт их, должно выполняться в соответствии с ПТЭЭП [3] и ПОТЭЭУ [4]. Согласно пункту 5.7 ПОТЭЭУ при работах без снятия напряжения с электроустановки должен назначаться ответственный руководитель, поэтому такие работы выполняются по наряду или распоряжению. При работах по наряду или распоряжению должны назначаться еще четыре работника ответственных за безопасное ведение работ:

- выдающий наряд или отдающий распоряжение;
- допускающий;
- производитель работ;
- член бригады.

Таким образом, диагностика системы управления под силовым напряжением может отнимать рабочее время у 5 человек.

Система управления состоит из двух частей: силовой схемы и плат (панелей или блоков) управления ей с питанием напряжением ниже 42В.

Поэтому целью работы является разработка стенда диагностики платы управления силовой схемой, позволяющая тестировать платы управления без подачи силового напряжения, которая позволит сократить расходы на организационные и технические мероприятия по охране труда в несколько раз при ремонте электропривода, так как работы на вторичных цепях допускается выполнять единолично.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются платы от электроприводов. Они выполняют четыре функции:

- источник вторичного питания;
- сигнализацию и защиту;

- формирователя (усилителя) импульсов управления электронных ключей преобразователя;
- обработка аналоговых сигналов.

Так как теория работы источников вторичного питания, узла сигнализации и защиты и формирователей импульсов не имеет отношения к магистерской программе «Общая теория электромеханического преобразования энергии», то предметом исследования остается только узел обработки (управления) аналоговых сигналов, который для простоты называют регулятором.

Теоретические и методические основы диссертационного исследования

В работе исследуются электрические процессы в электроприводе постоянного тока, общая теория электромеханического преобразования энергии в котором была разработана российскими академиками: Б. С. Якоби и Э. Х. Ленцем. Ими был создан первый в мире, действующий электропривод с двигателем постоянного тока, открыта обратимость электрических машин, реакция якоря, противоЭДС, закон определения направления индукционного тока, связь электрических явлений с тепловыми и, через их посредство, с механическими и т.д. Магнитные свойства ферромагнетиков, то есть материалов, из которых делают двигатели постоянного тока, были исследованы заслуженным профессором Московского университета А. Г. Столетовым. Его именем названа кривая магнитной проницаемости ферромагнетика.

Целью работы является создание стенда симулирующего работу электродвигателя постоянного тока. Это сделать без знания теории автоматизированного управления (ТАУ) невозможно. Основные положения теории были созданы выдающимися российскими учеными 19 и 20 века. Фундаментальные положения ТАУ разработал академик И. А. Вышнеградский. В конце 19 века академик А. М. Ляпунов придумал понятие устойчивости движения. в 1871 году академик П. Л. Чебышев задумался о разработке

пассивного регулятора, обеспечивающего наибольшую точность при заданной конструкции регулятора. Электронику с ТАУ связал А.В. Михайлов. Ему принадлежит идея типизации динамических звеньев. Академик В.В. Солодовников впервые использовал преобразование Лапласа для задач ТАУ, то есть записал уравнения системы управления в операторной форме и разработал основы частные методы анализа.

Разработанный стенд создан при помощи интегральных операционных усилителей и дискретных электронных компонентов.

Научная новизна результатов диссертации и их теоретическая и практическая значимость

В результате исследований, описанных в диссертации, была разработана математическая модель двигателя постоянного тока, пригодная для реализации в стенде диагностики регулятора от системы управления электроприводом постоянного тока. Также была разработана оригинальная схема усилителя напряжения. Эти разработки позволяют создать стенд диагностики электронных блоков, входящих в состав систем управления электроприводами, которые являются более дешевыми, чем существующие. Стенды подобной конструкции, возможно, применять не только при ремонте систем управления двигателями постоянного тока, но и в вентильных электроприводах, например для диагностики регулятора электроприводов ф. indramat. Достоверность результатов доказывается многочисленными временными диаграммами, приведенными в диссертации.

Положения, выносимые на защиту

1. Задача локализации неисправностей в панелях регуляторов от систем управления с отрицательными обратными связями по скорости и току является наиболее важной и сложной.

2. Устройство диагностики системы управления электроприводом должно иметь в своем составе симулятор ДПТ.
3. Симулятор ДПТ возможно создать используя только дискретные компоненты и микросхемы низкой степени интеграции.

Структура и объем работы

Магистерская квалификационная работа состоит из введения, трех разделов основной части, заключения и библиографического списка, куда входит 89 описаний документов. Основная часть пояснительной записки описана на 113 страниц текста, написанного при помощи ЭВМ. Магистерская диссертация содержит 70 рисунков и 3 таблицы. По тематике диссертации было опубликовано две научные статьи [88, 89].

1 Аналитический обзор. Алгоритмы управления двигателем постоянного тока

1.1 Общие понятия

Двигатель постоянного тока, в общем случае, обязательно имеет 2 вывода якоря (ротора) и два вывода обмотки возбуждения. Для возбуждения могут использоваться постоянные магниты вместо обмотки возбуждения или обмотка возбуждения может быть соединена последовательно с якорем, в этом случае двигатель будет иметь только два вывода. Кроме того на двигателе может быть смонтирован тахогенератор для измерения скорости вращения. Из этого следует, что система управления электроприводом ДПТ – это электронный блок, который управляет напряжением на якоре и обмотке возбуждения двигателя в функции:

- сигнала задания;
- напряжения тахогенератора;
- напряжения и тока якоря;
- напряжения и тока обмотки возбуждения.

Каждая из этих переменных, кроме сигнала задания, зависит от напряжения на якоре и обмотке возбуждения, то есть являются сигналами обратной связи. Они могут быть положительными или отрицательными. В электроприводах используются их различные комбинации всех типов. В этой главе исследуется применение в электроприводах этих обратных связей и выявляется их комбинация, которая используется в самых дорогих и сложных для ремонта электроприводах.

1.2 Прямое изменение коэффициента заполнения

Прямое управление отличается простотой конструкции и нестабильной работой при малых оборотах. Чаще всего используется в электроприводах ручного механизированного инструмента, вентиляторах и т. п. системах управления малыми двигателями, так как большие установки требуют защиты от сверхтоков, а значит отрицательной обратной связи по току.

На рисунке 1.1 показана схема электропривода электромиксера МР-1Е(У), производства мичуринского завода Прогресс.

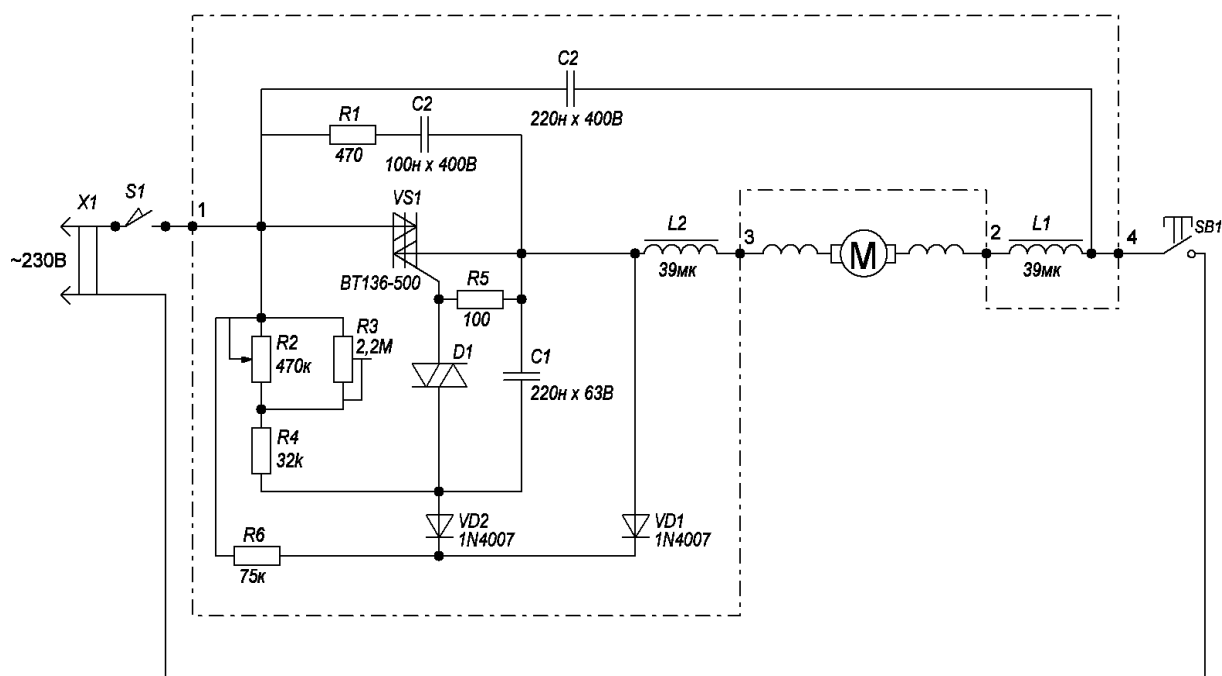


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема электромиксера МР-1Е(У), мичуринский завод Прогресс

Система управления МР-1Е(У) является ведомым сетью выпрямителем с «горизонтальным» СИФУ. Назначение электронных компонентов системы управления:

- S1 – концевой выключатель блокирующий подачу напряжения при неправильной сборке миксера;

- SB1 – кнопка с фиксацией, деблокирующая привод путем подачи напряжения на схему управления;
- C3, L1 и L2 – фильтрация помех от щеток двигателя;
- R1 и C2 – «снаббер», то есть цепочка уменьшающая скорость нарастания напряжения на симисторе до допустимого уровня при запираии;
- R5 – уменьшение чувствительности затвора к шумовому сигналу, требуется для предотвращения ложного срабатывания триака;
- R2, R3, R4, D1, C1 – схема СИФУ с горизонтальным управлением;
- R6, VD2, VD1 – схема компенсации неидеальности тиристора VS1.

СИФУ работает следующим образом. В начале каждого полупериода конденсатор C1 заряжается через резисторы R2, R3, R4. Скорость нарастания напряжения на C1 можно менять при помощи «движка» R2. Чем меньше сопротивление R2 – тем быстрее заряжается конденсатор C1. Когда напряжение на конденсаторе C1 достигнет уровня напряжения пробоя триггер-диода D1, то конденсатор C1 разряжается диностор D1 и затвор VS1.

Схема компенсации неидеальности симметричного тринистора VS1 выполняет две функции.

1. Создает цепь для протекания тока равного току удержания симметричного триггер-триода VS1, тем самым предотвращая запираие его после окончания отпирающего импульса управления. Это происходит за счет цепи R6 и VD1.
 2. Выравнивает угол отпираия триака VS1 при работе в первом и третьем квадранте при помощи цепи протекания тока заряда через R6 и VD2.
- Фотография платы показана на рисунке 1.2.

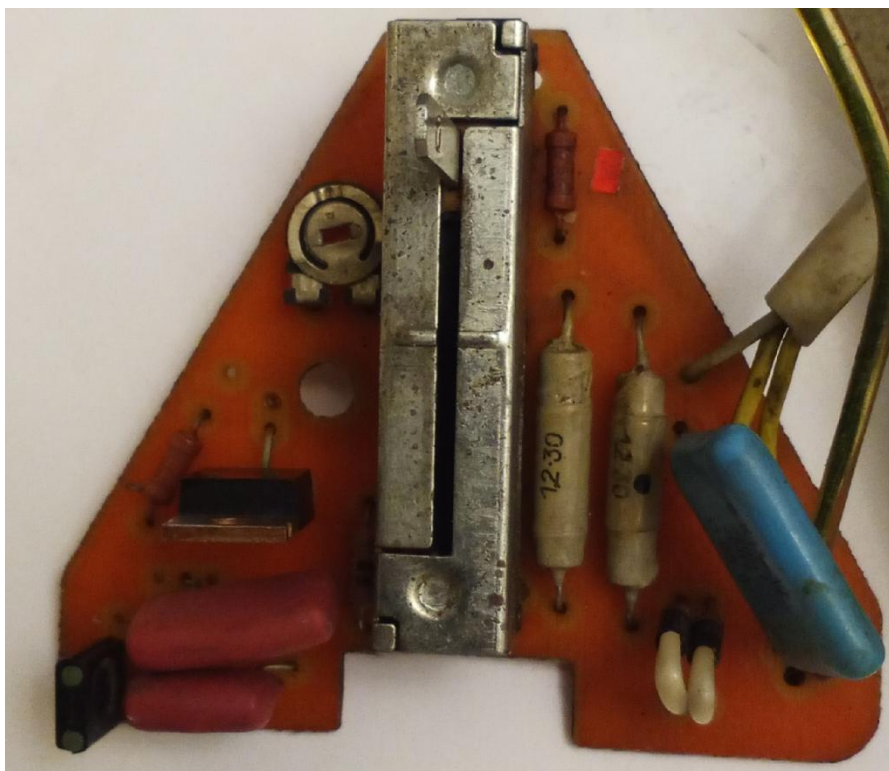


Рисунок 1.2 – Фотография печатной платы системы управления электроприводом электромиксера МР-1Е(У), производства мичуринского завода Прогресс

Из-за того, что R_6 подбирается равным току удержания симметричного тиристора $VS1$ при напряжении приблизительно равном амплитудному значению напряжения сети, то максимальный угол отпирания $VS1$ чуть больше 90 градусов. То есть такая схема обеспечивает регулирование напряжения на нагрузке от 100% до 50% на индуктивную нагрузку.

Похожие схемы используются в слесарном ручном механизированном инструменте. Принципиальная схема электропривода ручной сверлильной машины ИЭ-1505Э, производства саратовского электротехнического завода, показана на рисунке 1.3.

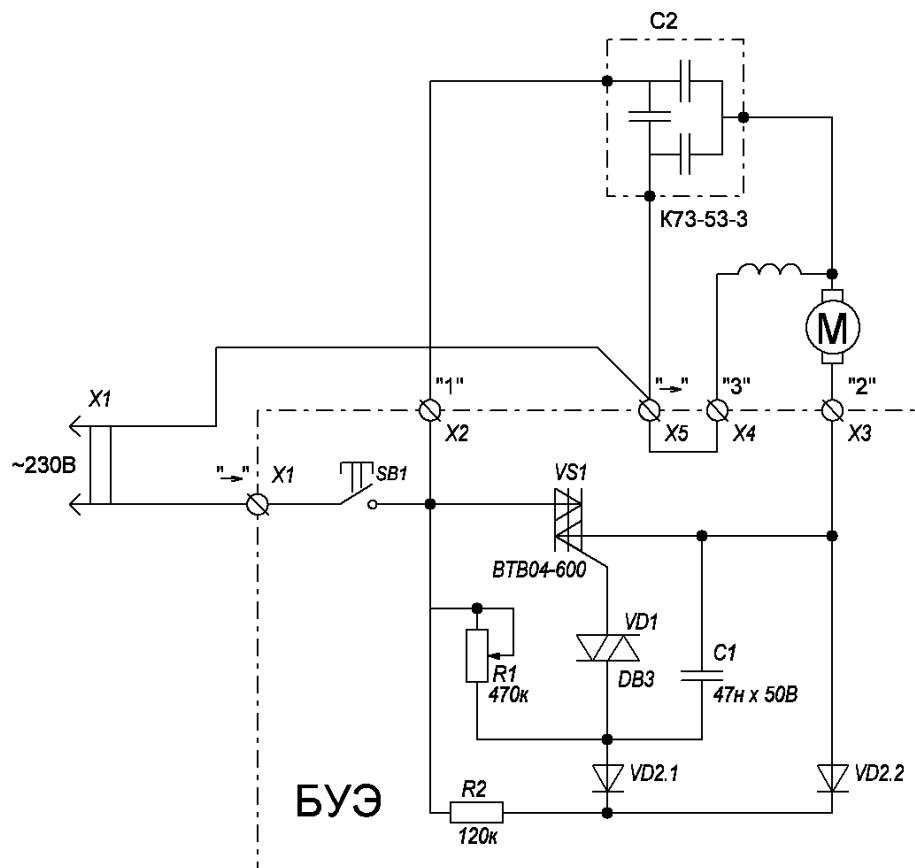


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема ручной сверлильной машины ИЭ-1505Э, производства саратовского электротехнического завода

В этой машине вся статическая система управления помещается в маленькую кнопку, которая называется БУЭ (блок управления электронный). Этого удалось достичь за счет использования электронных компонентов поверхностного монтажа, упрощения снаббера, отсутствия дросселей подавления помех, использования триака с очень низким током управления. Фотография платы БУЭ показана на рисунке 1.4.

Эти схемы путем добавления выпрямительного моста легко дорабатываются до системы управления электродвигателем с независимым возбуждением.

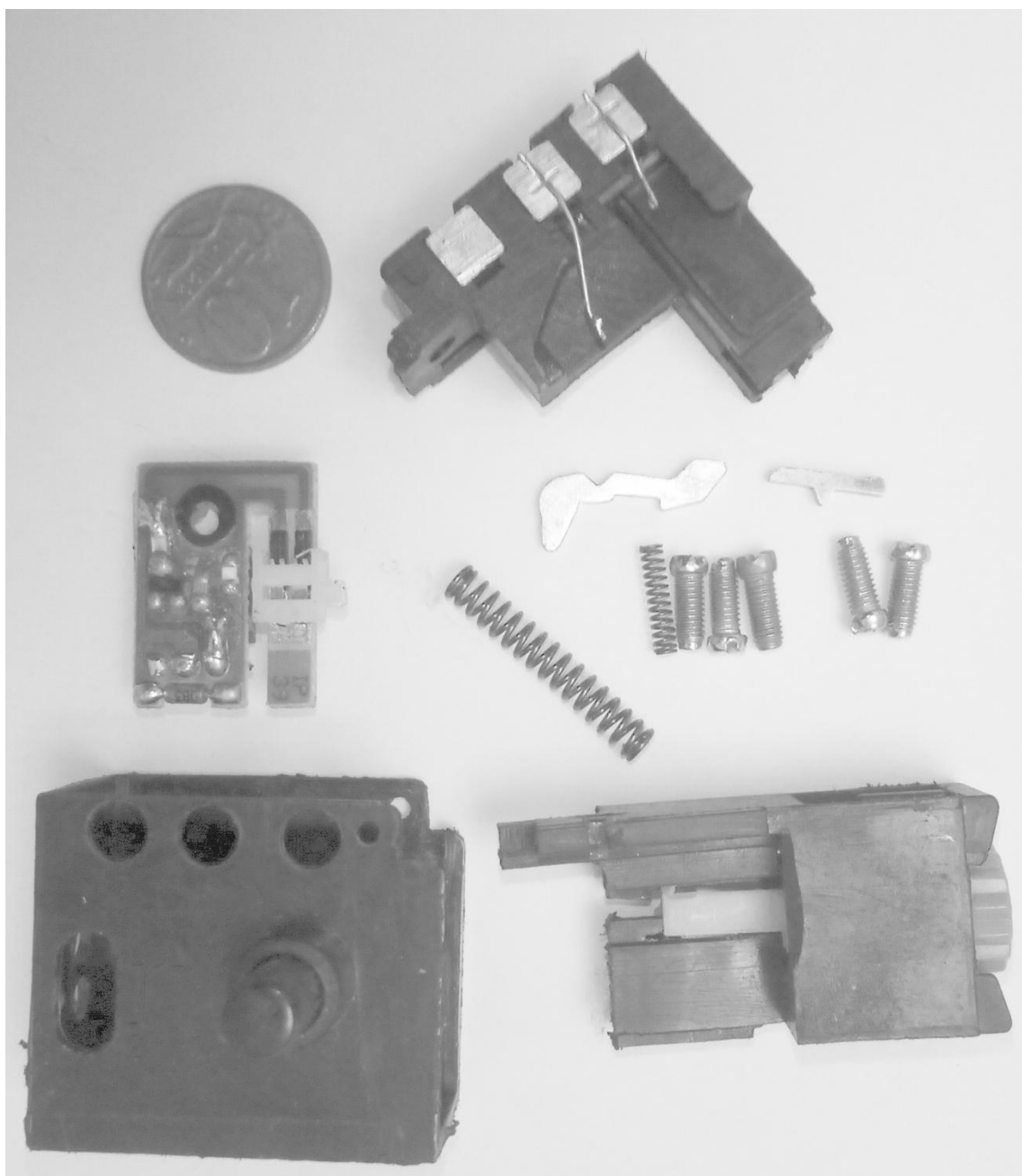


Рисунок 1.4 – Фотография компонентов БУЭ от ручной сверлильной машины ИЭ-1505Э, производства саратовского электротехнического завода

Как видно из вышепоказанных схем, системы управления электродвигателями, осуществляющие прямое управление двигателем без обратных связей являются дешевыми устройствами, которые часто продаются в виде «кнопки» и не работают стабильно на низких оборотах.

1.3 Контроль коммутации коллекторных пластин

Активное сопротивление и индуктивность якоря, а так же мгновенное значение противо-ЭДС ДПТ зависят от угла поворота ротора. Число циклов изменения их значения за один оборот ротора вычисляется по формуле.

$$N = 2Kp, \quad (1.1)$$

где K – число коллекторных пластин;

p – число пар главных полюсов.

График зависимости активного сопротивления и индуктивности якоря двигателя Johnson с2162-60006, максимальной мощности 34 Вт, номинальным напряжением 19 В, индуктивностью якоря 14 мГн и активным сопротивлением 10 Ом, показаны на рисунках 1.5 и 1.6. На них видно, что у маломощных двигателей индуктивность и сопротивление якоря изменяется более чем на 10% во время вращения ротора.

Эти изменения приводят к биению тока якоря во время вращения двигателя. Осциллограммы переменной составляющей тока двигателя Johnson с2162-60006 при питании от импульсного источника напряжения показаны на рисунках 1.7, 1.8, 1.9, 1.10, 1.11.

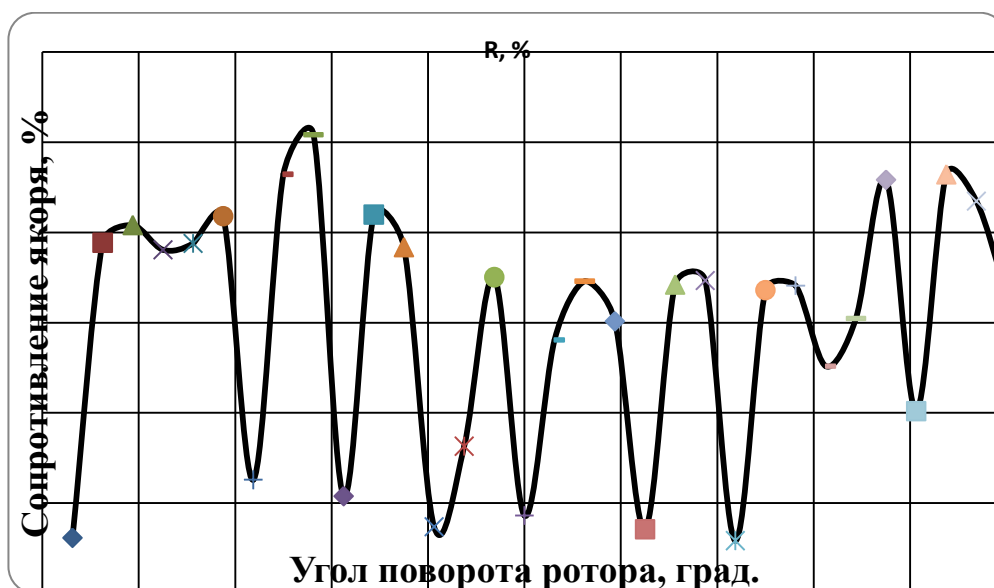


Рисунок 1.5 – Зависимость активного сопротивления якоря двигателя Johnson с2162-60006 от угла поворота ротора

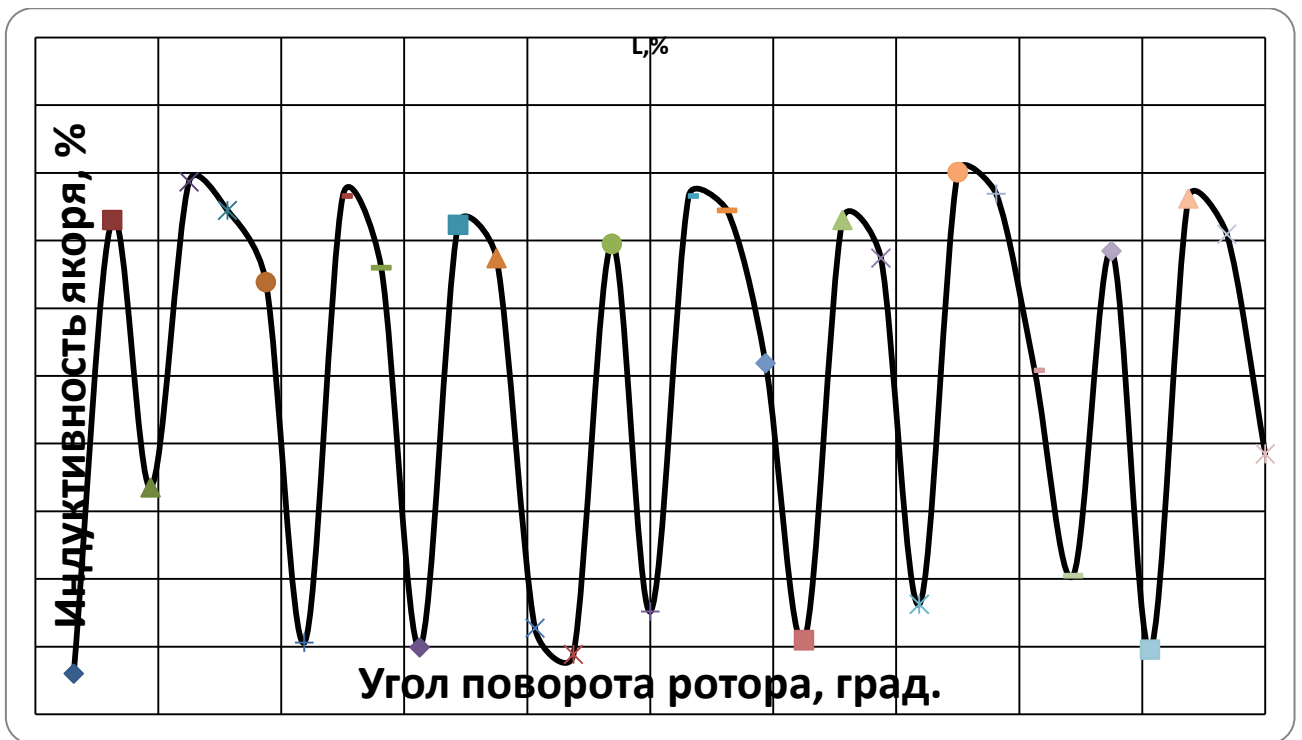


Рисунок 1.6 – Зависимость индуктивности якоря двигателя Johnson c2162-60006 от угла поворота ротора

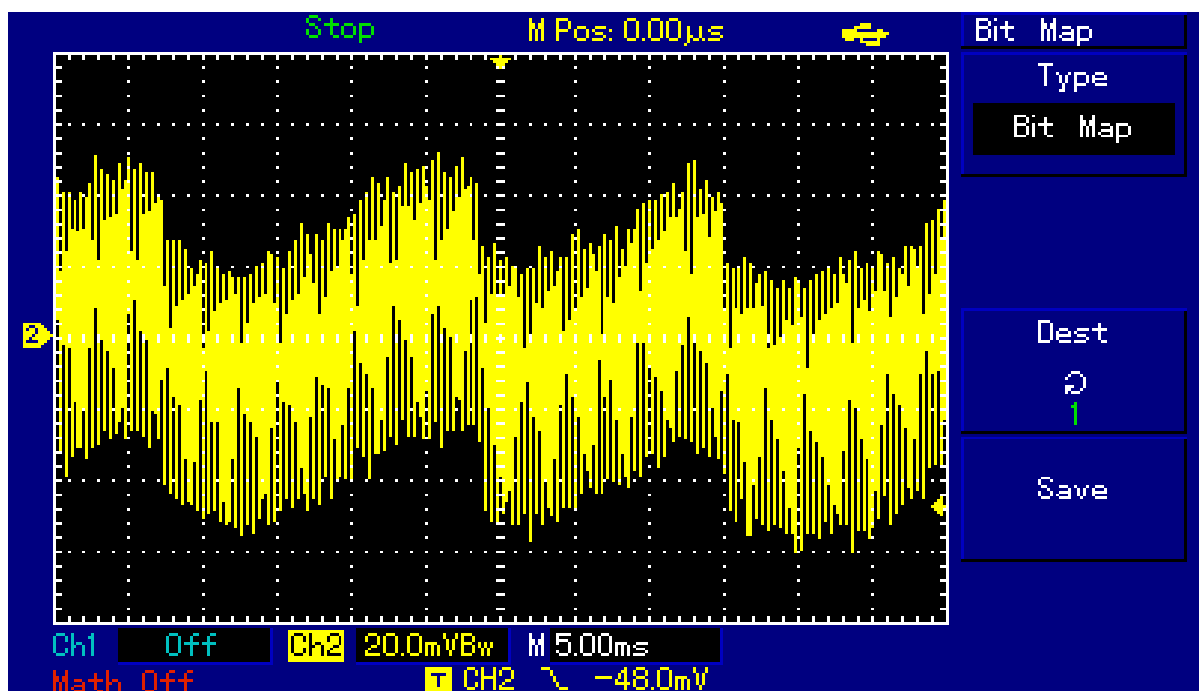


Рисунок 1.7 – Осциллограмма переменной составляющей тока якоря двигателя Johnson c2162-60006 при напряжении питания 2,5 В

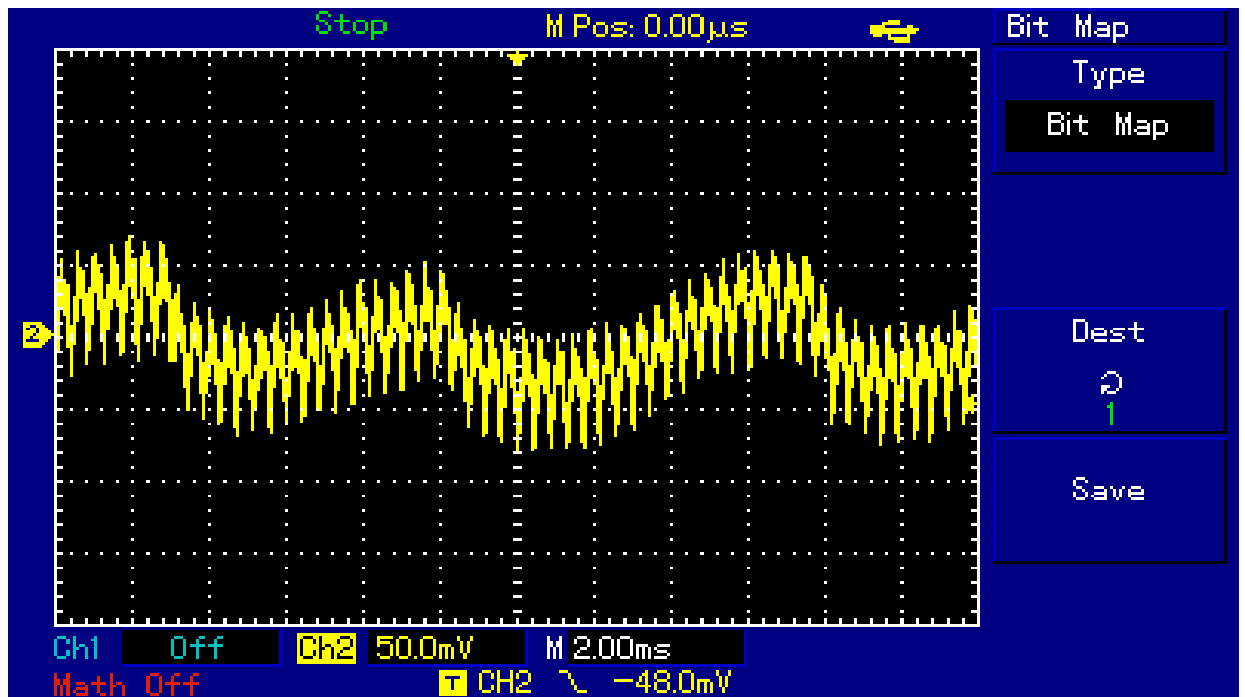


Рисунок 1.8 – Осциллограмма переменной составляющей тока якоря двигателя Johnson c2162-60006 при напряжении питания 5 В

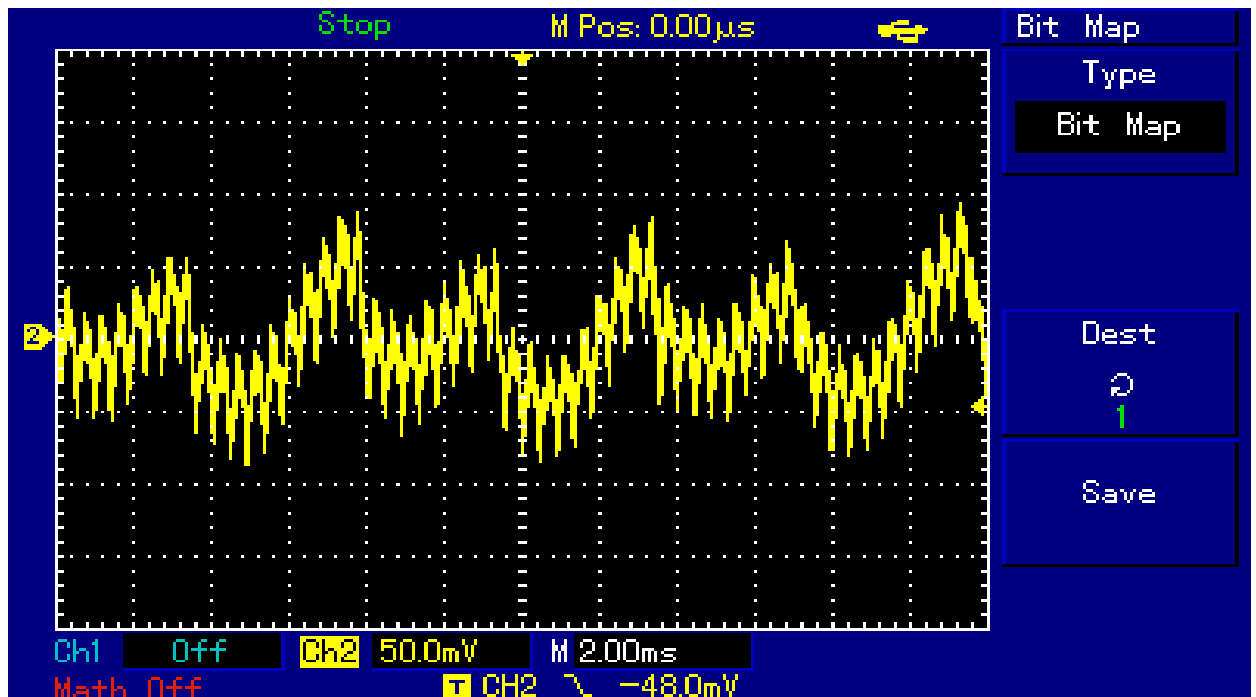


Рисунок 1.9 – Осциллограмма переменной составляющей тока якоря двигателя Johnson c2162-60006 при напряжении питания 10 В

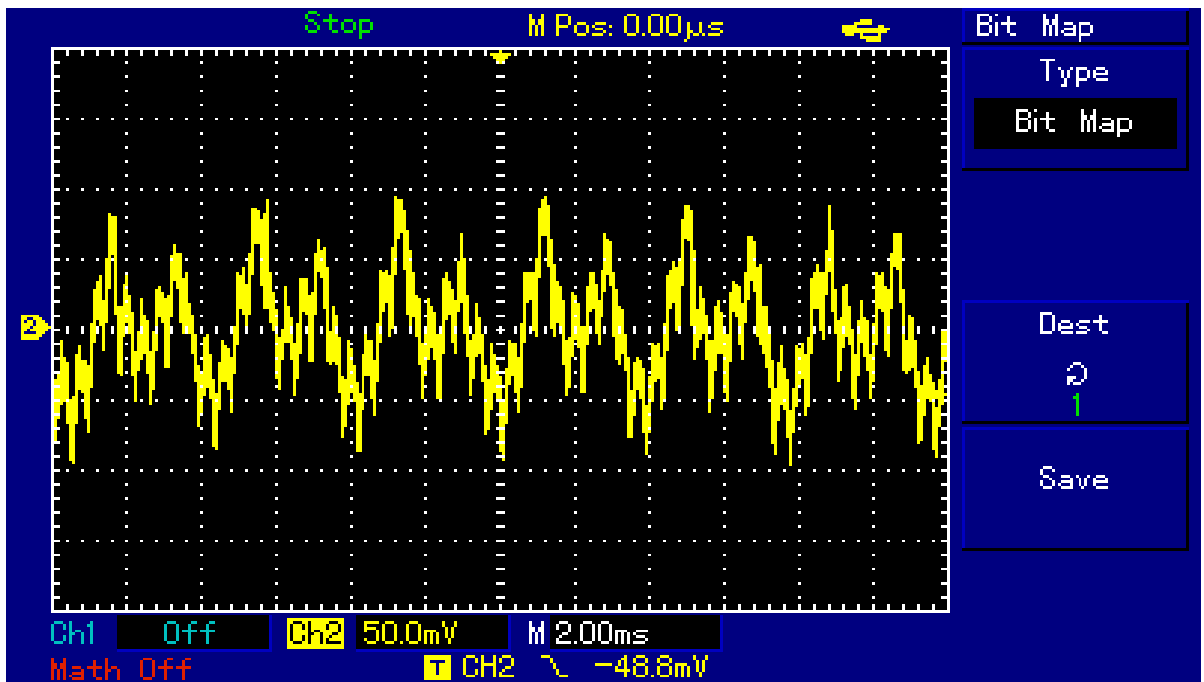


Рисунок 1.10 – Осциллограмма переменной составляющей тока якоря двигателя Johnson с2162-60006 при напряжении питания 20 В

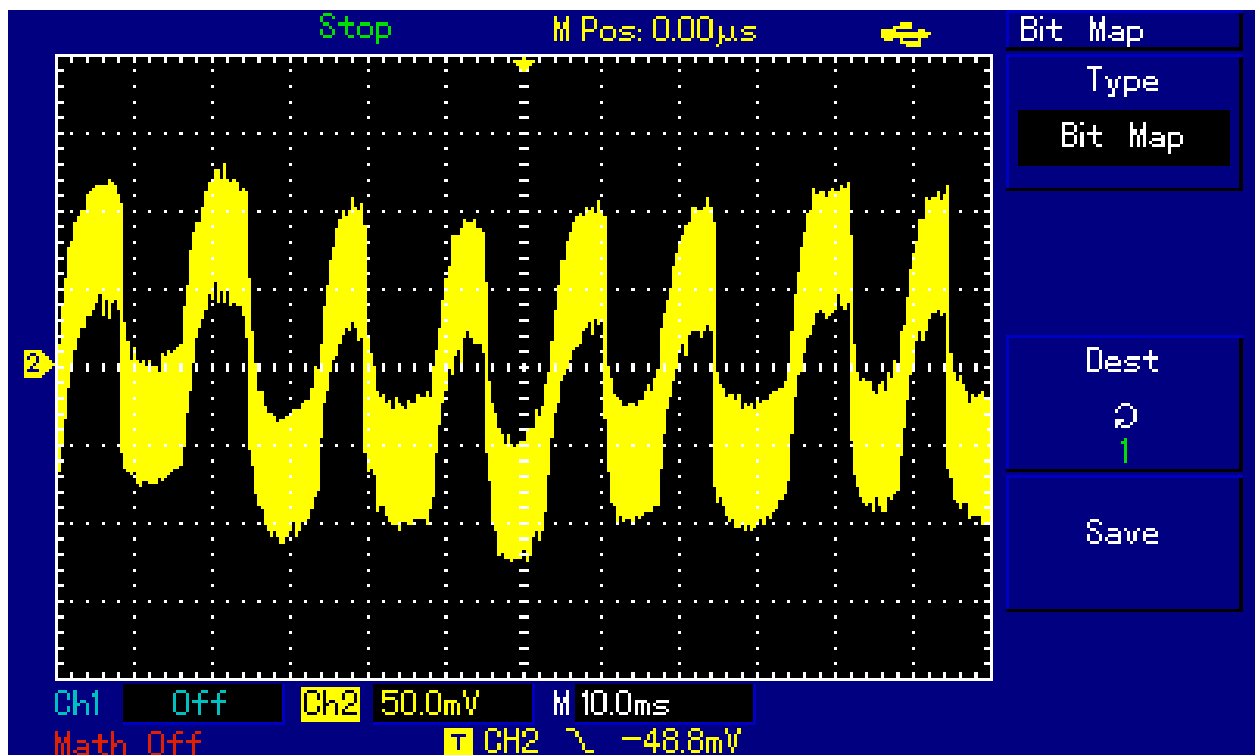


Рисунок 1.11 – Осциллограмма переменной составляющей тока якоря двигателя Johnson с2162-60006 под нагрузкой

На осциллограммах видно, что переменная составляющая тока двигателя Johnson c2162-60006 имеет две составляющие.

1. Помеха ШИП, изменяющаяся во времени с постоянной частотой 2,5 кГц, вызвана работой преобразователя.
2. Модуляция тока коллектором двигателя, вызвана зависимостью параметров двигателя от угла поворота двигателя.

То есть ток якоря содержит составляющую, частота колебаний которой кратна частоте вращения двигателя. На контроле частоты этой составляющей тока якоря, создают маломощные системы управления электроприводом постоянного тока. Системы управления электроприводом, созданные по такому принципу, обладают большей точностью установления скорости вращения, чем с тахогенератором постоянного тока. Их точность соизмерима с системами, в которых есть датчик положения ротора. С другой стороны, их использование невозможно в следующих случаях.

1. Используется комбинация двигателя и силового преобразователя, в которой невозможно отделить сигнал кратный частоте вращения от шума.
2. Низкая скорость вращения.
3. Требуется быстрое изменение скорости при изменении задания или быстрая компенсация возмущающего воздействия изменения нагрузки. Эту проблему можно компенсировать, введя положительную обратную связь по току.

Другими словами, такой алгоритм управления применим только к электроприводам, в которых требуется регулировка скорости вращения в узких пределах, например магнитофонах. Схема такого электропривода показана на рисунке 1.12. Схема взята из журнала «Схемотехника» [67].

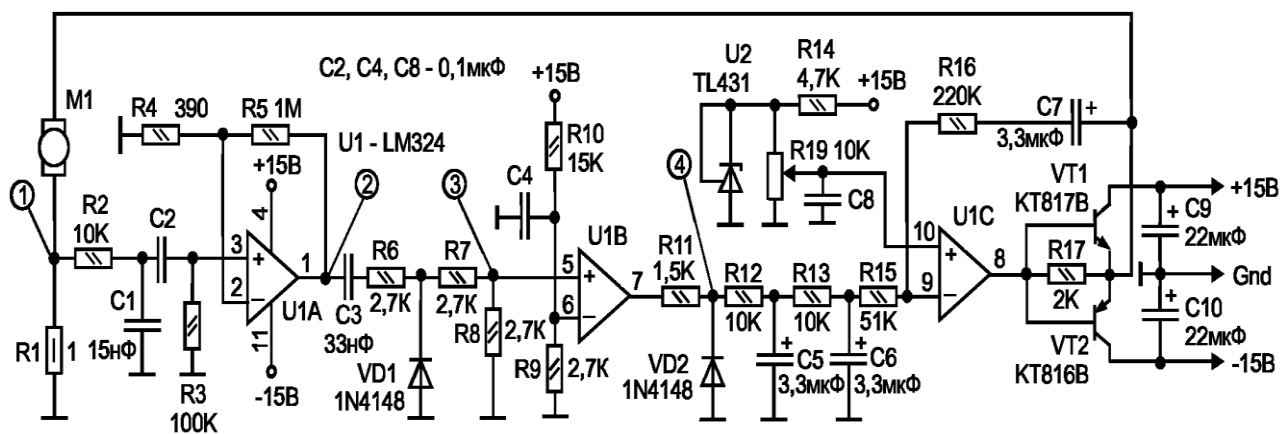


Рисунок 1.12 – Схема системы управления электроприводом использующая контроль коммутации коллекторных пластин [67]

Сила тока потребляемая $M1$, вызывает падение напряжения на резисторе $R1$, пульсации которого приблизительно равны 100 мВ. Переменная составляющая с частотой коммутации коллекторных пластин выделяется при помощи интегрирующей цепочки $R2, C1$ и разделительного конденсатора $C2$. Выделенная таким образом переменная составляющая с частотой кратной частоте вращения ДПТ поступает на вход компаратора $U1A$. Из этого сигнала выделяется передний фронт при помощи $C3, R6, R7, R8, VD1$. Выделенный таким образом передний фронт поступает на формирователь длительности импульса $U1B$. Среднее значение напряжения на выход $U1B$ пропорционально частоте следования импульсов, а значит и скорости вращения ротора. Эта постоянная составляющая детектируется $R11, R12, C5$ и $R13, C6$. Далее сигнал поступает на ПИ-регулятор, содержащий $U1C$ и относящиеся к нему элементы. Источником опорного напряжения является $U2$. В качестве датчика скорости вращения используется потенциометр $R19$. Выход регулятора укомплектован двухтактным эмиттерным повторителем на $VT1$ и $VT2$. Транзистор $VT1$ пропускает ток в рабочем режиме, а $VT2$ в тормозном, поэтому триод $VT1$ желательно установить на охладитель. Триоду $VT2$ внешнее охлаждение не требуется.

1.4 Прямое измерение противо-ЭДС

Согласно принципу обратимости электрических машин, открытому академиком Ленцем в 1833 году, любая электрическая машина может работать в генераторном и двигательном режимах. То есть на зажимах якоря вращающегося двигателя постоянного тока с оборванным якорем будет генерироваться напряжение, называемое «противо-ЭДС», величина которого пропорциональна скорости вращения.

На основе контроля этого напряжения создаются системы управления электродвигателем. Так как для измерения противо-ЭДС требуется отсутствие тока через якорь, то электропривода, использующие этот алгоритм контроля скорости вращения без тахогенератора, работают в режиме прерывистых токов. Для гарантирования этого, коэффициент заполнения импульсного преобразователя должен быть меньше 0.5, а значит они используют возможности преобразователя менее чем на 50% максимально возможного, то есть они маломощные, но электропривода построенные по этому принципу управления обладают точностью соизмеримой точности систем построенных с использованием ОС по скорости. Поэтому этот метод применяется в магнитофонах, проигрывателях, маломощных приводах подачи промышленных установок и т. п. устройствах. На рисунке 1.13 показана функциональная схема и временная диаграмма напряжения на якоре двигателя.

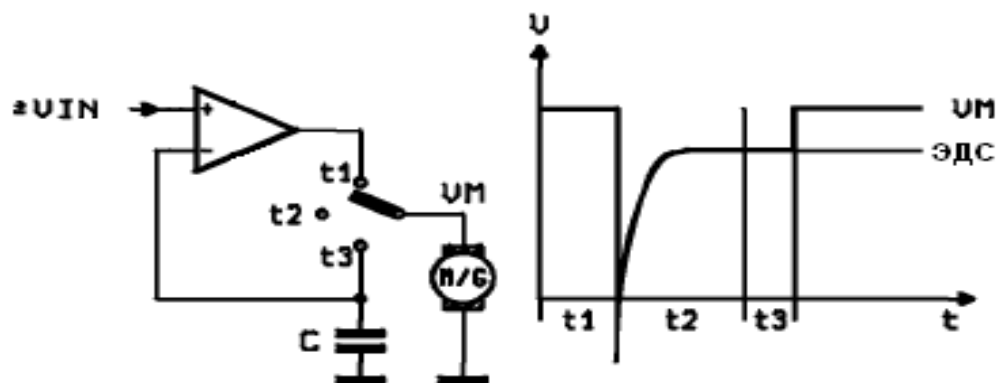


Рисунок 1.13 – Функциональная схема и временная диаграмма напряжения на якоре двигателя M/G поясняющие принцип прямого измерения противо-ЭДС

Этот рисунок поясняет принцип работы этого алгоритма управления двигателем. В промежуток времени t_1 система управления электродвигателем подает силовое напряжение на электрическую машину M/G, в это время ДПТ M/G работает в двигательном режиме, в промежуток времени t_2 отключается от силового напряжения. В этот промежуток времени происходит разряд магнитной энергии, накопленной в магнитной системе двигателя постоянного тока. Когда сила тока уменьшится до нуля, начинается такт t_3 , во время которого происходит измерение противо-ЭДС M/G при помощи запоминания его уровня на конденсаторе C. В этот период время двигатель работает в генераторном режиме. После окончания запоминания уровня противо-ЭДС на конденсаторе C, цикл начинается заново, то есть система управления электроприводом подает напряжение на электродвигатель в соответствии с сигналом рассогласования между сигналом задания V_{IN} и запомненным уровнем противо-ЭДС. Исторически, такой принцип управления электроприводом появился почти одновременно с появлением силовой электроники, как отдельной отрасли науки. В те времена, корпорацией General Electric была разработана схема, показанная на рисунке 1.11, 1.13.

Мостовой выпрямитель VDS1 необходим для того, чтобы ток протекал через двигатель в одном направлении. Ротор электродвигателя всегда вращается в магнитном поле, даже если во всех обмотках нет тока из-за остаточной намагниченности. Поэтому, когда тиристор VS1 заперт, то на его катоде будет присутствовать противо-ЭДС двигателя M1. Его величина пропорциональна скорости вращения двигателя. В первую половину полупериода напряжение на аноде диода VD2 будет нарастать. Когда оно станет больше противо-ЭДС двигателя, то диод VD2 откроется и через затвор тиристора пойдет ток отпирания, который откроет его. Таким образом, система будет стабилизировать скорость вращения. Так как эта система использует остаточную намагниченность магнитной системы двигателя, то она работает

нестабильно при низких оборотах двигателя. Как видно, эта схема по количеству компонентов похожа на прямое управление двигателем.

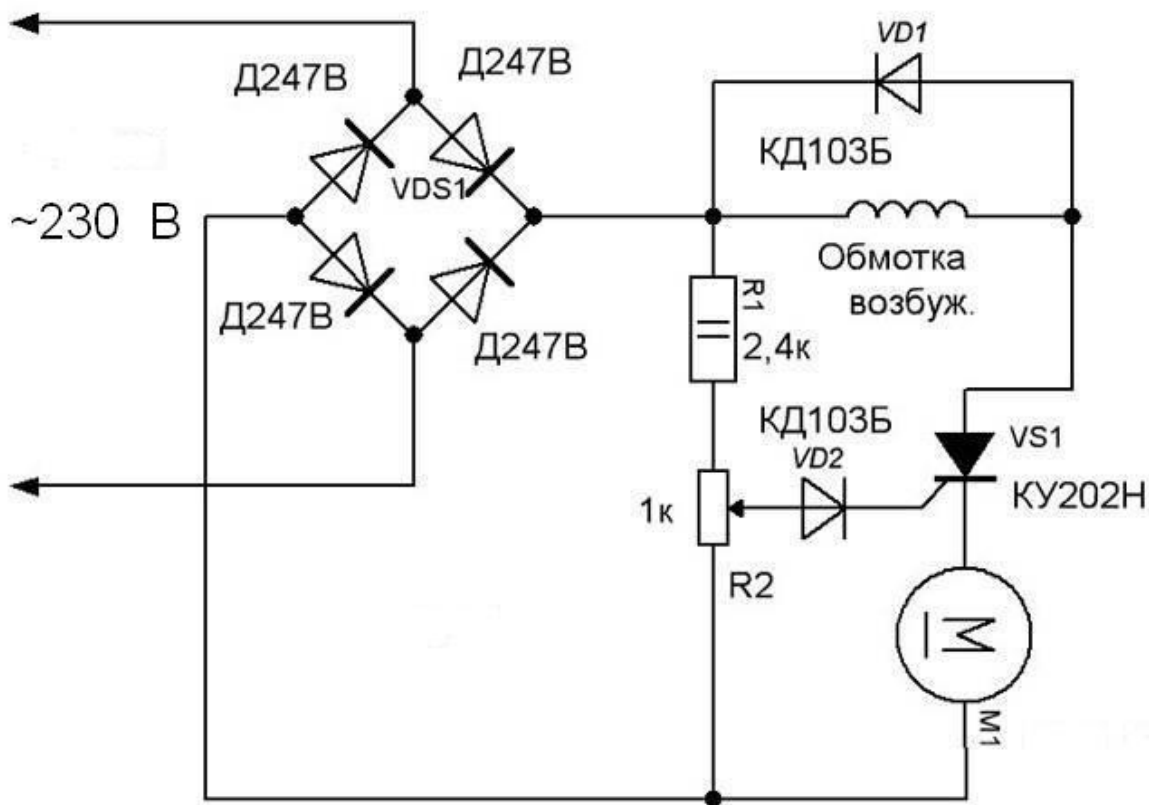


Рисунок 1.14 – Двухполупериодный регулятор скорости с прямым измерением противо-ЭДС двигателя, General Electric Semiconductor Products Dept

Лучшие результаты дают схемы с независимым возбуждением двигателя. Такая схема показана на рисунке 1.15. Схема взята из украинского журнала «Электрик» [77].

Регулятором в этой системе управления электроприводом является микросхема TL494. Эта микросхема является ШИМ-контроллером двухтактных ИИП. В своем составе она имеет два операционных усилителя для реализации отрицательной обратной связи по напряжению и току. Выхода этих операционных усилителей соединены по схеме монтажное или. В данной схеме используется только один операционный усилитель. Элементами R2, C2 задается частота ШИМ. На схеме указаны значения для генерации импульсов с

частотой около 1 кГц, хотя лучшие результаты ШИМ дает на частоте 3 кГц. Частота генерации определяется по формуле

$$f = \frac{1}{2 \cdot R_2 \cdot C_2}, \quad (1.2)$$

где R_2 и C_2 – это номиналы R_2 и C_2 , соответственно.

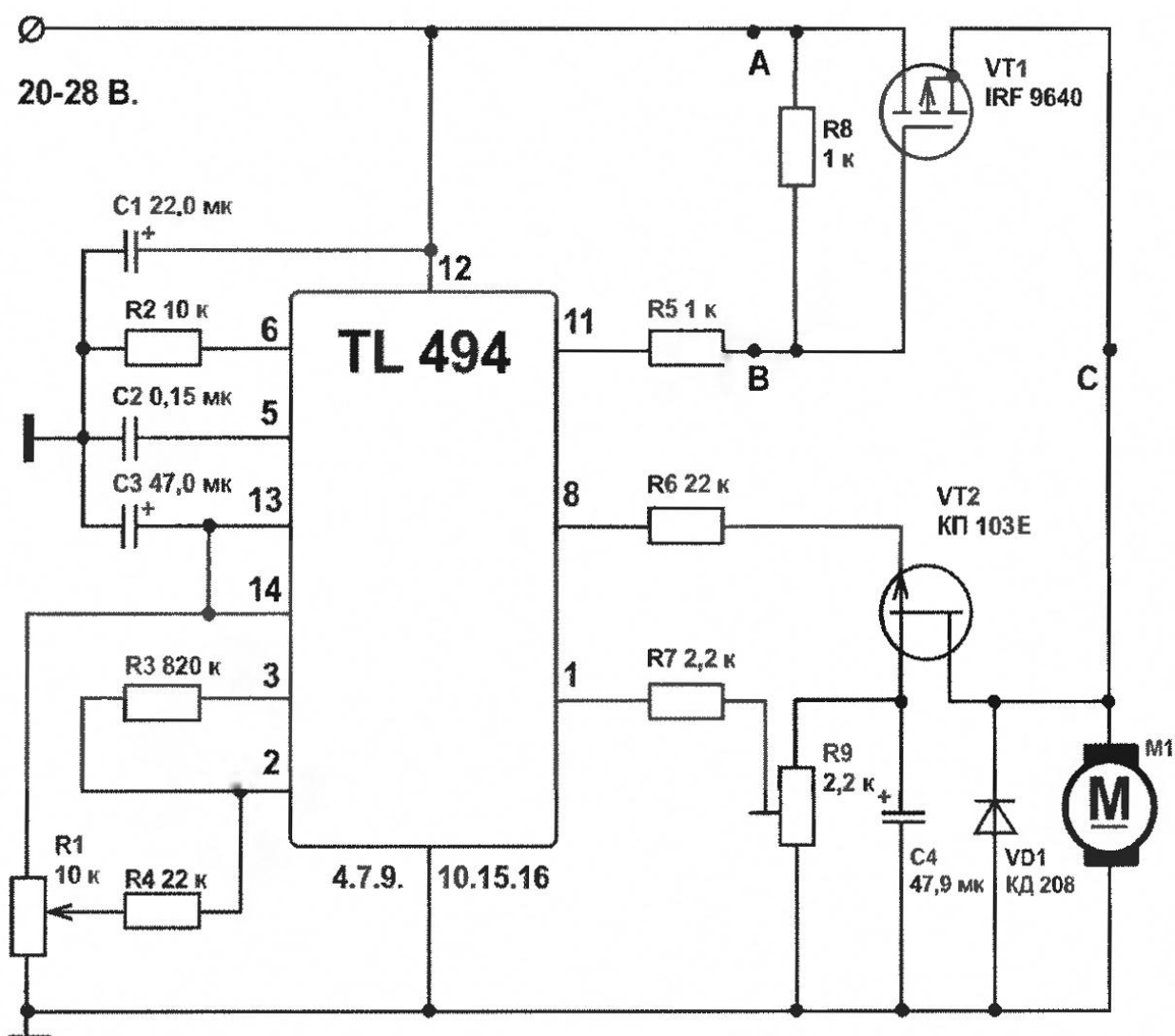


Рисунок 1.15 –ШИМ регулятор скорости с прямым измерением противо-ЭДС двигателя, разработка В.П. Оноприч

Функциональная схема, поясняющая принцип работы регулятора показана на рисунке 1.16. Конденсатор C_4 служит для запоминания величины противо-ЭДС двигателя, измеренного в предыдущем цикле. Резистором R_9 подбирается уровень обратной связи, то есть максимальная

возможная скорость вращения. Напряжение с выхода R9 подается на неинвертирующий вход ОУ, встроенного в пленочную микросхему t1494. Выход этого усилителя (вывод 3 TL494) соединен резистором R3. Величиной этого резистора задается коэффициент усиления регулятора. То есть стабильность скорости вращения. Инвертирующий вход (вывод 2) через резистор K4 соединен с датчиком R1.

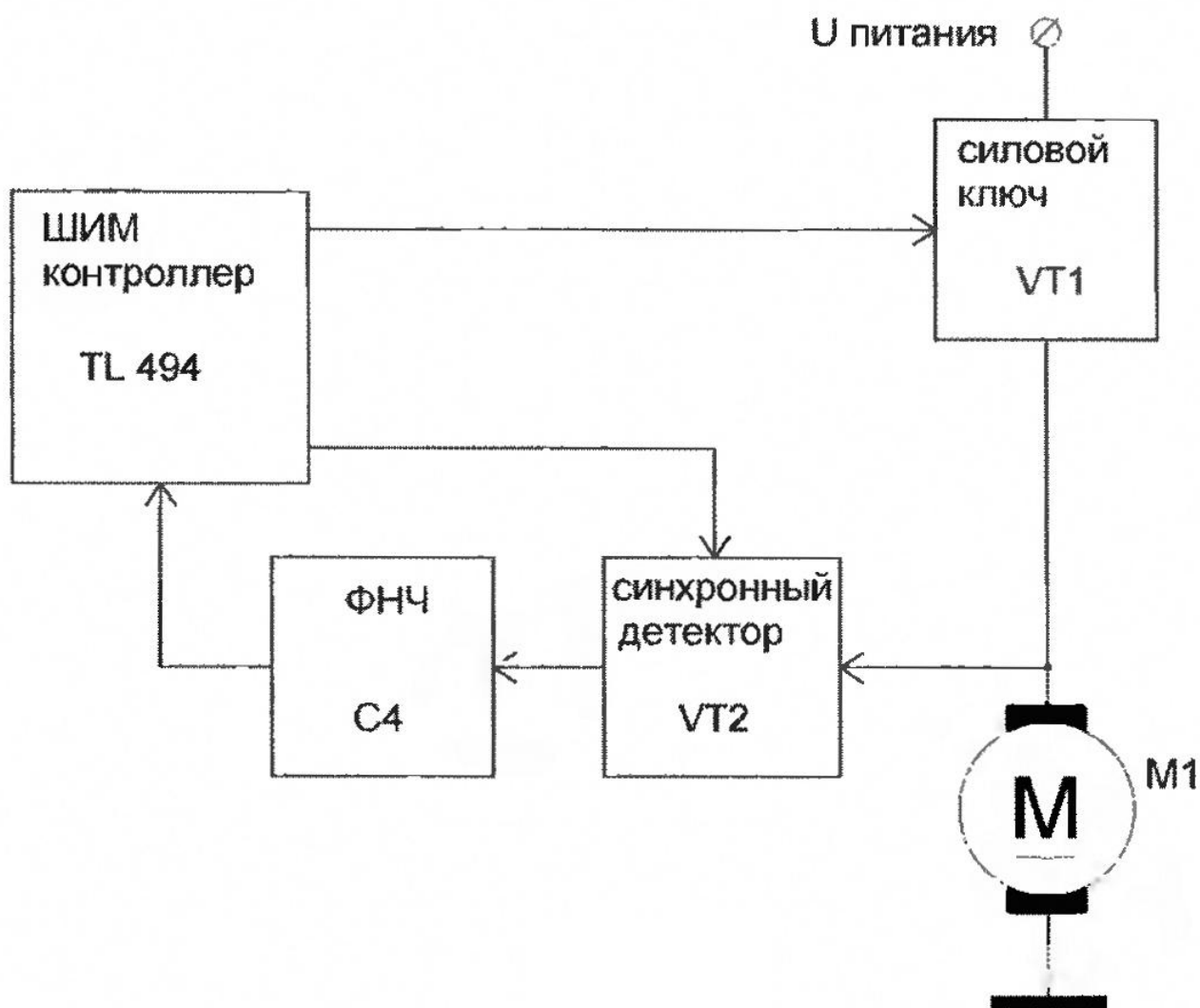


Рисунок 1.16 – Функциональная схема регулятора скорости вращения с прямым измерением противо-ЭДС, разработка В.П. Оноприч

Работает схема следующим образом. В первый такт микросхема tlt494 подает отпирающий импульс на VT1, тем самым подавая силовое напряжение на якорь двигателя M1. Длительность подачи силового напряжения прямо

пропорциональна разности напряжения между запомненным уровнем противо-ЭДС на конденсаторе С4 и датчиком R1. Когда импульс закончится, то накопленная магнитная энергия в двигателе M1 будет разряжаться через диод VD1.

В следующем такте отпирается транзистор VT2 для начала измерения противо-ЭДС.

Эта система управления применяется в приводе подачи проволоки в сварочном аппарате.

1.5 Контроль напряжения

Этот способ управления похож на предыдущий, в нем тоже измеряется напряжение на якоре, только для этого не выделяется отдельный такт измерения противо-ЭДС. Такое управление используется там, где нет необходимости поддерживать высокую точность поддержания скорости, но нужна более высокая мощность, чем может обеспечить прямое измерение противо-ЭДС. Такая обратная связь нужна для уменьшения выходного сопротивления системы управления, которое в тиристорных выпрямителях может достигать 10 Ом. Для примера, на рисунках 1.18 и 1.19 приведены результаты компьютерного моделирования в программе proteus 8, проекта показанного на рисунке 1.17.

В проекте была выбрана амплитуда напряжения питания равная 325В, что соответствует 230 В сетевого напряжения. Угол отпираания – 68 градусов. Индуктивность L1 равной 10 мГн и сопротивление R2 равным 10 Ом. Эти значения соответствуют данным якоря двигателя мощностью 100-1000 Вт.

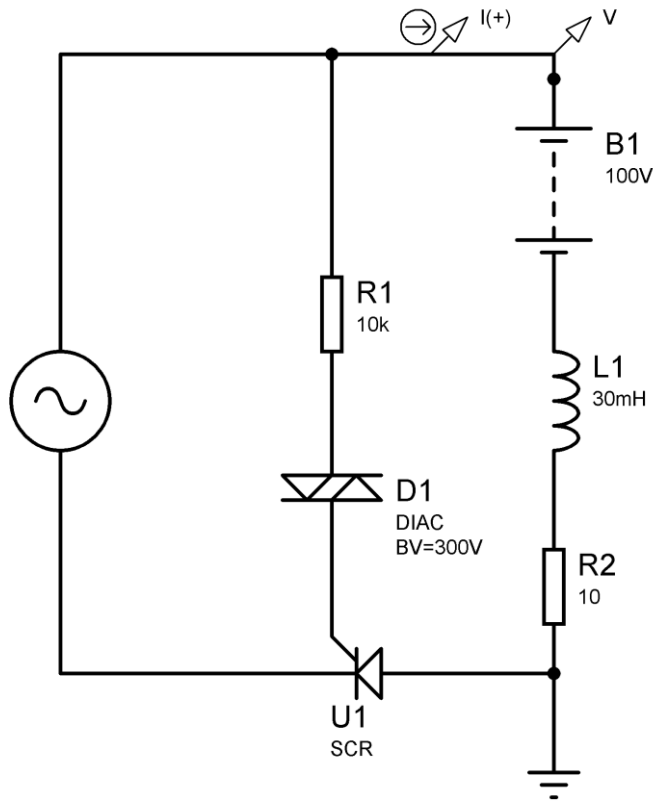


Рисунок 1.17 – Проект proteus 8, симулирующий работу ведомого сетью выпрямителя

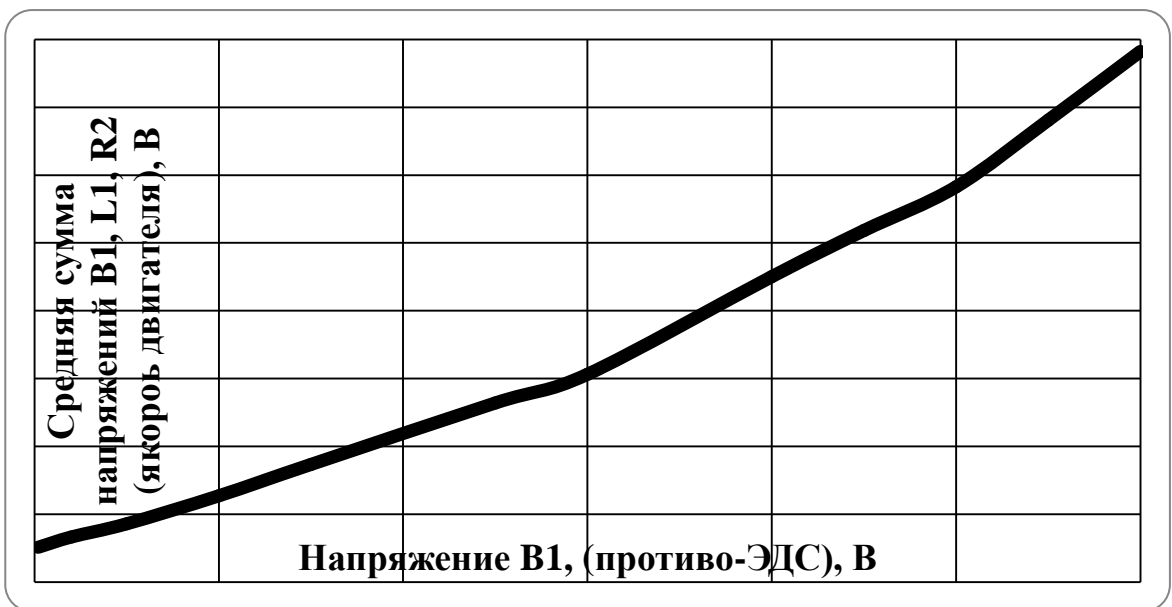


Рисунок 1.18 – Зависимость, выходного напряжения управляемого выпрямителя от напряжения противо-ЭДС при неизменном угле отпирания, результат моделирования в proteus 8

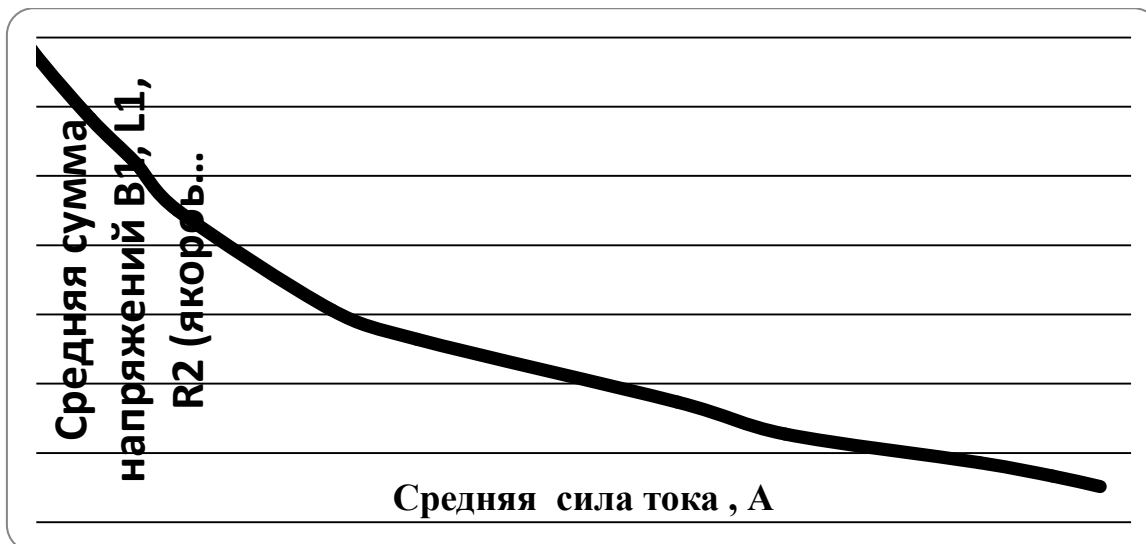


Рисунок 1.19 – Зависимость, выходного напряжения управляемого выпрямителя от средней силы тока при неизменном угле отпирания, результат моделирования в proteus 8

Зависимость частоты вращения от ЭДС преобразователя и сопротивления преобразователя и якоря

$$\omega = \frac{E - R_{пр} + R_{я}}{K\Phi}, \quad (1.3)$$

где ω – частота вращения;

E – ЭДС преобразователя;

$R_{пр}$ – сопротивление преобразователя;

$I_{я}$ – сила тока якоря;

$R_{я}$ – сопротивление якоря двигателя постоянного тока;

K – конструктивный коэффициент;

Φ – магнитный поток.

Так как $R_{пр}$, как показано выше, может быть приблизительно равным $R_{я}$, то отрицательная обратная связь по напряжению может уменьшить просадку скорости вращения нагруженного двигателя постоянного тока в два раза. Кроме того, при низком значении коэффициента заполнения преобразователя, системы управления электроприводом с обратной связью по скорости по свойствам похожи на электропривода с прямым измерением противо-ЭДС, так

как в этом случае противо-ЭДС двигателя более заметную роль. А в электронных блоках, в которых используется ведомый сетью выпрямитель с не синхронизированным СИФУ, ведут себя точно также, как блоки осуществляющие измерение противо-ЭДС, так как они контролируют напряжение на двигателе только до момента открытия тиристора. А если в это время тиристоры в других фазах не проводят ток, то контролируемое регулятором напряжение будет равняться противо-ЭДС. Одним из электронных блоков осуществляющих такое управление является НР1-С9, производства ВАЗ УГЭ ЛА. Он используется в электроприводе поворота дробометного барабана установки «РОБОТ». Схема блока показана рисунке 1.20. Она очень похожа на схему регулятора скорости вращения с обратной связью по противо-ЭДС (см. рисунок 1.13).

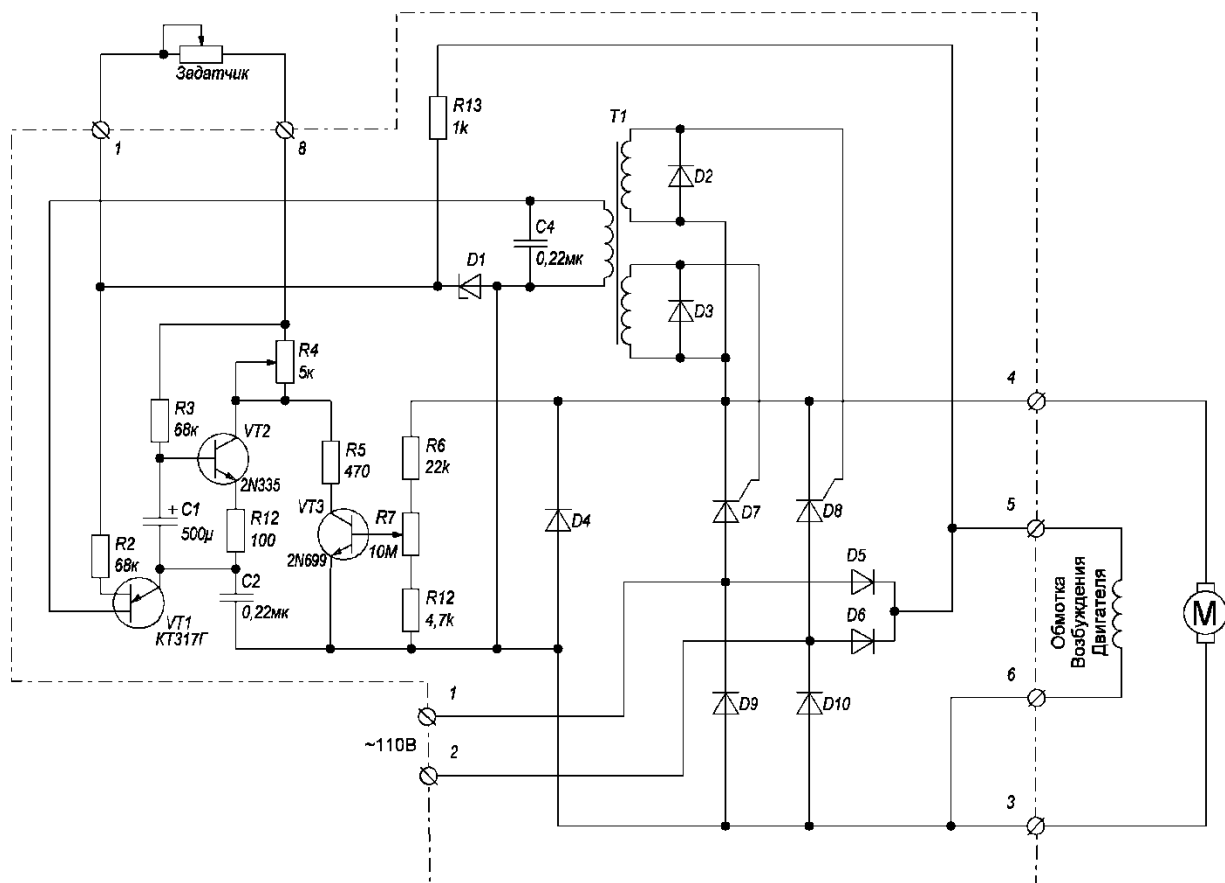


Рисунок 1.20 – Принципиальная схема электропривода установки «РОБОТ»,
производство ВАЗ УГЭ ЛА

Как выглядит блок НР1-С9 показано на рисунке 1.21. Этот регулятор скорости обеспечивает регулировку среднего значения выходного напряжения от 25В до 90В. Диапазон регулирования выставляется резисторами R7 и R4. Регулятор НР1-С9 является двухполупериодным полууправляемым выпрямителем, управляемым горизонтальным несинхронизируемым СИФУ. НР1-С9 рассчитан на управление двигателем мощностью 0,8кВт ф. Панкборн, номинальное напряжение 90 В, напряжение возбуждения 100 В.



Рисунок 1.21 – Фотография системы управления электроприводом установки «РОБОТ», производство ВАЗ УГЭ ЛА

Работа СИФУ основана на однопереходном транзисторе VT1. Однопереходный транзистор – это своеобразный тиристор, то есть как прибор имеющий ярко выраженную область отрицательного сопротивления, он был

создан в 1952 году. Вывод этого триода, подключенный к С2 называется эмиттером, он является аналогом анода тиристора, вывод подключенный к R2 называется базой 2, он является аналогом затвора тиристора, а оставшийся третий вывод транзистора называется базой 1, он является аналогом катода управляемого кремниевого выпрямителя. Однопереходный транзистор открывается, то есть начинает пропускать ток от эмиттера к базе 1, когда напряжение между эмиттером и базой 2 станет больше порогового значения, который зависит от тока протекающего через базу 2 и модели используемого транзистора. Если база 2 оборвана, то переход эмиттер – база 1 ведет себя как нелинейный резистор, вольт-амперную характеристику смотри на рисунке 1.22.

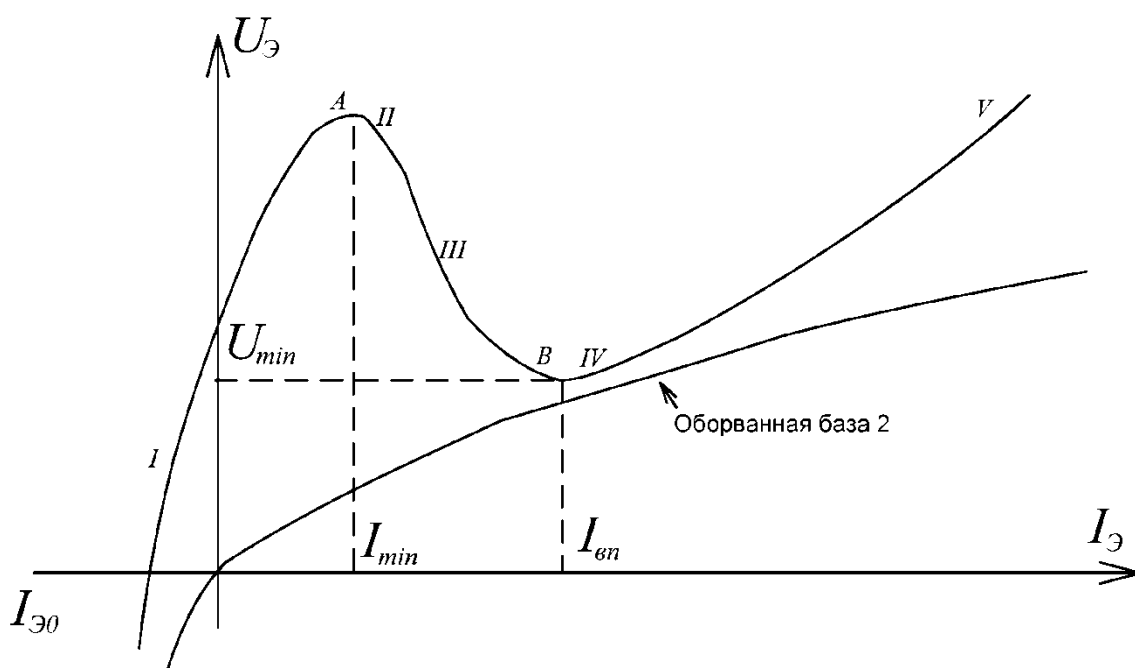


Рисунок 1.22 – ВАХ однопереходного транзистора

Описание работы регулятора. D5...D10 – это однофазный двухполупериодный выпрямитель. Диоды D9 и D10 служат для получения отрицательной полярности питания (общего провода), который используется для питания всех компонентов устройства. Управляемые кремниевые выпрямители D7 и D8 служат для питания положительного напряжения питания якоря двигателя. Диоды D5 и D6 выдают положительное напряжение питания для обмотки возбуждения и нестабилизированное напряжение питания

для платы СИФУ. На плате СИФУ содержится параметрический стабилизатор содержащий резистор R13 и диода Зенера D1. На стабилитроне D1 «срезается» напряжение выше 22 В. Резистор R13 – балластный, он ограничивает ток через стабилитрон D1 на уровне 15 мА. Это стабилизированное напряжение, которое в начале каждого полупериода падает до нуля поступает на задатчик. С задатчика это напряжение поступает на резистор смещения однопереходного транзистора R3 и R4 - потенциометр ограничения максимальной скорости.

Каждый полупериод транзистор VT2 открывается напряжением смещения и конденсатор C2 заряжается через сопротивление задатчика, R3 и R8. В зависимости от величины сопротивления задатчика и R4 изменяется скорость заряда конденсатора C2. Конденсатор C2 заряжается до уровня необходимого для открывания однопереходного транзистора VT1. После чего разряжается на через однопереходный транзистор и импульсный трансформатор T1, который требуется для распределения импульсов по тиристорам неподключенных к общему проводу. После окончания разряда конденсатор C2 начинает заряжаться снова, но это на работу схемы не влияет. Когда напряжение на диоде D1 спадает до нуля, это бывает в конце каждого полупериода, конденсатор C2 разряжается через VT1, так как запирающий ток смещения спадает до нуля. Осциллограмма напряжения на конденсаторе C2 и диоде D1 показана на рисунке 1.23.

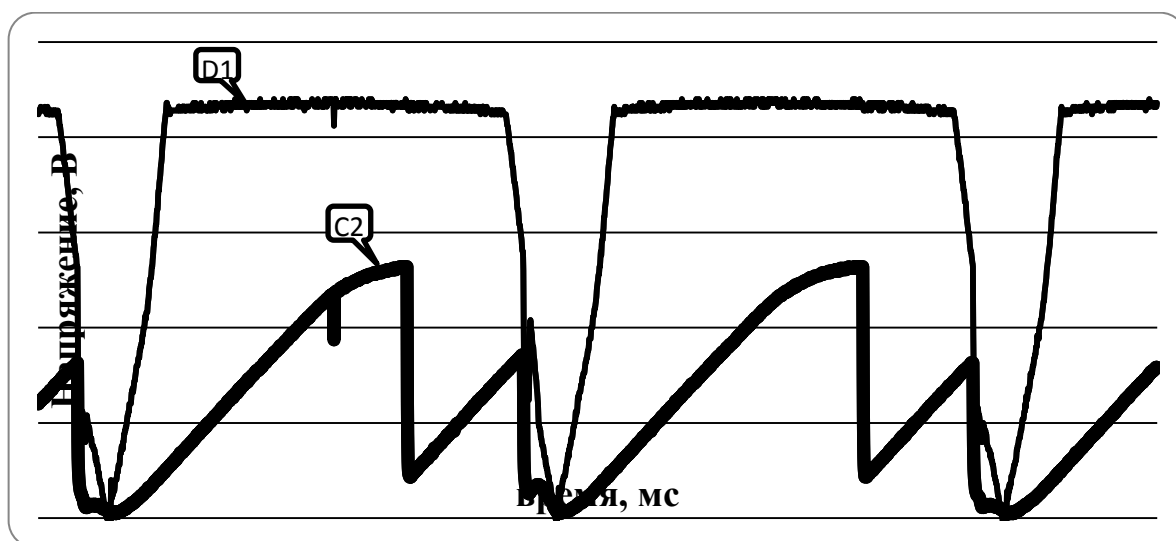


Рисунок 1.23 – Осциллограмма напряжения на D1 и C2

Осциллограмма напряжения на первичной обмотке трансформатора Т1 и конденсаторе С2 показана на рисунке 1.24.

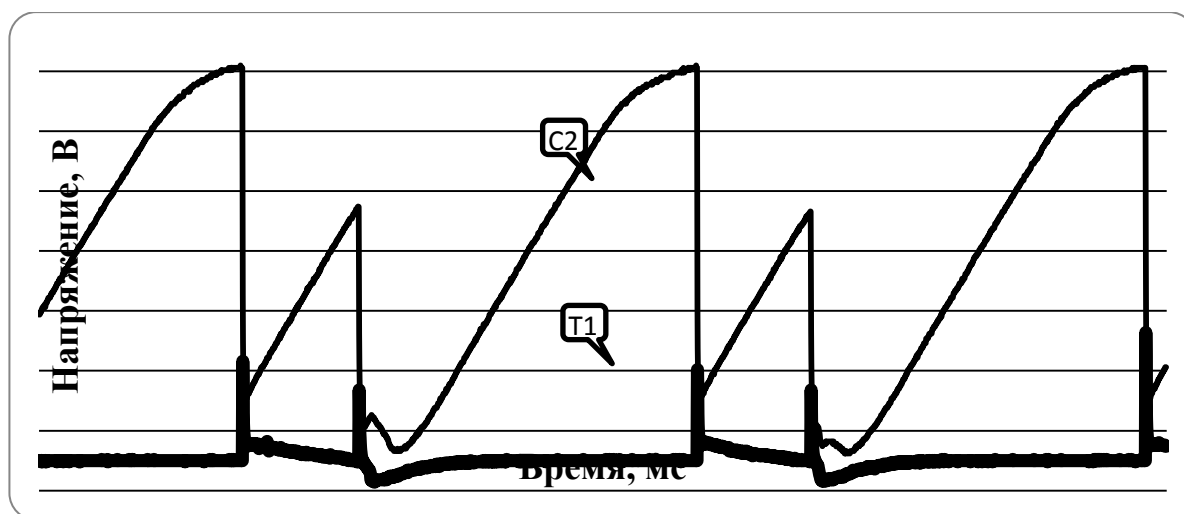


Рисунок 1.24 – Осциллограмма напряжения на Т1 и С2

Импульсы со вторичных обмоток трансформатора Т1 приходят на оба тиристора одновременно, но отпирается только тот из них, на котором есть положительное смещение. После этого выпрямленное напряжение прикладывается к якору двигателя. В конце каждого полупериода тиристоры обязательно запираются, подготавливая себя к следующему открытию. Запирание тиристоров происходит за счет подачи отрицательного смещения через диоды VD9 и VD10. Регулирование напряжения на якоре напряжения на якоре осуществляется с помощью внешнего задатчика, подключённого к зажимам 7 и 8, а так же резисторами R4, R7. Таким образом возможно изменение угла отпирания почти от 0 до 180 градусов, тем самым изменяется среднее напряжение на якоре. Когда тиристоры заперты, то на якоре двигателя присутствует напряжение противо-ЭДС или напряжение ниже 2 В. Напряжение ниже 2 В возникает тогда, когда в предыдущий полупериод магнитная система накопила достаточно энергии, что бы отпереть диод D4. Осциллограмма напряжения на якоре двигателя и выпрямленного сетевого напряжения показана на рисунке 1.25.

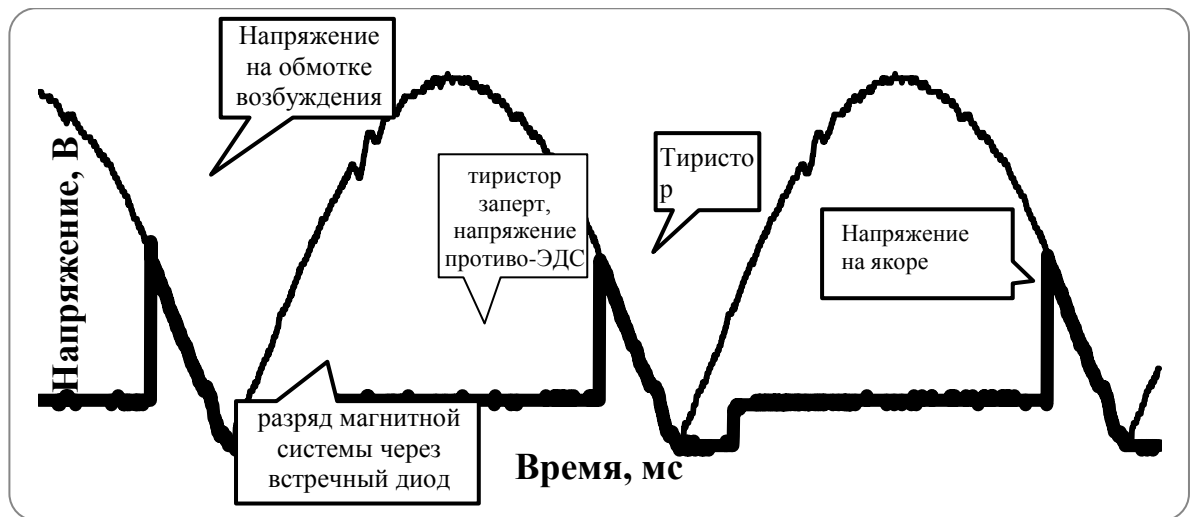


Рисунок 1.25 – Осциллограмма напряжения на обмотке возбуждения и якоре двигателя

Использование диодов вместо тиристоров в нижнем плече выпрямительного моста якоря и встречный диод D4 препятствуют работе двигателя в режиме рекуперативного торможения. Поэтому двигатель на холостом ходу медленно уменьшает скорость. Транзистор VT3 играет роль обратной связи по напряжению и, когда нагрузка низкая, по противо-ЭДС.

1.6 Измерение скорости вращения аналоговым датчиком

Стабилизировать скорость вращения двигателя постоянного тока можно при помощи обратной связи по скорости. Этот принцип использует электропривод ЭП-40-5-03 от швейной машинки чайка 134, подольского механического завода. Схема его похожа на НР1-С9 (смотри рисунок 1.20), только вместо обратной связи по напряжению в нем используется обратная связь от однофазного тахогенератора переменного тока. Принципиальная схема электропривода показана на рисунке 1.26.

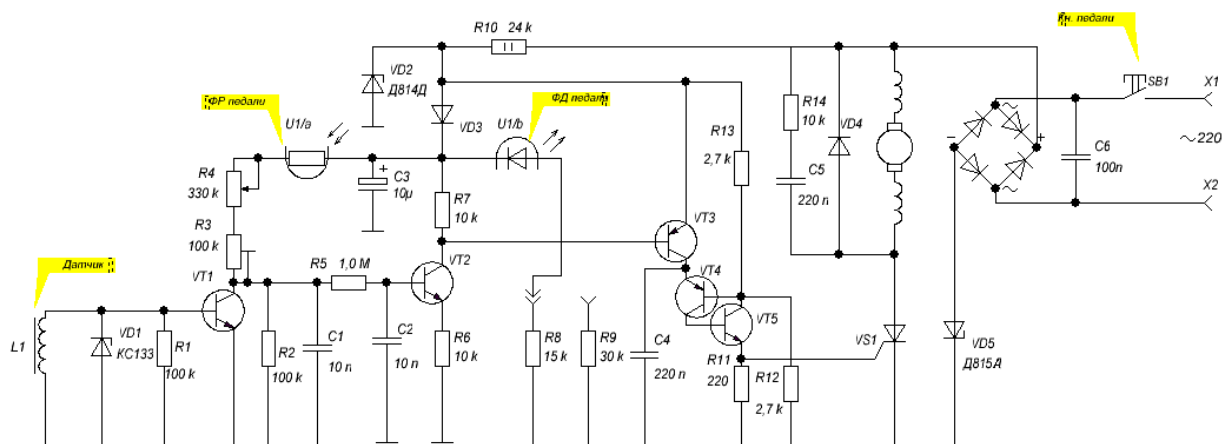


Рисунок 1.26 – Принципиальная схема электропривода ЭП-40-5-03 от швейной машинки Чайка 134, подольский механический завод

Описание работы электропривода. Сборка из VT4 и VT5 является ПОПТ: программируемым однопереходным транзистором. Программируемый однопереходный транзистор – это однопереходный транзистор у которого вместо запирающего тока смещения базы 2 используется напряжение смещения на базе 2. ПОПТ является разновидностью тиристоров и является более чувствительным прибором, чем ОПТ (однопереходный транзистор). Напряжение смещения этого ПОПТ задается делителем напряжения состоящим из R12 и R13. Резистор R12 служит для предотвращения ложных срабатываний тиристора VS1. Угол отпирания VS1 задается скоростью заряда конденсатора C4.

Скорость заряда C4 задается трехкаскадным усилителем на биполярных транзисторах VT1, VT2, VT3. Скорость заряда C4 обратно пропорциональна сигналу на входе этого усилителя. На вход этого усилителя подается сигнал с тахогенератора переменного тока L1. Коэффициент усиления задается задатчиком скорости, который состоит из потенциометра R4 и фоторезистора U1/a. Фоторезистор – это датчик глубины продавливания педали. Чем меньше их суммарное сопротивление – тем меньше усиление. Таким образом, скорость вращения двигателя обратно пропорциональна сопротивлению R4, U1/a и напряжению тахогенератора. Входной каскад усилителя на VT1 заодно

является детектором (выпрямителем) переменного напряжения тахогенератора, а следующий каскад – ФНЧ. R10 и VD2 – это параметрический стабилизатор напряжения и источник синхронизации для СИФУ, так как вначале каждого полупериода напряжение на нем падает до нуля.

Входной каскад сигнала с тахогенератора переменного тока собран датчиком скорости вращения является переменный резистор R4 и фоторезистор U1/a. U1/a – это датчик положения педали. Чем глубже нажата педаль, тем сильнее засвечен U1/a, а значит выше скорость вращения. Конденсатор C3 и диод VD3 предотвращают пропадание напряжения питания вначале каждого полупериода. Диод VD4 является путем прохождения тока якоря двигателя, когда тиристор VS1 заперт. Электронные компоненты R14 и C5 гасят импульсную помеху от коммутации коллекторных пластин и запирают диод VD4. Стабилитрон VD5 улучшает условия запирающего тиристора. Светодиод U1/b является источником света для фоторезистора U1/a. Резисторы R8 и R9 задают ток светодиода, а значит и диапазон регулирования скорости.

1.7 Фазовая автоподстройка частоты вращения

Самые лучшие результаты по стабилизации скорости дает обратная связь по положению ротора с ФАПЧ (фазовая автоподстройка частоты). Электродвигатели постоянного тока с последовательным возбуждением, управляемые регулятором с ФАПЧ ведут себя не хуже синхронных двигателей. Такой алгоритм управления используется электроприводах проигрывателей компакт дисков, в которых для синхронизации используются синхронизирующие метки на дисках. Эти метки называются WFCK и RFCK. Принцип работы электропривода построенного по принципу ФАПЧ показан на рисунке 1.28.

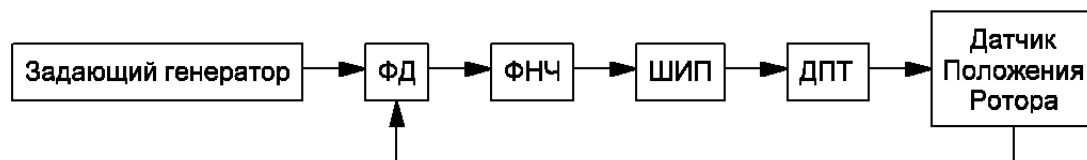


Рисунок 1.28 – Функциональная схема системы управления с ФАПЧ

Описание функциональной схемы. Скорость вращения двигателя задается задающим генератором. Фаза задающего генератора сравнивается с фазой сигнала с датчика положения ротора двигателя в ФД (фазовом детекторе). Фазовый детектор выдает импульсный сигнал, коэффициент заполнения которого пропорционально задержке между импульсом задания и датчиком положения ротора. Из этого сигнала выделяется постоянная составляющая и проводится компенсация обратной связи в ФНЧ (фильтр низкой частоты), который потом поступает на ШИП (широтно-импульсный преобразователь). ШИП, в соответствии с входным сигналом, вырабатывает напряжение для якоря ДПТ (двигатель постоянного тока) на валу которого смонтирован датчик положения. При вращении двигателя, датчик положения ротора периодически меняет свое состояние, тем самым вырабатывая сигнал обратной связи, который сравнивается в ФД. Дальше цикл повторяется.

Несмотря на сложность описания, его реализация в конкретных системах управления электроприводом может быть очень простой. Схема одной из первых таких систем управления электроприводом показана на рисунке 1.29 [56].

Эта схема была разработана General Electric Semiconductor Products Dept. для электропривода магнитофонов. В этой схеме задающий генератор собран на однопереходном транзисторе Q1 и относящихся к нему элементах (R6, R7, R4, R5, C3). Питание на него подается с параметрического стабилизатора состоящего из резистора R1 и стабилитрона Z1. Частота задающего генератора, а значит и скорость вращения двигателя задается потенциометром R2. Импульсы задающего генератора отпирают основной тиристор Q2. Его

коммутация или выключение осуществляется тиристором Q3, который управляется оптотиристором Q4.

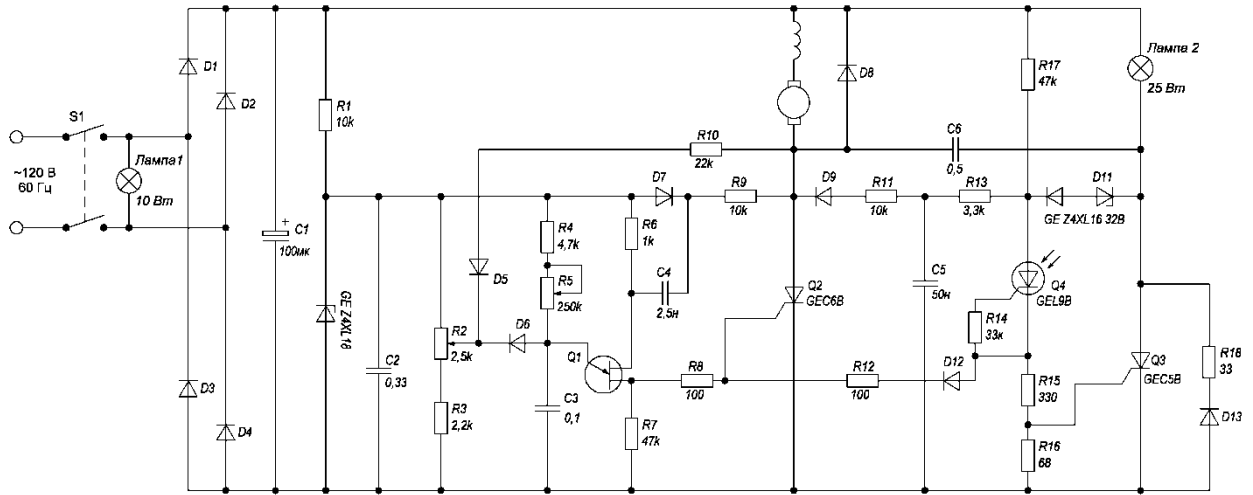


Рисунок 1.29 – Прецизионная стабилизация скорости вращения двигателя постоянного тока с АФПЧ, General Electric Semiconductor Products Dept [56]

Оптотиристор Q4 является составной частью датчика положения ротора. Другой его частью является лампа 1, мощностью 10 Вт. Оптотиристор Q4 засвечивается лампой в момент, когда щель диска закрепленного на валу электромотора будет напротив него. Таким образом, ширина импульсов напряжения на двигателе, а значит и среднее значение напряжения, оказывается пропорциональной задержке между импульсами задающего генератора и датчика положения ротора двигателя. Для устойчивой работы этого регулятора частоты вращения, в цепь обратной связи включен фильтр низкой частоты. Он состоит из элементов R2, R3, R10, D5, D6. Лампа 2 служит для контроля частоты вращения двигателя.

1.8 Положительная обратная связь по силе тока якоря

Зависимость частоты вращения от ЭДС преобразователя и тока якоря

$$\omega = \frac{E - RI}{K\Phi}, \quad (1.4)$$

где ω – частота вращения;
 E – ЭДС преобразователя;
 R – суммарное сопротивление преобразователя и якоря двигателя;
 $I_{я}$ – сила тока якоря;
 K – конструктивный коэффициент;
 Φ – магнитный поток.

Сравнительно мощная схема электропривода реализующая этот принцип управления была описана в журнале Радио [49]. Схема электропривода показана на рисунке 1.30.

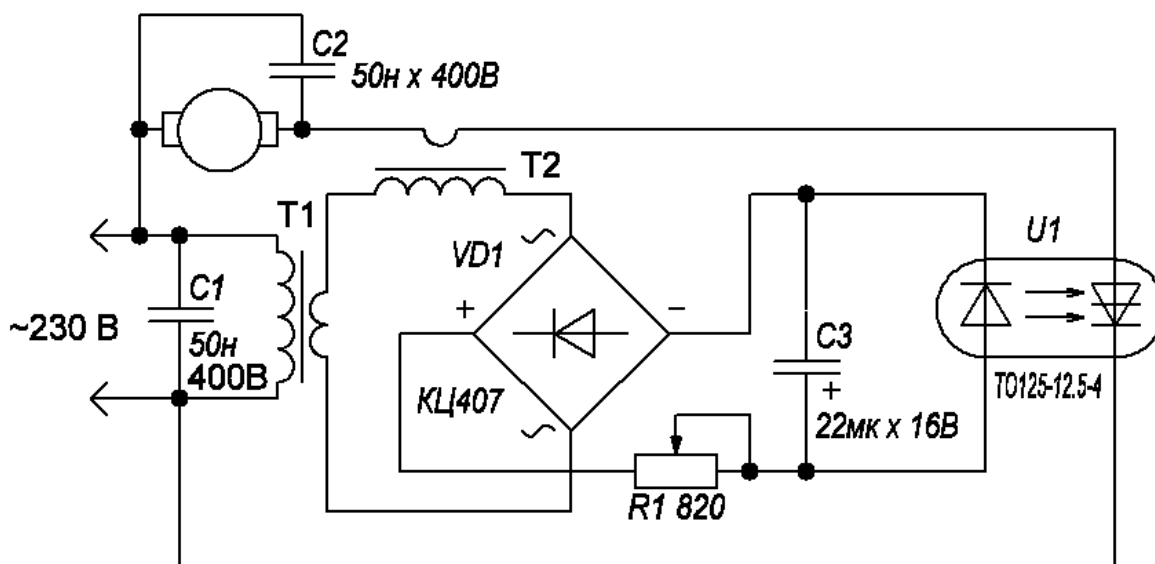


Рисунок 1.30 – Принципиальная схема электропривода с IR компенсацией

На схеме показан однополупериодный управляемый выпрямитель с горизонтальным СИФУ. Конденсатор $C2$ требуется для уменьшения скорости нарастания напряжения на оптодистористоре $U1$ в момент запирающего. Конденсатор $C1$ используется для электромагнитной совместимости. Трансформатор $T1$ – это источник электроэнергии для СИФУ. Трансформатор $T2$ обеспечивает положительную обратную связь по току. Диодный мост предотвращает отрицательное напряжение на светодиоде оптодистористора $U1$. $C3$ затягивает нарастание напряжения на оптодистористоре $U1$, а $R1$ является задатчиком

скорости вращения. Несмотря на простоту схемы, она очень сложно настраивается, так как необходимо изготовить трансформаторы Т1 и Т2 таким образом, что бы при нулевом сопротивлении R1 не было перегрузки светодиода входящего в состав оптоэмиттера U1.

По такому же принципу управления реализован в импортном электроприводе M56NN, используемом в магнитофоне «Воронеж 404», производство нововоронежского завода «Алиот». Похожее устройство регулятора скорости вращения реализовано в магнитофоне «Парус-302», производство саратовского завода «Знамя Труда». Схема электропривода показана на рисунке 1.31.

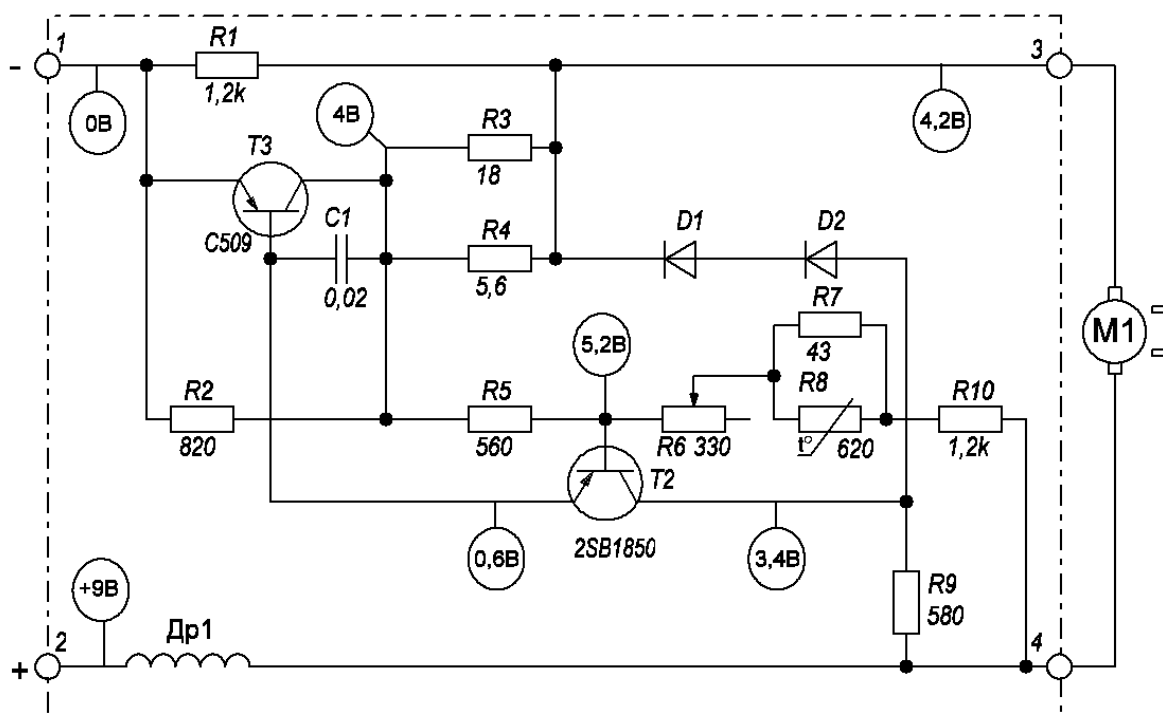


Рисунок 1.31 – Принципиальная схема электропривода M56NN от кассетного магнитофона «Воронеж 404», производство нововоронежского завода «Алиот»

Регулятор скорости M56NN работает следующим образом. Ток протекающий через двигатель вызывает падение напряжения на резисторах R3 и R4. Это напряжение приложено между базой и эмиттером транзистора T2,

выполняющего роль дифференциального усилителя, в котором сравнивается сигнал задания образованный резисторами R2, R5, R6, R7, R10, R8 и напряжение обратной связи по току. В коллекторную цепь транзистора T2 включен эмиттерно-базовый переход транзистора T1, выполняющего роль управляющего элемента. Термостабилизация схемы выполняется резистором R8.

1.9 Наблюдатель противо-ЭДС

Зависимость частоты вращения от напряжения и силы тока якоря

$$\omega = \frac{U - R_{я} I_{я}}{K\Phi}, \quad (1.5)$$

- где ω – частота вращения;
 U – напряжение на якоре;
 $R_{я}$ – сопротивление якоря двигателя;
 $I_{я}$ – сила тока якоря;
 K – конструктивный коэффициент;
 Φ – магнитный поток.

Таким образом, если получить сигнал пропорциональный напряжению на якоре двигателя и из него вычесть сигнал пропорциональный силе тока с правильными соотношениями преобразований, то по полученной величине можно оценить текущую скорость вращения двигателя. По такому принципу реализованы регуляторы оборотов во многих электроприводах, способных управлять электродвигателем мощностью до 1кВт. Схема выделения эго сигнала, пропорционального противо-ЭДС, называется тахометрическим мостом. На рисунке 1.32 показана схема электропривода ЭТО1-4, реализующая такой принцип управления. Он рассчитан на управление ДПТ мощностью 200 Вт.

Этот электропривод состоит из следующих узлов: силовой мост, задатчик скорости вращения, тахометрический мост, регулятор противо-ЭДС, генератор

обмотку возбуждения двигателя подается ток через потенциометр R20, которым настраивается величина этого тока. Напряжение двигатель подается через тиристор Д19, углом отпираания которого управляется среднее значение напряжения на двигателе. Диод Д5 служит для обеспечения надежного запираания Д19 в конце каждого полупериода. Потенциометры R21 и R3 являются тахометрическим мостом.

Тахометрический мост работает следующим образом. На средней точке потенциометра R3 находится положительный потенциал пропорциональный силе тока двигателя. Потенциометр R21 одним крайним выводом подключен к клемме якоря двигателя имеющей отрицательный потенциал относительно общего провода, а другим к средней точке потенциометра R3, в которой напряжение положительно и пропорционально току якоря. Таким образом, между крайними зажимами потенциометра R21 будет напряжение равное разнице между напряжением пропорциональным току двигателя и пропорциональным току якоря. Коэффициенты преобразования настраиваются при помощи R3 и R21.

Чем выше движок переменного резистора R3, тем сильнее будет влиять ток якоря на результирующий сигнал и чем левее R21 – тем больше доля напряжения якоря. Дальше к сигналу пропорциональному против-ЭДС, имеющему отрицательную полярность, прибавляется напряжение задания. Для этого служит узел задатчика скорости вращения. Задатчик скорости вращения является изолированным источником напряжения. Уровень выходного напряжения которого можно настраивать. Он состоит из диодного моста Д6...Д8, обмотки трансформатора Т1, параметрического стабилизатора R6, R7, Д22 и потенциометров регулирующих напряжение задания. Потенциометрами R22 и R24 задаются пределы регулировки скорости вращения, а R23 – текущее значение. Это напряжение задание соединяется последовательно с сигналом с тахометрического моста через резистор R4. Полярность сигнала задания совпадает с полярностью сигнала тахометрического моста при нулевом токе. Результирующее напряжение

поступает на вход регулятора противо-ЭДС через резистор R8. Регулятор противо-ЭДС – это усилитель постоянного тока с общим эмиттером, который при увеличении сигнала с задатчика уменьшает свою проводимость. Регулятор противо-ЭДС выполнен на биполярном транзисторе прямой проводимости T1. Поэтому перемещением движка переменного резистора R22 изменяется минимальная скорость, а R24 – максимальная. Резистор R8 и стабилитрон Д21 служат для защиты базы транзистора T1 от опасного напряжения. Усилитель охвачен гибкой обратной связью через конденсатор С19 и R26, то есть он является апериодическим звеном. Выход регулятора противо-ЭДС соединен с узлом токоограничения. Узел токоограничения – это стабилитрон Д20 и потенциометр R19. Он ограничивает напряжение на выходе регулятора противо-ЭДС величиной обратно пропорциональной текущему значению противо-ЭДС. Сигнал с выхода регулятора противо-ЭДС поступает на вход СИФУ.

СИФУ (система импульсно-фазового управления), используется для генерации отпирающего импульса тока на тиристор, синхронно с частотой питающей сети. При этом импульс сдвигается по времени. СИФУ в электроприводе ЭТО1-4 работает по вертикальному принципу, то есть в нем входное напряжение сравнивается с текущим значением напряжения генератора синхронизированного с сетью. В качестве генератора синхронизированного с сетью используется ГПН (генератор пилообразного напряжения). СИФУ состоит из изолированного источника питания (трансформатор Тр1, диоды Д14, Д15, конденсатор С9), ГПН и НО (нуль-органа или компаратора). К ГПН относятся следующие элементы: транзистора прямой проводимости T2, диоды Д16, Д17, конденсатор С10, резисторы R13, R14, R15. Транзистор T2 работает в ключевом режиме. Это достигается за счет запирающего смещения поступающего на базу транзистора с трансформатора Тр1, через диоды Д16, Д17 и резистор R13. Когда транзистор заперт, то конденсатор С10 заряжается через резистор R15 мало изменяющимся током. Когда мгновенное значение напряжения сети пропадает, то диоды Д16 и Д17

запираются и на транзистор Т2 приходит отпирающее смещение через резистор R14. Транзистор Т2 отпирается и через него конденсатор С10 разряжается. При поступлении следующего полупериода цикл повторяется. Это пилообразное напряжение соединяется последовательно с напряжением с выхода регулятора против-ЭДС, таким образом, что бы оно вычиталось из напряжения с входа регулятора против-ЭДС. Полученная величина, состоящая из пилы смещенной напряжением регулятора против-ЭДС, относительно общего провода, в отрицательную область, приходит на вход нуля-органа. Так как транзистор Т3 – это биполярный транзистор прямой проводимости, то ноль-орган, выполненный по схеме с общим эмиттером, отпирается тогда, когда на его входе отрицательное напряжение смещение. Так как ГПН выдает линейно возрастающее напряжение, а на выходе регулятора против-ЭДС напряжение всегда отрицательное, то время задержки между наступлением новой полуволны сетевого напряжения и открытием транзистор Т3 будет обратно пропорционально напряжению регулятора против-ЭДС. Коллекторная цепь транзистора Т3 соединена с базой формирователя импульсов (ФИ). ФИ собран на транзисторе прямой проводимости Т4. Он работает в ключевом режиме. Для надежного запираения Т4 в его эмиттерную цепь включен источник положительного напряжения, собранного на диоде Д18 и резисторе R16. Он используется для обратного смещения транзистора Т4, тем самым сводя коллекторный ток к минимуму при отсутствии отпирающего импульса. Полученный таким образом импульс, через импульсный Тр2 подается на затвор КУВ, тем самым отпирая его.

Несмотря на архаичность схемы электропривода ЭТО1, такой алгоритм управления реализовывается и в современных блоках, например в системе управления KBLC [107], производства KB ELECTRONICS, INC.

Внешний вид регулятора KBLC показан на рисунке 1.33.



Рисунок 1.33 – Внешний вид электропривода KBLC

Регулятор оборотов KBLC рассчитан на управление двигателем приблизительно той же мощности, что и ЭТО1. Функциональные возможности точно такие же: стабилизация скорости при помощи наблюдателя противо-ЭДС и токоограничение. Разница только в используемых электронных компонентах: привод ЭТО1 выполнен с использованием исключительно дискретных компонентов, а в приводе KBLC используется микросхема счетверенного операционного усилителя. Этим достигается простота настройки не зависимость работы регулятора от окружающей температуры. Схема подключения показана на рисунке 1.34.

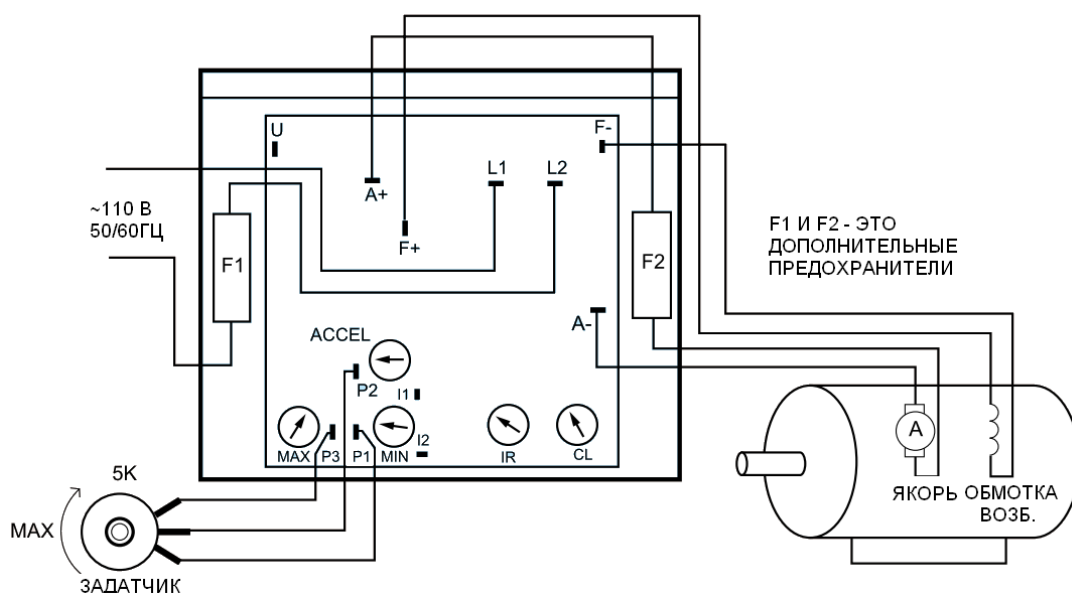


Рисунок 1.34 –Схема подключения электропривода KBLC, производство KB ELECTRONICS, INC

Электронный блок KBLC на корпусе имеет 5 ручек настройки:

- «MAX» - выставляется максимальная допустимая скорость вращения;
- «ACCEL» - скорость реакции привода на изменение напряжения задания;
- «MIN» - минимальная допустимая скорость вращения;
- «IR» - усиление контура положительной обратной связи по току;
- «CL» - уровень токоограничения.

В зависимости от модификации регулятора скорости, он может подключаться к сети переменного напряжения уровнем 110 В или 230 В. Этот привод кроме регулируемого напряжения якоря выдает еще нерегулируемое, но выпрямленное, напряжение для обмотки возбуждения. Принципиальная схема привода показана на рисунке 1.35.

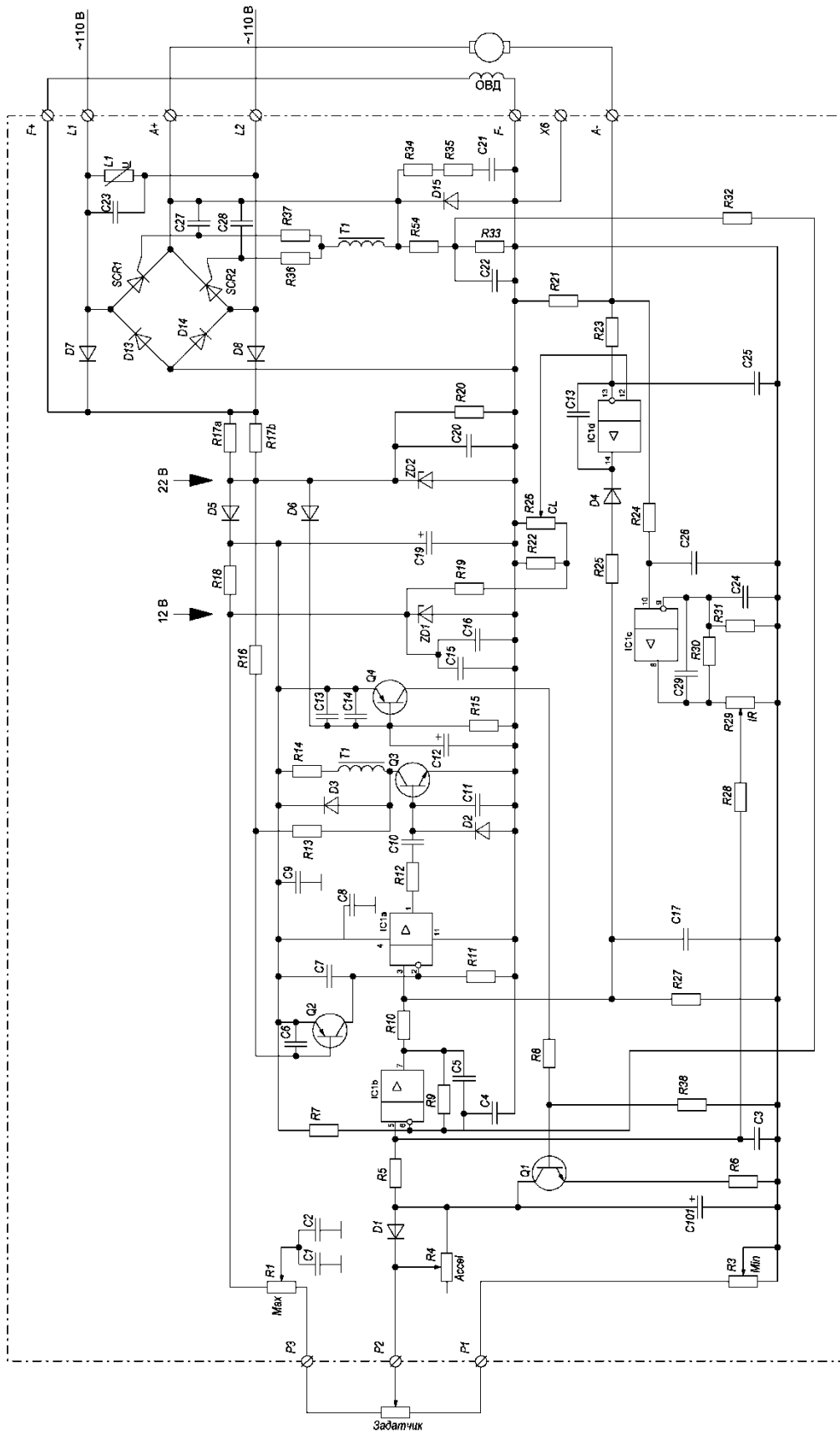


Рисунок 1.35 – Принципиальная схема электропривода KBLC, производство KB ELECTRONICS, INC

Электропривод работает следующим образом. Параллельно зажимам, подключенным к питающей сети, стоит конденсатор С23 и варистор L1. Они служат для защиты от бросков напряжения. Обмотка возбуждения двигателя (ОВД) с независимым возбуждения подключается к выходу выпрямительного моста образованного диодами D7, D8, D13, D14. Среднее напряжение на ОВД вычисляется по формуле

$$U_{ОВД} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U, \quad (1.6)$$

где $U_{ОВД}$ - напряжение на обмотке возбуждения двигателя;
 U – СКЗ напряжения сети.

То есть для сетевого напряжения равного 110В, среднее значение тока ОВД ДПТ будет равно 60 Вольтам, а для 230 Вольт – 103 Вольта. Этот же выпрямитель используется для получения 22 и 12 Вольт необходимых для питания регулятора. Якорь двигателя подключен к выходу выпрямительного моста образованного диодами D13, D14 и тиристорами SCR1, SCR2. Величина силы тока якоря измеряется шунтом R21, а напряжение делителем, состоящим из R54, R33, C22. Электронные компоненты R34, R35, C21 и диод D15 являются демпфером коммутационных процессов в тиристорах SCR1 и SCR2.

Они предназначены для уменьшения скорости нарастания напряжения при запирации. Напряжение с шунта R21 поступает на ФНЧ (фильтр низкой частоты), выполненный на операционном усилителе IC1с и относящихся к нему элементах. Также оно приходит на узел токоограничения, выполненный на операционном усилителе IC1d и относящихся к нему элементах. При нормальной работе напряжение на неинвертирующем входе больше сигнала шунта и поэтому влияния на работу регулятора IC1d не оказывает, так как выходное напряжение IC1d равно напряжению насыщения интегрального операционного усилителя, а значит включенный последовательно с выходом диод заперт и не проводит ток. Напряжение с выхода ФНЧ, пропорциональное току якоря, поступает на вход регулятора противо-ЭДС. Регулятор противо-ЭДС собран на дифференциальном усилителе IC1b и относящихся к нему

элементах. К этому же неинвертирующему входу IC1b приходит сигнал задания, а к инвертирующему приходит сигнал с делителя напряжения якоря (R54, R33), смещенное в положительную сторону резистором R7. Таким образом, на входах усилителя IC1b вычисляется значение противо-ЭДС и из него производится вычитание напряжения задания. В цепи отрицательной обратной связи регулятора противо-ЭДС параллельно соединены резистор и конденсатор. То есть регулятор противо-ЭДС является апериодическим звеном. Напряжение с выхода регулятора противо-ЭДС поступает на неинвертирующий вход СИФУ. СИФУ выполнено на интегральном усилителе IC1a и относящихся к нему элементах. СИФУ выполнено по вертикальному принципу, то есть на нем сравниваются уровни напряжения на входе с сигналом внутреннего генератора, синхронизированного с сетью. Внутренним генератором является генератор линейно убывающего напряжения, выполненный на Q2, C7, R11. Генератор линейно убывающего напряжения работает следующим образом. В нормальном режиме транзистор Q2 заперт напряжением смещения поступающим через резистор R16. Когда транзистор Q2 заперт, то конденсатор C7 заряжается через резистор R11, тем самым уменьшая напряжение на инвертирующем входе компаратора IC1a. Когда полуволна сетевого напряжения оканчивается, то напряжение на параметрическом стабилизаторе образованном R17a, R17b, C20, ZD2, R20 обращается в ноль, а значит база транзистора Q2 смещается в прямом направлении нулевым напряжением на резисторе R16. В результате конденсатор C7 быстро разряжается через Q2, а значит напряжение на инвертирующем входе IC1a возрастает до напряжения питания микросхемы IC1. После этого цикл работы генератора начинается заново. Компаратор IC1a сравнивает это линейно убывающее на инвертирующем входе с напряжением регулятора противо-ЭДС. Чем больше напряжение на выходе регулятора противо-ЭДС, тем быстрее переключится выход IC1a в состояние положительного насыщения. Импульсы с выхода СИФУ поступают на вход формирователя импульсов, выполненного на транзисторе Q3 через дифференцирующую цепочку R12, C10. Переход база-

эмиттер транзистора Q3 защищен от обратных выбросов напряжения и «дребезга» напряжения при переключении IC1a при помощи обратного диода D2 и конденсатора C11. Полученный таким образом импульс, через разделяющий трансформатор T1 подается на управляющие электроды тиристоров, тем самым отпирая один из них, который в данный момент смещен в прямом направлении.

Если сила тока якоря двигателя увеличиться до такого уровня, что напряжение на токоизмерительном шунте R21 станет выше уставки «CL», заданным потенциометром R26, то выходное напряжение узла токоограничения, выполненного на IC1d, будет уменьшаться, тем самым уменьшая напряжение на входе СИФУ, а значит и уменьшая среднее напряжение на якоре двигателя.

Кроме этого плата KBLC содержит узел задания скорости реакции на увеличение напряжения задания и параметрические стабилизаторы напряжения равного 22 и 12 Вольт. Схема задания скорости реакции на увеличения напряжения задания состоит из интегрирующей цепочки (D1, R4, C101) и схемы сброса запомненного уровня скорости при включении, состоящей из Q4, C12, C13, C14, R15. Интегрирующая цепочка замедляет нарастание напряжения задания, но не препятствует его уменьшению.

1.10 Системы подчиненного регулирования

Все ранее рассмотренные алгоритмы регулирования скорости вращения электрического двигателя постоянного тока имеют только один контур обратной связи по переменной состояния связанной со скоростью вращения двигателя. Электронные блоки, реализующие такой алгоритм управления, как правило, в своем составе имеют только дискретные электронные компоненты. Добавление к ранее рассмотренным алгоритмам управления двигателем постоянного тока внутреннего контура отрицательной обратной связи по силе тока якоря позволит добиться следующих качественных улучшений:

- улучшить линейность;
- уменьшить влияние напряжения сети на скорость вращения;
- ускорить реакцию на изменение тормозного момента сопротивления ротора двигателя;
- уменьшить время разгона или торможения;
- повысить точность;
- ограничить силу тока в разумных пределах, что особенно важно для двигателей с постоянными магнитами, в которых они могут размагнититься.

С другой стороны, внутренний контур обратной связи не может качественно повысить точность конечной установки статической скорости, поэтому в случаях, когда главным фактором в выборе алгоритма, реализованном в системе управления электроприводом постоянного тока, является цена, то предпочтение отдается одному из ранее рассмотренных алгоритмов, любой из которых возможно реализовать используя только дискретные компоненты, так как электронный блок созданный с использованием только дискретных электронных компонентов дешевле электронного блока той же выходной мощности, но содержащем пленочные микросхемы в несколько раз.

Развитие технологии производства пленочных микросхем делает их дешевле, а значит и использование систем подчиненного регулирования более предпочтительным. Для этого были разработаны специальные аналоговые микросхемы, которые реализуют подчиненное регулирование двигателем постоянного тока с обратной связью по скорости. Тем не менее, системы с одним контуром обратной связи или даже с прямым управлением без обратных связей используются в новых разработках электроприводов мощностью до 1 кВт. Например, практически весь ручной механизированный инструмент продолжает использовать прямое управление напряжением. Это связано еще с тем, что один датчик тока для таких систем может оказаться дороже или

больше всего устройства регулирования оборотов без отрицательной обратной связи по силе тока якоря двигателя постоянного тока.

Силу тока в электроприводах измеряют тремя способами. Сравнение всех трех способов измерения силы тока.

1. Шунт. В этом случае потребуется усилитель постоянного тока с очень низким напряжением смещения приведенного к входу. Например, если использовать в качестве усилителя шунта, интегральный операционный усилитель общего назначения, у которого напряжение смещения приведенное ко входу равно около 10 мВ, то для корректного измерения силы тока с точностью около 10%, потребуется размах напряжения на шунте более 100 мВ. В этом случае, при необходимости измерять силу тока до 10А, потребуется шунт который, согласно закону Ома и Джоуля-Ленца, будет выделять в окружающую среду тепловую энергию равную

$$P = U \cdot I = 100\text{мВ} \times 10\text{А} = 1\text{Вт}, \quad (1.7)$$

где U – падение напряжения на шунте;

I – сила тока проходящая через шунт.

Резистор мощностью в 1 Вт имеет габариты больше, чем полупроводниковый триод в корпусе ТО-220, которые используются в большинстве систем управления двигателями постоянного тока в качестве электронного вентиля. Фотография резистора номинальной мощностью 1 Вт и, для сравнения размеров, транзистора в корпусе ТО-220, показаны на рисунке 1.36. Номинальные параметры электронных приборов – это предельно допустимые параметры при которых гарантирована работа в течении 1000 часов, более продолжительная эксплуатация их приводит к их разрушению. У мощных резисторов, при этом «ржавеют» выводы, вплоть до обрыва.

Фотография вывода резистора с насквозь проржавевшем выводом показан на рисунке 1.37. Самое плохое это то, что выгорает эпоксидный клей, которым склеены слои стеклоткани панели, к которой они припаяны. Проще говоря, плата под мощным резистором, работающем в предельном режиме эксплуатации, сначала темнеет, а потом превращается в мягкую черную

стекловату. Такое состояние панели называется «прогаром». Фотография платы со следами перегрева показана на рисунке 1.38.



Рисунок 1.37 – Фотография резистора мощностью 1 Вт и триода в корпусе ТО-220



Рисунок 1.38 – Фотография платы, которая почернела от тепла выделяемого мощным резистором, работающем в предельном допустимом режиме

Поэтому, для длительной эксплуатации электронного блока, надо использовать шунт с хотя бы с двукратным запасом по мощности. Резистор с номинальной мощностью равной 2 Ваттам занимает еще больше места. Фотография резистора мощностью 2 Ватта и, для сравнения размеров, транзистора в корпусе ТО-220, показаны на рисунке 1.39. Кроме того, шунт

будет выделять тепло, которое должно рассеиваться во внешней среде, а значит корпус регулятора вращения с таким шунтом нельзя делать герметичным и маленьким.

Проблему увеличения габаритов системы управления двигателем с токоизмерительным шунтом можно решить использованием специальных аналоговых микросхем, предназначенных для усиления падения напряжения на шунте. Эти микросхемы обладают критически важным для такого использования свойством: у них очень низкое напряжение смещения приведенное ко входу.

Например, у микросхемы типа ina216, производства Texas Instruments, указанное на этикетке напряжение смещения приведенное ко входу равно 30 мкВ, что на 3 порядка ниже, чем у счетверенного операционного усилителя общего назначения (lm324 или tl084). При этом цена микросхемы ina216 у digikey, официального дистрибьютера texas instrument составляет 608.73 доллара/1000 штук, а микросхемы lm324 составляет 103 доллара/1000 штук. То есть дороже в 6 раз. Соответственно, использование токового шунта приводит к значительному подорожанию конструкции. Кроме того, такой метод не позволяет сделать цепи управления изолированными от силового преобразователя и имеет ограничения по напряжению.

2. Датчик тока использующий эффект Холла. Эффект Холла – это появление напряжения на зажимах проводника помещенного в постоянное магнитное поле при протекании по проводнику поперечного тока. В простейшем случае, он состоит из магнитопровода, похожего на магнитопровод трансформатора, в котором прорезана поперечная щель, в которую помещена гибридная микросхема с тремя выводами, выдающая напряжение пропорциональное магнитному потоку через магнитопровод. В этот магнитопровод вставляется провод, у которого необходимо измерить силу тока проходящего через него. Такой датчик Холла называется «датчик прямого усиления на эффекте Холла».

Фотография датчика прямого усиления на эффекте Холла показана на рисунке 1.40. Кроме таких больших датчиков прямого усиления, существуют датчики тока, выпускающиеся в виде маленьких микросхем, примером таких датчиков являются микросхемы производства Allegro MicroSystems LLC, но такие микросхемы стоят еще дороже усилителей токоизмерительного шунта. Например, микросхема ACS709 [105] стоит 1929 долларов за тысячу штук, что в три раза дороже микросхемы ina216. Такие датчики используются в электроприводах ф. indramat.

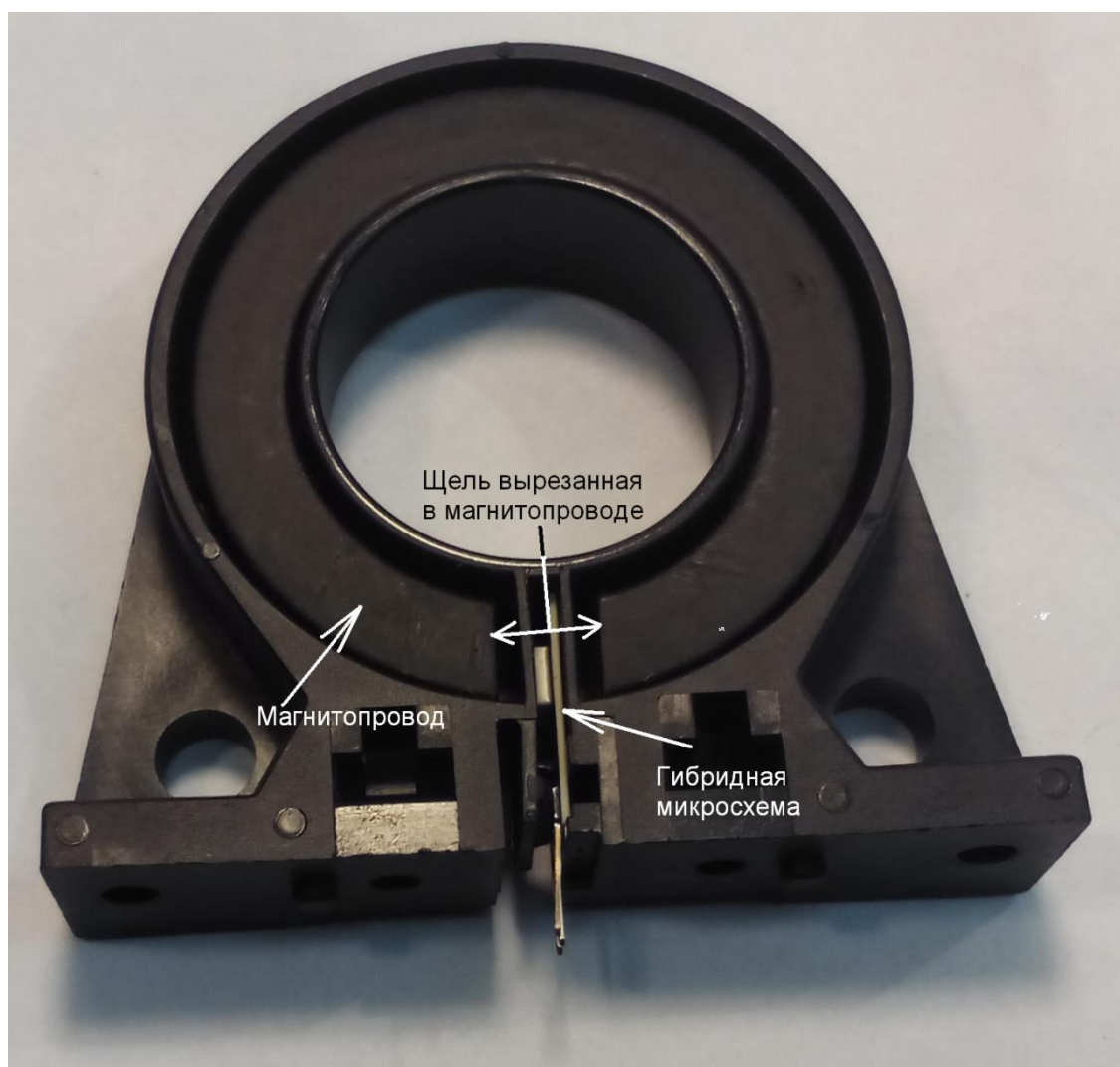


Рисунок 1.40 – Фотография датчика прямого усиления на эффекте Холла

Фрагмент схемы системы управления indramat tdm 1.2, содержащий датчик тока, показан на рисунке 1.41. На схеме видно цепь компенсации напряжения смещения равного приблизительно половине напряжения питания,

характерного для датчиков Холла прямого усиления. Она состоит из резистора R7 и потенциометра P3.

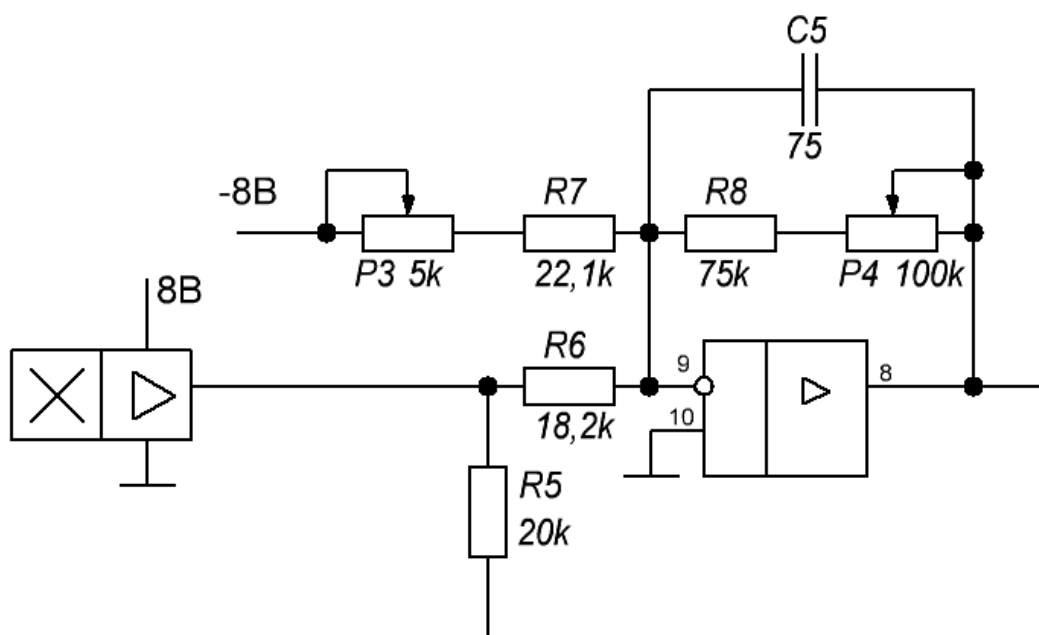


Рисунок 1.41 – Фрагмент схемы системы управления электроприводом indramat tdm 1.2

У такого датчика есть два недостатка:

- при отсутствии тока в проводнике, в котором необходимо измерить силу тока, он выдает напряжение приблизительно равное половине напряжения питания;
- существует дрейф нуля, около 200мВ из-за гистерезиса.

Для их компенсации в датчик Холла добавляют контур размагничивания ферромагнитного сердечника. Такие датчики тока, в отличие от датчиков Холла прямого усиления, имеют токовый выход. То есть они подключаются аналогично обычным трансформаторам тока, коэффициент передачи тока которого указывается на этикетке. Схема датчика тока LA55-P [106] показана на рисунке 1.42. Такие датчики тока называют «компенсационный датчик Холла».

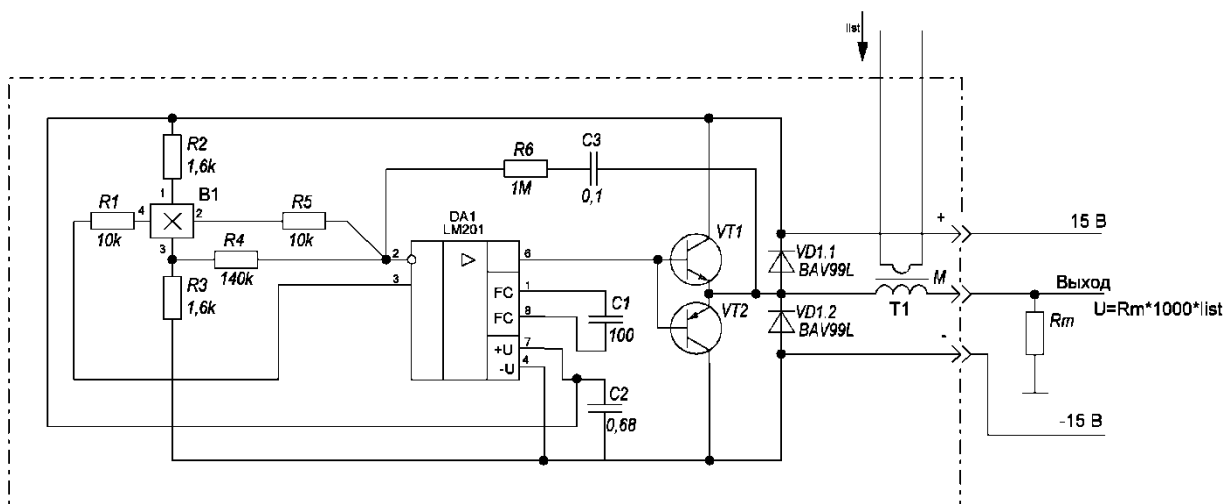


Рисунок 1.42 – Принципиальная схема датчика тока LA55-P

Как видно, датчик тока LA55-P состоит из пассивного датчика Холла В1, напряжение на поперечных пластинах которого усиливается дифференциальным усилителем, состоящим из интегрального операционного усилителя DA1 и эмиттерного повторителя состоящего из двух биполярных транзисторов VT1 и VT2. Напряжение с выхода этого дифференциального усилителя подается на размагничивающую обмотку, которая уже за пределами датчика тока соединяется с общим проводом через резистор. Таким образом, с точки зрения внешней цепи, компенсационный датчик Холла является измерительным трансформатором постоянного тока. Фотографии датчика LA55-P показаны на рисунке 1.43.

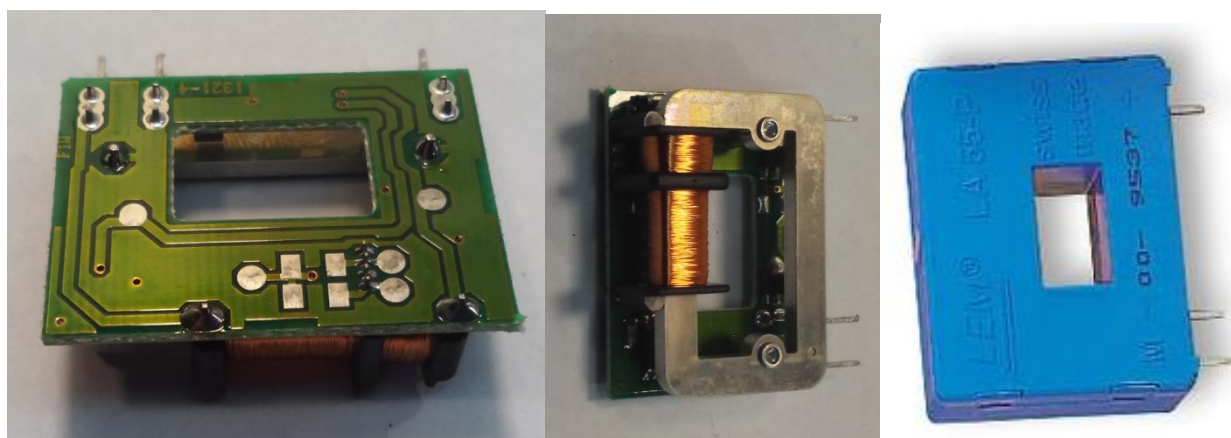


Рисунок 1.43 – Фотографии датчика тока LA55-P

Компенсационные датчики Холла, кроме высокой цены обладают еще большим размером. На рисунке 1.44 показана фотография датчика тока LTS25-NP [101]и, для сравнения, транзистора в корпусе ТО-220.

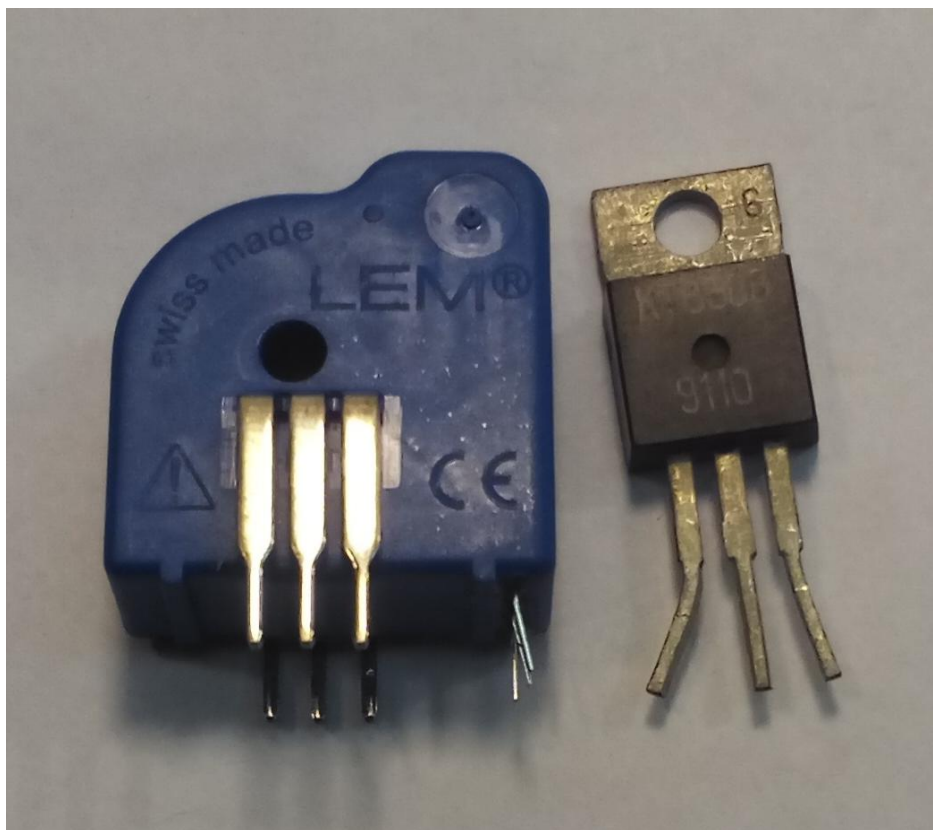


Рисунок 1.44 – Фотография датчика тока LTS25-NP

Трансформаторы тока обладают двумя существенными недостатками: они большие и работают на переменном токе. Они обладают размерами даже больше, чем компенсационные датчики Холла. Оба типа датчиков тока содержат трансформатор тока, только в магнитопроводе измерительного трансформатора тока нет зазора и обмотки размагничивания, а в компенсационном датчике Холла есть. Поэтому, чтобы магнитопровод трансформатора тока не был в состоянии магнитного насыщения ферромагнитного сердечника, необходимо использовать магнитную систему большего размера, чем в компенсационном датчике Холла, в котором есть обмотка размагничивания и зазор в магнитопроводе для помещения датчика Холла, который дополнительно еще линеаризует кривую намагничивания. На рисунке 1.45 показана фотография трансформаторов тока, смонтированных на

приводе ЭПУ 1.2 и, для сравнения, датчика Холла компенсационного типа LA-55P с транзистором в корпусе ТО-220. Трансформаторы тока в электроприводе ЭПУ 1.2 рассчитаны на тот же предельно допустимый ток, что и датчик LA55-P.

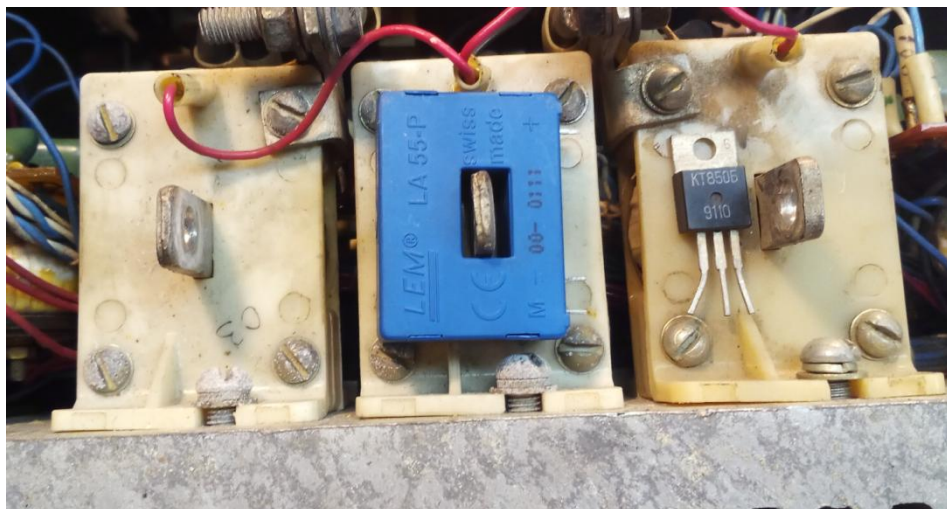


Рисунок 1.45 – Фотография трансформатора тока от электропривода ЭПУ 1.2

То что они могут использоваться только для переменного тока не только ограничивает область применения измерением тока потребляемого из сети, но еще может привносить температурную нестабильность, так как для дальнейшего использования измеренную силу тока необходимо будет выпрямить при помощи полупроводниковых диодов, у которых сопротивление при увеличении температуры быстро уменьшается. Такой явление наблюдается в электроприводе ЭПУ 1.2...Д. Схема датчика силы тока обмотки возбуждения комплектного электропривода ЭПУ 1.2...Д показана на рисунке 1.46. На схеме видно диод V74, включенный последовательно с резистором R64. Диод с резистором R64 являются шунтом трансформатора тока.

Датчик Тока Возбуждения (ДТВ)

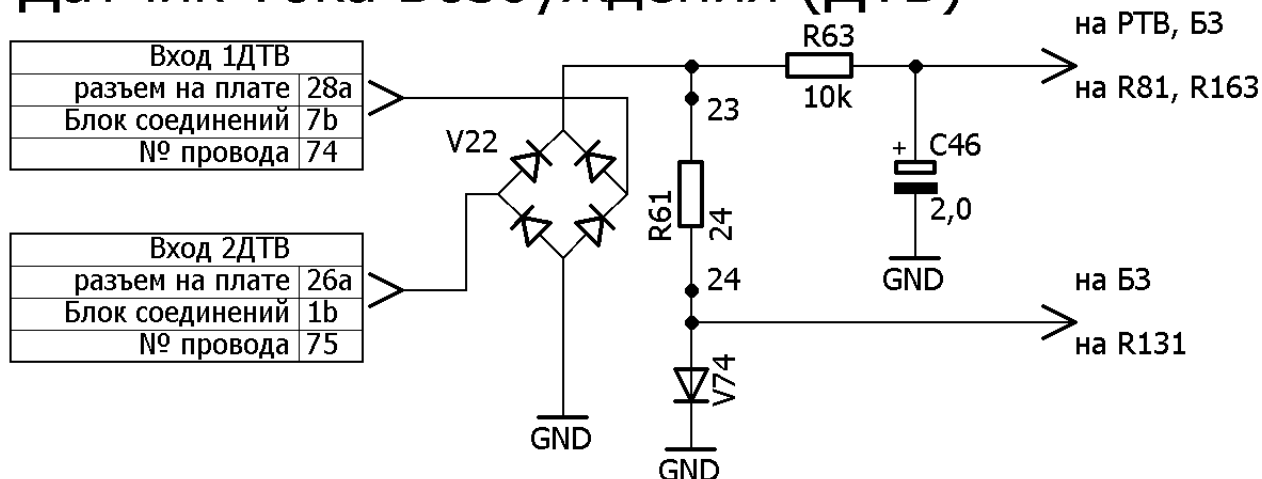


Рисунок 1.46 – Фотография трансформатора тока от электропривода ЭПУ 1.2

Диод используется блоком защит для контроля наличия тока возбуждения, а падение напряжения на резисторе и диоде регулятором тока возбуждения. Во время работы привода диод V74 нагревается расположенными под ним тиристорами управляющими током обмотки возбуждения и падение напряжения на нем уменьшается. В результате сила тока во время работы увеличивается на десять процентов. Хотя такое включение диода может быть и при использовании датчика Холла компенсационного типа, но так как для него не требуется использование выпрямителя, то вероятность использования такого решения намного ниже.

Таким образом, из-за отсутствия маленьких и дешевых датчиков силы тока, системы управления электроприводом постоянного тока, без внутреннего контура отрицательной обратной связи по силе тока якоря двигателя будут еще очень долго использоваться в устройствах, где основным критерием для выбора алгоритма управления является низкая цена и маленькие габариты.

Цена датчиков тока теряет значение для систему управления электроприводами мощностью больше одного киловатта, так как у них активное сопротивление якоря меньше одного Ома, соответственно использование блока в котором нет постоянно действующего ограничения тока потребления может приводить к появлению токов равным сотням и даже

тысячам ампер, которые могут приводить к пожарам, травмам, разрушением и другим техногенным катастрофам. Поэтому регуляторы в таких преобразователях всегда работают по принципу подчиненного регулирования. Эти преобразователи, построенные по принципу подчиненного регулирования, кроме собственно регулятора почти всегда имеют в своем составе блок защиты и сигнализации и источник стабилизированного питания регулятора изолированного от сети, что еще сильнее усложняет конструкцию.

Конструкции регулятора и силового преобразователя очень сильно зависят от типа используемых силовых электронных ключей. Область применения электронных ключей выполненных по разным технологиям показано на рисунке 1.47.

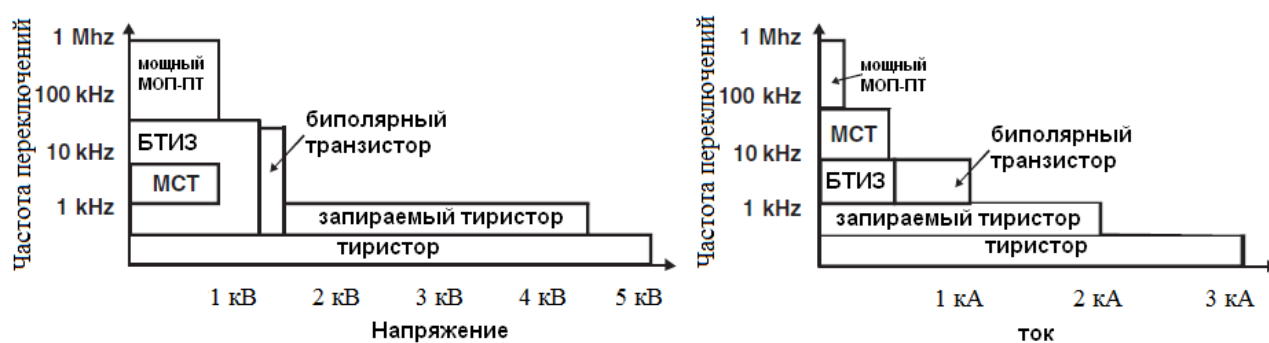


Рисунок 1.47 – Сравнение областей использования различных типов полупроводниковых приборов

Использование тиристорov в электроприводах постоянного тока предполагает преобразователь выполненный по топологии ведомого сетью инвертора, а БТИЗ (биполярных транзисторов с изолированным затвором) или БТ (биполярных транзисторов) предполагает использование автономного конвертора постоянного напряжения в постоянное напряжение. Такое различие очень сильно влияет на реализацию регулятора, так как для регулятора управляющего ведомым сетью выпрямителем желательно иметь узел линеаризующий нелинейную зависимость выходного напряжения от величины противо-ЭДС и угла отпирания тиристорov, а в случае реверсивного

преобразователя еще и узел логического управления с переключателем характеристик. Они необходимы для переключения используемых групп тиристоров. Использование биполярных транзисторов очень сильно усложняет конструкцию предусилителя (драйвера) по сравнению с преобразователями выполненными на БТИЗ или управляемых кремниевых выпрямителей, так как у мощных биполярных транзисторов очень низкий коэффициент усиления тока. Поэтому предусилители должны уметь управлять высокими токами. Поэтому в настоящее время, в новых разработках, биполярные транзисторы в силовой схеме электроприводов не используются, но продолжают эксплуатироваться ранее выпущенные.

Обзор использования наиболее распространенных типов полупроводниковых вентилях в электроприводах постоянного тока показано в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнение систем управления электроприводом, использующем различные типы электронных вентилях

Характеристика		Тип полупроводникового прибора		
		УКВ	БТ	БТИЗ
Полоса пропускания	Высокая		*	*
	Низкая	*		
Сложность регулятора	Высокая	*		
	Низкая		*	*
Сложность предусилителя	Высокая		*	
	Средняя			*
	Низкая	*		
Использование в новых разработках	Используется	*		*
	Не используется		*	

Несмотря на эти различия, большинство регуляторов частоты вращения, использующие принцип подчиненного регулирования, имеют в своем составе регулятор скорости и тока, узел теплового токоограничения, блок защит и диагностики. Поэтому дальше описывается пример такого преобразователя. Это ПТ-240 производства ПТО ВАЗа. Название его – это сокращение от преобразователь транзисторный, напряжением питания 240 В постоянного тока.

Фотография блока показана на рисунке 1.48.

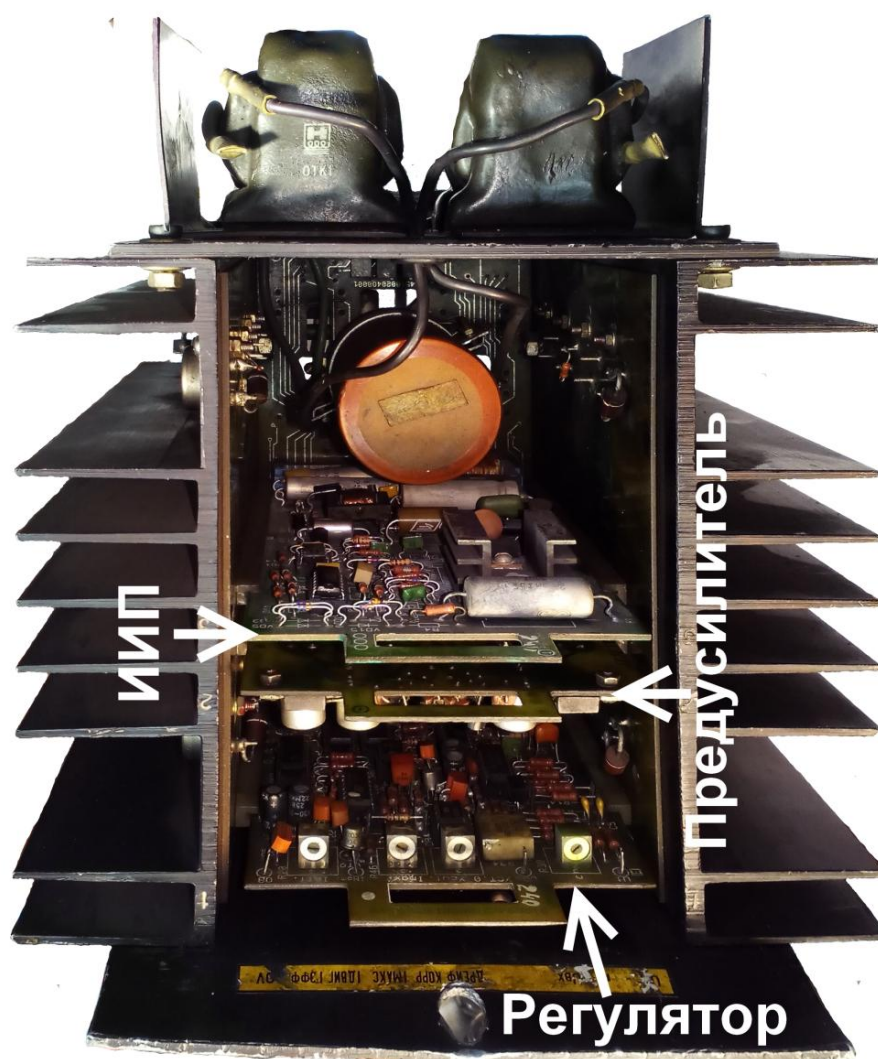


Рисунок 1.48 – Фотография ПТ-240

Схема подключения показана на рисунке 1.49.

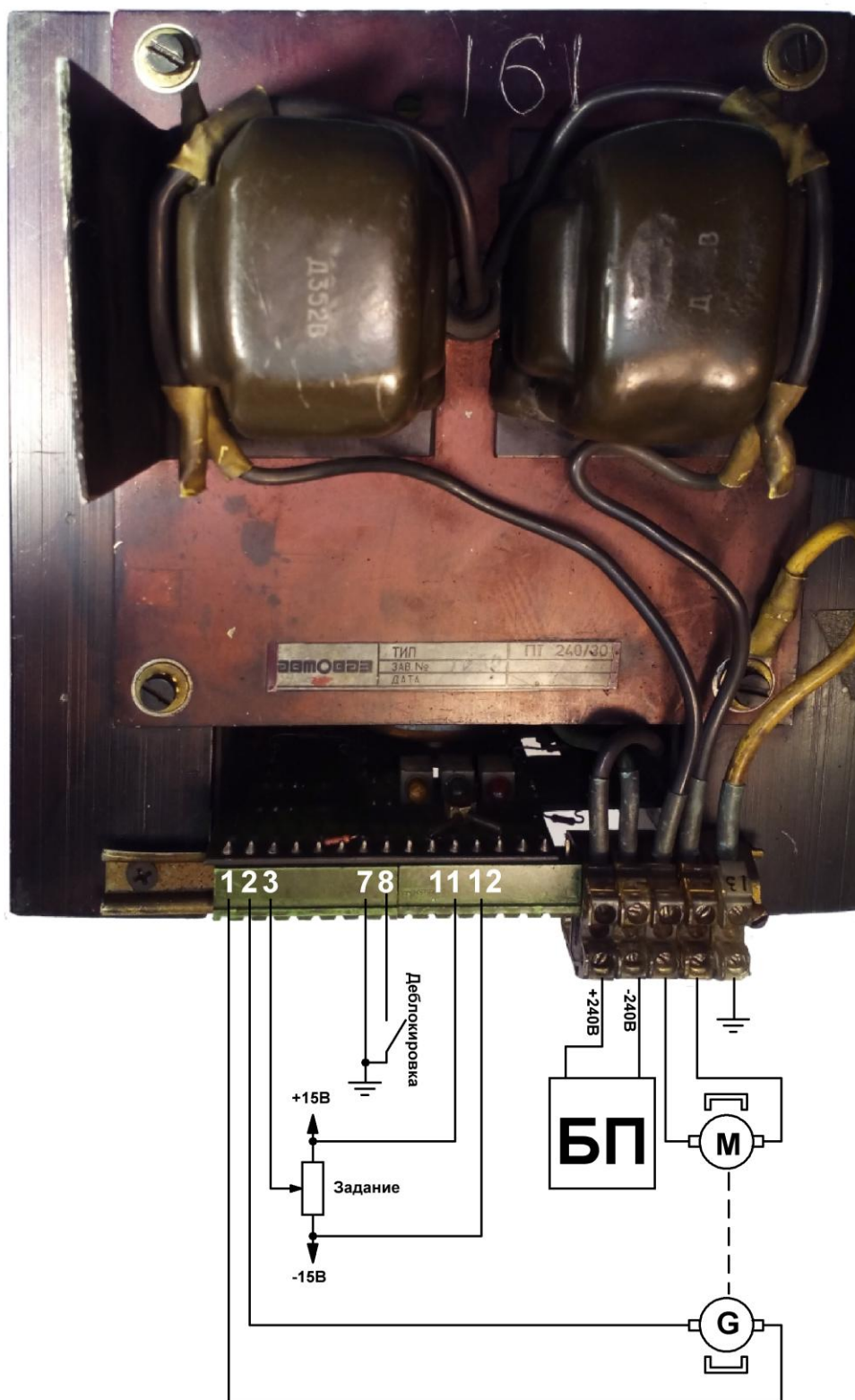


Рисунок 1.49 – Схема подключения ПТ-240

Функциональная схема показана на рисунке 1.50.

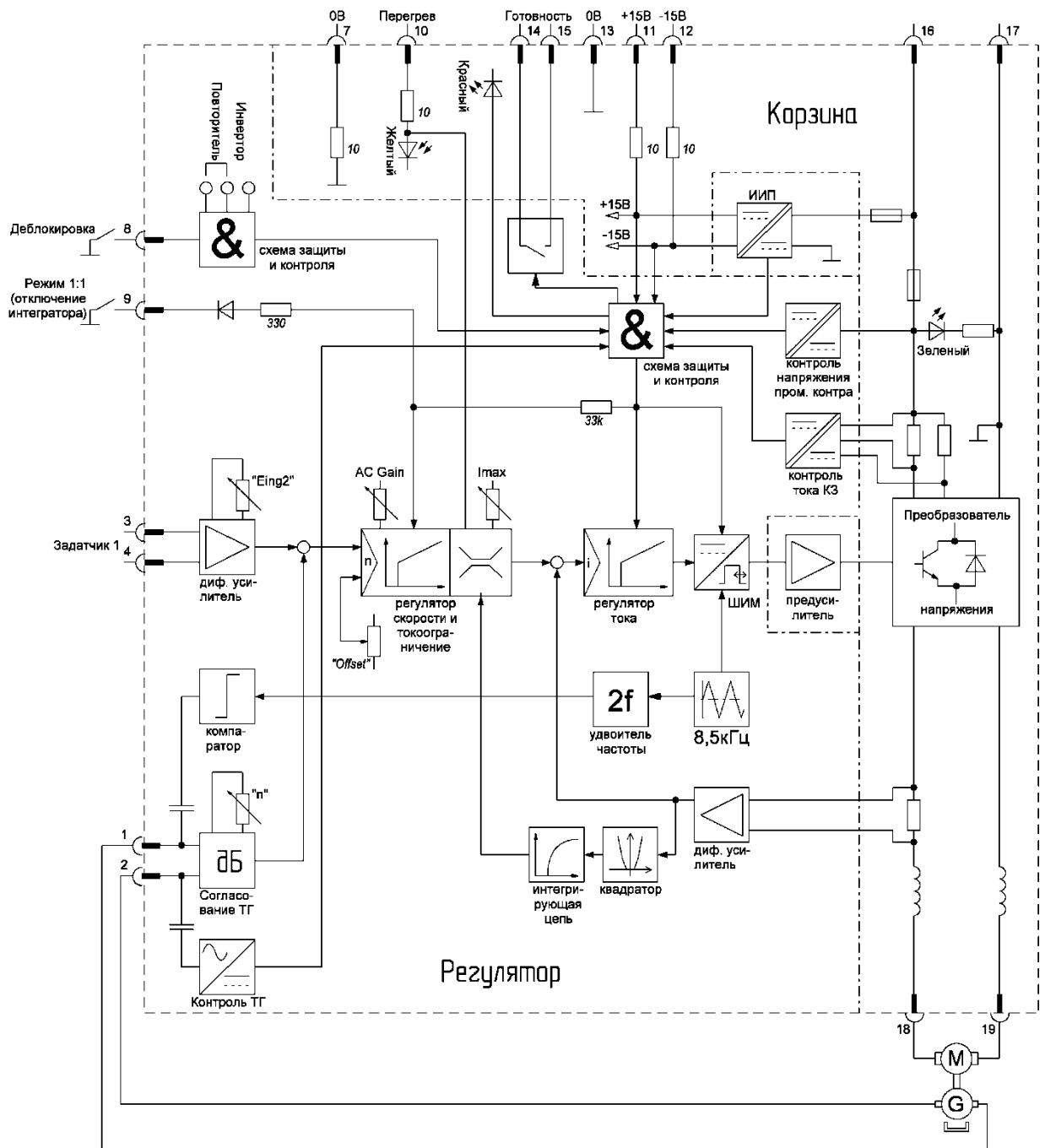


Рисунок 1.50 – Функциональная схема системы управления ПТ-240

Расположение электронных компонентов на плате показано на рисунке 1.51. Преобразователь состоит из корзины с монтированным на ней выходным ключевым каскадом и трех блоков (плат). Три блока преобразователя: «регулятор», «предусилитель» и ИИП (Источник Импульсного Питания).

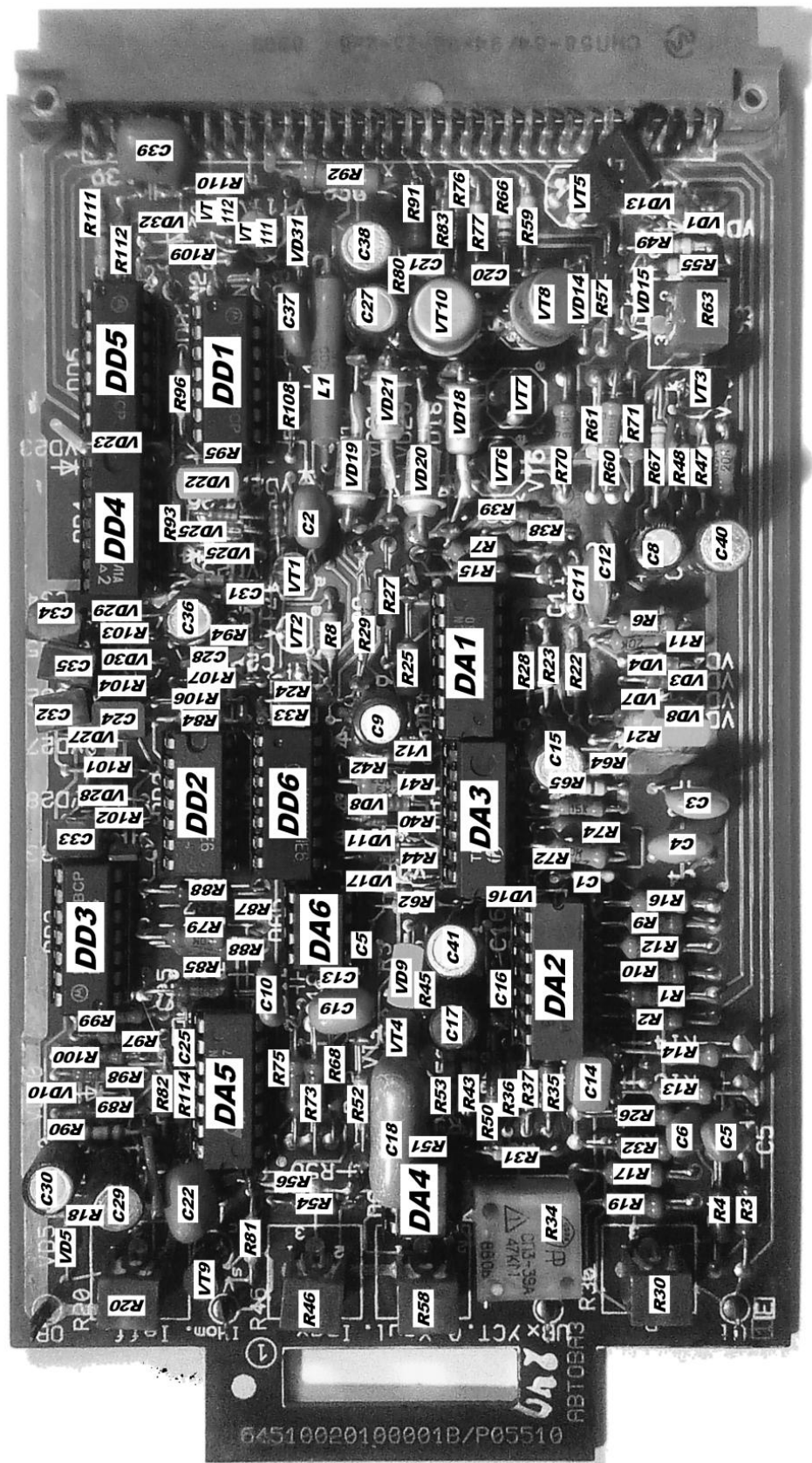


Рисунок 1.51 – Расположение электронных компонентов на плате регулятора

ПТ-240

Выходной каскад работает в режиме широтно-импульсной модуляции питающего напряжения и предназначен для выдачи регулируемой мощности на двигатель. Предусилитель служит для согласования по напряжению и току блока регулятора с выходным ключевым каскадом. Регулятор предназначен для управления работой преобразователя по закону, заданному входными сигналами. ИИП служит для питания стабилизированным напряжением регулятора и предусилителя.

Блок «регулятор» состоит из следующих узлов:

- дифференциального усилителя сигнала задания;
- устройства согласования ТГ с регулятором скорости;
- регулятора скорости (регулятора частоты вращения) с ограничителем тока;
- регулятора тока;
- генератора пилы частотой 8,5 кГц;
- Широтно-импульсного регулятора;
- схемы контроля целостности цепи ТГ (сопротивления ТГ);
- дифференциального усилителя напряжения шунта;
- квадратора и интегратора, для получения сигнала пропорционального i^2t ;
- схемы защиты и контроля;
- компаратора преобразующего пилу в прямоугольные импульсы.

На рисунке 1.52 показан фрагмент схемы блока «регулятор», содержащий дифференциальные усилители напряжения задания, узел согласования ТГ с регулятором скорости, регулятор скорости с ограничением тока и регулятор тока. Заданное значение скорости вращения на дифференциальный вход между зажимами 3 и 4. Это напряжение подается на диф. усилитель DA2.1. Значения напряжения на выходе диф. усилителя можно контролировать в контрольной точке Uвх.

Действующее значение скорости вращения поступает на зажимы 1 и 2 преобразователя. Между зажимом 2 преобразователя и выводом 31 блока «регулятор», в корзине преобразователя, реализован полосовой фильтр, который настроен на 17 кГц. Он требуется для контроля целостности цепи тахогенератора и на работу регулятора скорости не влияет, так как полоса пропускания контура тока равняется 1 кГц.

Поэтому зажим 2 преобразователя, при рассмотрении работы регуляторов скорости и тока, можно считать соединенным с корпусом. Далее сигнал с тахогенератора поступает на устройство согласования ТГ с регулятором скорости, который реализован на DA2.3. Устройством согласования является диф. усилителем с коэф. усиления регулируемым потенциометром R30. Этот потенциометр позволяет изменять коэф. ослабления напряжения тахогенератора с 2,8 до 10. Что позволяет нормировать напряжение тахогенератора в пределах от 20 до 30В при напряжении задания 8В.

Диф. усилители напряжений задания и устройства согласования ТГ на входе содержат фильтр низкой частоты с постоянной времени 0.5 мс.

Регулятор скорости собран на ОУ DA2.4, DA4. C14, C16, R35 служат для предотвращения самовозбуждения DA2.4 и повышения его запаса устойчивости. Потенциометр R34 и резисторы R36, R37 служат для задания нулевой частоты вращения. DA4 является повторителем напряжения. Резисторы R43, R53, R50 уменьшают статический коэф. усиления регулятора скорости, тем самым уменьшая дрейф напряжения регулятора скорости. В результате удастся получить возможность регулировать частоту вращения в диапазоне 1 к 10000. В тиристорных управляемых выпрямителях такую цепочку не используют, так как существуют дешевые микросхемы прецизионных операционных усилителей, быстродействия которых хватает для использования в ведомых сетью выпрямителях. Зато в них, иногда, наоборот, используют схему повышения коэффициента усиления при помощи модема, так как в года их производства не существовало еще микросхем ОУ с дрейфом

нуля приведенным ко входу равным 1 мкВ и достаточным усилением. Примером такого решения является электропривод БТУ3601.

R45, VD9, потенциометр R46, R54 служат для ограничения максимального напряжения на выходе регулятора скорости, которое, одновременно, является напряжением задания для контура тока. То есть при помощи потенциометра R46 задается максимальный импульсный ток преобразователя.

Кроме того, ко входу 3 микросхемы DA4 подключены выходные диоды теплового ограничения тока, через которые протекает ток в режиме теплового ограничения тока, тем самым ограничивая напряжение на выходе регулятора скорости.

C18, R52 и потенциометр R58 реализуют цепь обратной связи, необходимую для реализации ПИ-регулятора. Постоянную времени регулирования и коэффициент усиления можно регулировать при помощи резистора R58.

R51 и VT4 выполняют роль цепи разряда конденсатора C18 при блокировке регулятора или превращают ПИ-регулятор скорости вращения в П-регулятор при замыкании зажима 9 преобразователя на корпус.

На DA5.1 реализован ПИ-регулятор тока. В некоторых электроприводах регулятор тока может быть апериодическим звеном, то есть в цепи обратной связи в нем будет использоваться параллельное соединение резистора и конденсатора. Такое решение используется в советском электроприводе ЭПУ 1.2.

Транзистор VT9 служит для разряда конденсатора регулятора тока при блокировке преобразователя.

В советских системах управления электроприводом вместо полевых транзисторов, для коммутации аналоговых сигналов могут использоваться полупроводниковые триоды КТ203 или КТ118. КТ118 или КТ203 – это биполярные транзисторы прямой проводимости, у которых в схемах можно менять местами коллектор и эмиттер, подобно полевым транзисторам с

взаимозаменяемыми выводами стока и истока, если у них подложка не соединена с истоком. Такой обратный режим работы называется «инверсным». Это свойство достигнуто за счет ухудшения усиления в прямом активном режиме. В иностранной литературе такие транзисторы называются «Chopper Transistor», но советский транзистор КТ203А, по сравнению с импортными, обладает выдающимся значением максимально допустимого обратного напряжения база-эмиттер (V_{beo}): у него этот параметр равен 30 В, а у типичного импортного ниже 25В.

На рисунке 1.53 показан фрагмент схемы блока «регулятор», содержащий датчик тока и схему теплового ограничения тока.

Датчик тока состоит из расположенного в корзине измерительного, дифференциального каскада усиления на VT6, VT7 и «инструментального» усилителя (DA1.1 и DA1.2) с коэффициентом усиления 13. Дифференциальный каскад усиления на дискретных компонентах требуется для выделения низкого напряжения шунта (меньше 0,375В) из высокого синфазного напряжения (от 0 до 310В), которое способно разрушить обычный операционный усилитель. Базовый ток VT6 и VT7 стабилизирован с помощью генератора тока (VT5, VD13, R49) и местной обратной связи (R57, R70, VD14). Балансировка каскада настраивается при помощи R63. Коэффициент усиления этого каскада равен 2. Таким образом, напряжению шунта, равному 0.375В (75А), соответствует напряжение 10В на выводе 14 микросхемы DA1. Это напряжение поступает в качестве отрицательной обратной связи на регулятор тока (R75). Так же это напряжение поступает на схему возведения в квадрат (квадратор).

Квадратор состоит из двух частей: схемы выделения модуля (DA1.3) и нелинейного усилителя (DA1.4). Напряжение с выхода квадратора поступает на интегрирующую цепочку (R33, C15) с постоянной времени 10с, на выходе которой получается сигнал пропорциональный i^2t . Этот сигнал поступает на нелинейный усилитель (DA3.1), на другой вход которого поступает опорное напряжение.

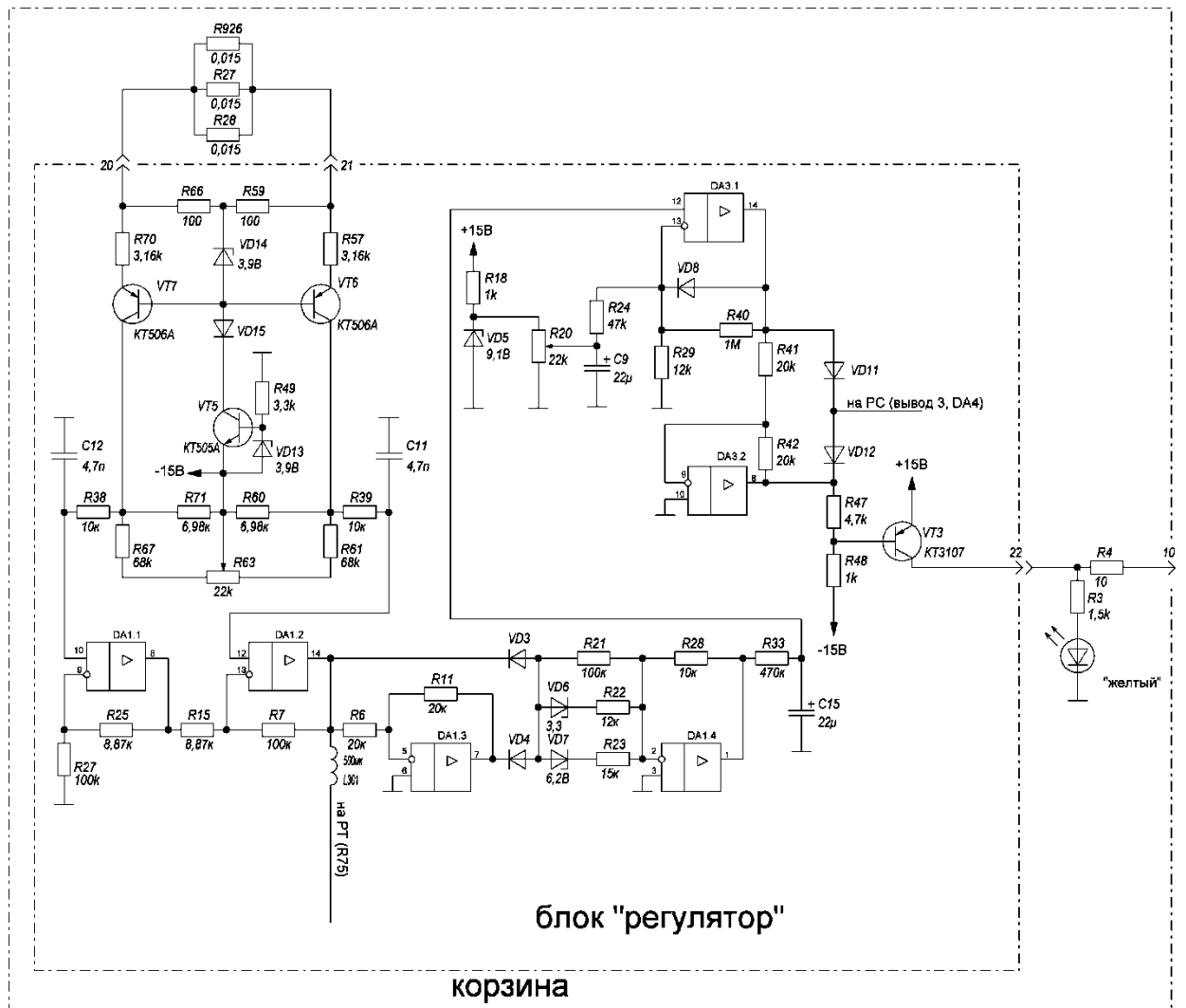


Рисунок 1.53 – Фрагмент схемы блока «регулятор» электропривода ПТ-240, содержащий датчик тока и схему теплового ограничения силы тока

Усилитель DA3.1 работает как переключатель: когда напряжение на входе 12 меньше опорного напряжения, то усилитель имеет очень высокое усиление и на выходе устанавливается равным отрицательному насыщению ОУ (-12...15 В); когда напряжение больше, то выход повторяет напряжение на входе 12. Напряжение с выхода нелинейного усилителя поступает вход инвертора напряжения (DA3.2). Выхода DA3.1 и DA3.2 через диоды VD11 и VD12 соединены с выходом регулятора скорости. Таким образом, когда напряжение на выходе интегрирующей цепочки (сигнал пропорциональный i^2t) меньше опорного, то эта схема не оказывает влияния на контур скорости,

так как напряжение регулятора скорости меньше напряжения насыщения ОУ, так как ограничено стабилитроном VD9, а значит диоды VD11, VD13 заперты и ток через них не «просаживает» напряжение регулятора скорости. Когда напряжение на выходе интегрирующей цепочки (сигнал пропорциональный i^2t) больше опорного, то диоды VD11, VD12 не дадут напряжению на выходе РС стать больше напряжения на выходе интегрирующей цепочки, так как выходное сопротивление ОУ (меньше 1кОм) на порядок ниже сопротивления РС после резистора R54 (10 кОм). Так как напряжение на выходе регулятора скорости является напряжением задания для контура тока, то в режиме теплового ограничения тока, ток двигателя ограничивается на уровне заданном опорным напряжением, поступающим на вход 13 DA3.1. Это опорное напряжение, а значит и ограничение тока при длительной нагрузке, можно изменять при помощи потенциометра R20.

Дополнительно, кроме токоограничения, усилитель DA3.2 служит для индикации и информирования ЧПУ об тепловом токоограничении. Для этого к его выходу подключен транзистор VT3, включенный по схеме с общим эмиттером и работающий в ключевом режиме. В режиме ограничения тока он открывается, в результате чего загорается желтый светодиод на корзине (корпусе преобразователя) и появляется сигнал высокого уровня на зажиме 10 преобразователя.

На рисунке 1.54 показан фрагмент схемы блока «регулятор», содержащий ШИМ, генератор пилы и схему контроля ТГ.

ШИМ и схема контроля тахогенератора использует один генератор треугольного напряжения (DA5.3, DA5.4), настроенный на 8,5 кГц (период 120 ± 10 мкс, амплитуда 10В).

Схема контроля целостности цепи тахогенератора осуществляется методом несущей частоты. Для этого частота «пилы» удваивается выпрямителем (DA3.3).

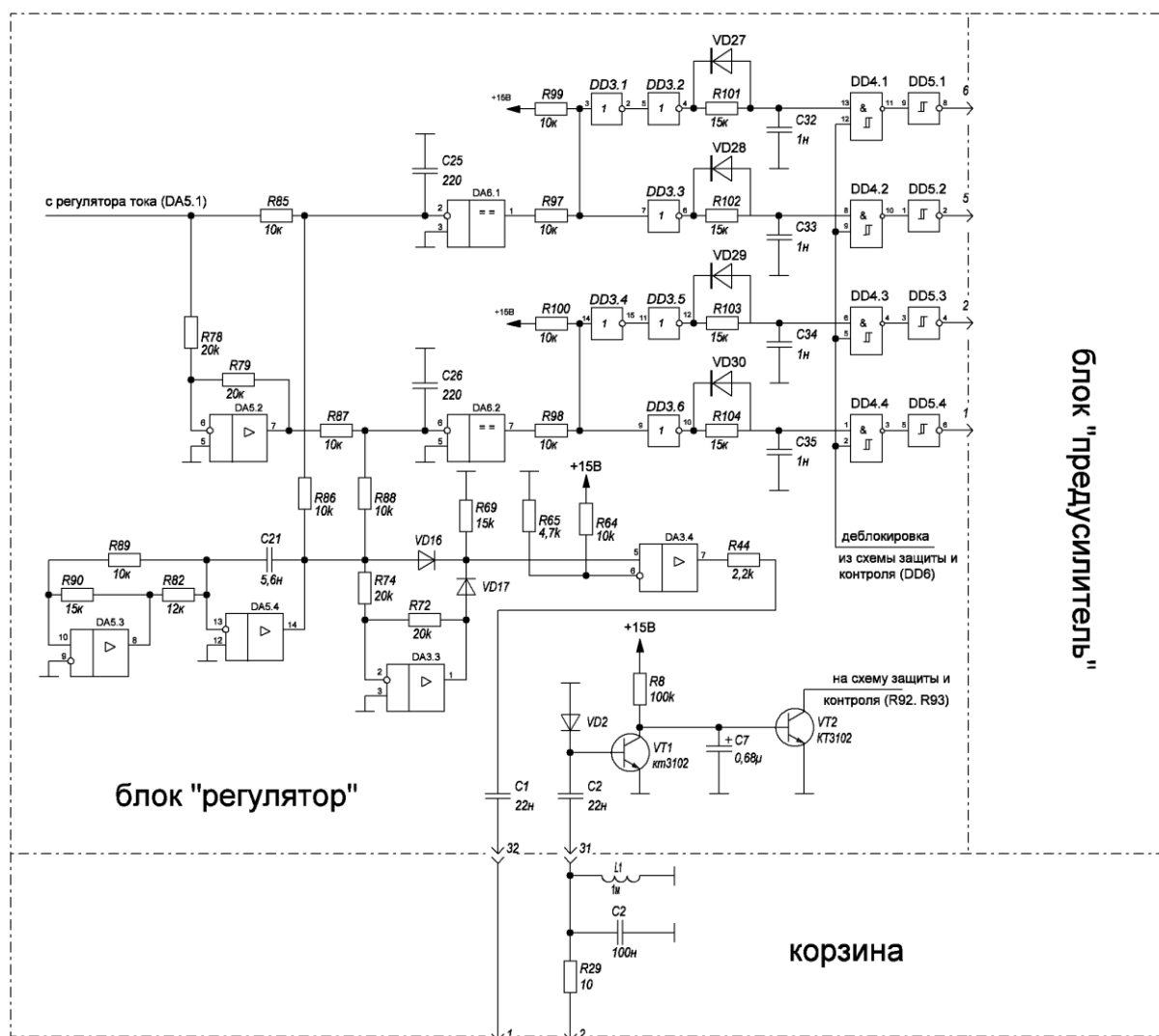


Рисунок 1.54 – Фрагмент схемы блока «регулятор» электропривода ПТ-240, содержащий ШИМ

Далее микросхема DA3.4 формирует прямоугольные импульсы, которые через R44 и C1 поступают в цепь тахогенератора. Если тахогенератор подключен и его цепь не нарушена, то эти прямоугольные импульсы, пройдя через якорь тахогенератора, поступают в преобразователь. Где они отфильтровываются от помех полосовым фильтром L1,C2 и через конденсатор C2 поступают на детектор VD2. Положительное напряжение детектора открывает транзистор VT1 и, соответственно, закрывает триод VT2. Сигнал с коллектора транзистора VT2 поступает на схему защиты и контроля. Схема защиты и контроля в случае обрыва цепи тахогенератора, то есть при

проводящем состоянии VT2, блокирует работу преобразователя. Поэтому для отключения защиты от обрыва тахогенератора достаточно «выкусить» VT2.

Так как выходные транзисторы могут принимать только два состояния: «открыт» или «закрыт», то для получения промежуточных величин, выходные транзисторы переключают попеременно в оба состояния с максимальной возможной частотой. При этом коэффициент заполнения определяет величину выходного напряжения. Для изменения коэффициента заполнения используется ШИМ (Широтно-Импульсный Модулятор).

Напряжение на вход ШИМ (R78,R85) поступает с выхода регулятора тока. На DA5.2 выполнен инвертор полярности напряжения. Напряжение с выхода РТ и инвертора DA5.2 поступает на компараторы DA6.1 и DA6.2, в которых оно сравнивается с треугольным напряжением. Если выходное напряжение регулятора тока равно нулю, то импульсы на выходе компараторов DA6.1 и DA6.2 имеют одинаковую длительность и форму меандра (скважность равна 2). Если выходное напряжение РТ не равно нулю, то скважность импульсов на выходе компараторов изменяется. Эти импульсы далее распределяются на 4 транзистора Н-моста при помощи DD3. Далее инвертированные и неинвертированные импульсы поступают на цепочки задержки положительных импульсов (VD27...30, R101...104, C32...35). На выходе цепочек задержки, импульсы имеют положительный фронт в виде экспоненциальной функции со временем нарастания до половины амплитуды около 10 мкс. Этот уровень соответствует порогу срабатывания триггеров Шмидта DD4. Эта задержка положительных импульсов требуется для предотвращения протекания сквозного тока через каждый полумост, вызванный задержкой запирающих биполярных приборов из-за рассасывания неосновных носителей зарядов. DD4 выполняют логическую функцию «и-не», на них кроме импульсов управления ключами, поступает сигнал разрешения подачи импульсов на силовые ключи (деблокировка) со схемы защиты и контроля. Поэтому если сигнал деблокировки будет равен логическому 0, то импульсы на силовые ключи будут заблокированы. Далее импульсы

инвертируются DD5 и передаются на печатную плату «предусилитель». Эти импульсы в конечном итоге, служат для управления выходными силовыми ключами преобразователя.

На рисунке 1.55 показан фрагмент схемы блока «регулятор», содержащий схему защиты и контроля. Главным элементом схемы защиты и контроля является триггер аварии (DD2). При нормальной работе преобразователя на всех входах микросхемы DD2.1 должны быть логические нули. Входом сброса триггера является вывод 12. При подаче питания, через конденсатор С31 подается сигнал сброса.

Когда на выходе триггера DD2 (вывод 13) низкий уровень, то при помощи DD5 и транзисторов VT11, VT12, загорается красный светодиод на корпусе преобразователя и зажимы на корпусе 14 и 15 размыкаются.

Триггер DD2 контролирует следующие типы аварий:

- повышенное напряжение промежуточного контура и разрушение силовых ключей преобразователя;
- авария ИИП и обрыв цепи тахогенератора;
- пониженное напряжение +15В;
- пониженное напряжение -15В.

В случае повышения напряжения промежуточного контура выше 300В, происходит лавинный пробой диодов Зенера VD18...21, в результате происходит повышение напряжения на резисторах R80 и R84. Как следствие этого, на выводе 5 микросхемы DD2 появляется высокий уровень, который переводит триггер в состояние аварии.

Кроме этого, вход 5 DD2 контролирует короткое замыкание в Н-мосте. Для этого напряжение на каждую транзисторную сборку Н-моста, подключенную к положительной шине питания, подается через шунт контроля тока короткого замыкания (R1...R7).

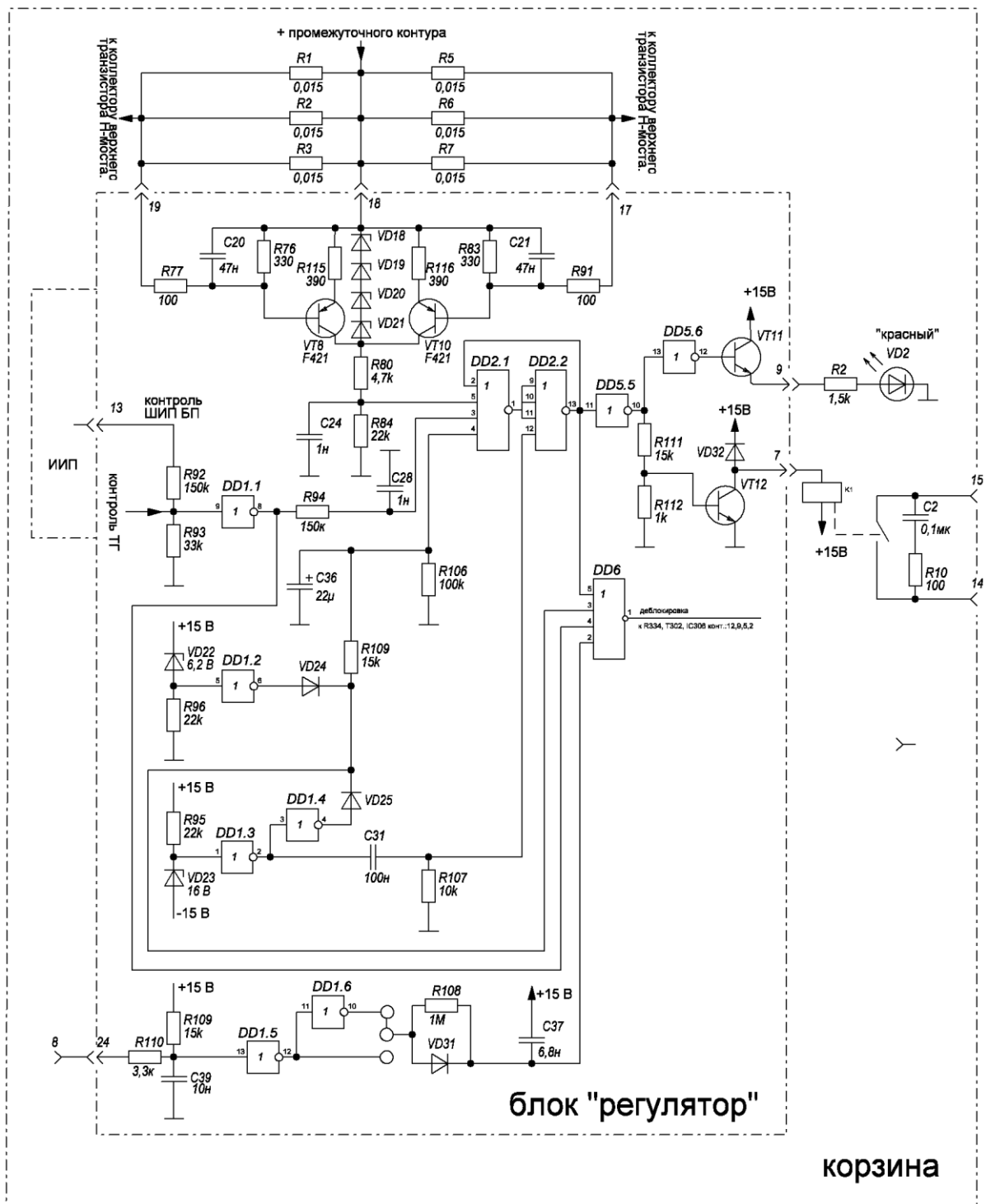


Рисунок 1.55 – Фрагмент схемы блока «регулятор» электропривода ПТ-240, содержащий ШИМ

Падение напряжения на которых, через делитель напряжения (R77,R76, R91...R83, C20, C21) подается на эмитерный переход транзисторов VT8 и VT10. Которые открываются при токе через любой полумост Н-моста больше

180А. В результате появляется высокое напряжение на входе 5 DD2.1, которое переводит преобразователь в режим аварии.

Вход 3 DD2.1 контролирует целостность цепи тахогенератора и работу внутреннего ИИП. Вход 3 соединен с выходом логического элемента «не» (DD1.1). Вход которого подключен к делителю напряжения R92 и R93. При нормальной работе системы управления, на резистор R92 приходит постоянное напряжение, которое выше чем напряжение промежуточного контура, то есть больше 70В, которое при помощи делителя (R92 и R91) понижается до уровня КМОП логики и подается на вход логического элемента DD1.1, который его инвертирует. Так же этот вход DD1.1 подключен к схеме контроля целостности цепи тахогенератора, которая замыкает его на общий провод в случае обрыва тахогенератора. Таким образом, на выходе DD1.1 будет высокий уровень когда есть обрыв тахогенератора или не работает ИИП, тем самым переводя триггер DD2.1 в состояние аварии через подачу высокого уровня на вход 3.

Вход 4 DD2.1 контролирует наличие напряжений +15 В и -15В. Для этого этот вход подключен к схеме монтажного «или», собранного на VD24, VD25, R109, R106. Сигнал на входе VD26 имеет высокий уровень, когда напряжение «плюс 15 В» станет ниже 10В. Сигнал на входе VD25 имеет высокий уровень, когда модуль напряжения «минус 15В» станет ниже 10В. То есть когда модуль напряжения «плюс 15 В» или «минус 15В» становится ниже 10В, то работа преобразователя блокируется.

DD6 служит для генерации сигнала деблокировки. Сигнал деблокировки при вращающемся двигателе имеет уровень логической единицы. Этот сигнал служит для управления разрешением подачи напряжения на двигатель при помощи ШИМ и разряда конденсаторов в ПИ-регуляторах скорости вращения и тока. На его входа подается напряжение с выхода триггера DD2 (вывод 5), со схем контроля отдельных типов аварии (вывод 3 и 4) и сигнал со схемы контроля внешней команды деблокировки (вывод 2).

Что бы привод был разблокирован, на каждом входе DD6 должен быть сигнал низкого уровня. Схема контроля внешней команды деблокировки

служит для выбора уровня входного сигнала управления при помощи переключки. В показанном на схеме состоянии, привод деблокируется при подаче на вход логического нуля, чего можно достичь при помощи замыкания зажима 8 на общий провод.

1.11 Выводы

Системы управления электроприводом с одной петлей обратной связи используются в разнообразных приводах мощностью до 1 кВт, так как в них нет постоянного контроля силы тока. Они используются, если необходим компактный и дешевый электропривод. Таблица, описывающая влияние типа обратных связей на характеристики электропривода показано на таблице 1.2, часть данных взята из указаний к применению AN380, ф. STMicroelectronics [100].

В электроприводах мощностью 10 кВт и больше используются системы подчиненного регулирования, то есть системы с внутренним контуром отрицательной обратной связи по току. Дополнительно они имеют узел защиты и диагностики. Основной обратной связью в большинстве случаев является ООС по скорости. Регулятором скорости является ПИ-регулятор, а регулятор подчиненного контура скорости – ПИ-регулятор или апериодический регулятор.

Поэтому наиболее важной задачей является продление срока службы, а значит и диагностика неисправностей, электроприводов с подчиненным управлением, так как они самые дорогие, тяжелые, сложные и мощные из всех остальных типов.

Так как в них могут быть силовые преобразователи разных топологий, в зависимости от года производства, мощности и быстродействия, но регуляторы созданы по одной общей схеме, то дальше будут анализироваться только способы диагностики регуляторов подчиненного регулирования.

Таблица 1.2 – Сравнение систем управления электроприводом, использующем различные типы электронных вентиляей

Характеристика		Способ управления							
		Прямое изменение коэффициента заполнения	Контроль коммутации коллекторных пластин	Прямое изменение противо-ЭДС	Контроль напряжения	Изменение скорости вращения аннало-говым датчиком	Фазовая автоподстройка частоты вращения	Положительная обратная связь по силе тока якоря	Наблюдатель противо-ЭДС
Точность	Высокая		*				*		
	Средняя			*		*			
	Низкая	*			*			*	*
Быстродействие	Высокое	*		*	*	*		*	*
	Низкое		*				*		
Характеристики при низкой скорости вращения	Хорошие			*		*			
	Плохие	*	*		*		*	*	*

2 Существующие способы диагностики неисправностей в регуляторах

2.1 Проверка электронных компонентов по отдельности

Большинство полупроводниковых приборов изготавливаются из кремния, из-за чего, иногда, даже транисторы называют кремниевыми управляемыми выпрямителями. Необратимое разрушение кремниевых биполярных полупроводниковых приборов возникает из-за расплавления кремния, после кристаллизации которого, рп-переход становится проводящим в обоих направлениях. Естественно, если процесс нагрева продолжить до взрыва или испарения содержимого полупроводникового прибора, то рп-переход станет, просто, изолятором, но в этом случае корпус прибора будет иметь видимые механические повреждения.

То есть в простейшем случае, исправный биполярный полупроводниковый прибор, то есть состоящий только из рп-переходов без МОП структур и переходов Шоттки, должен обладать следующими свойствами ВАХ между любыми двумя выводами:

- механически целый корпус;
- между любыми двумя выводами должен быть в нормально разомкнутом состоянии или отпираться при 400-700мВ.

Из этого следует, что в простейшем случае, проверить биполярный полупроводниковый прибор можно при помощи мультиметра в режиме проверки диодов. В этом режиме мультиметр между щупами прибора выдаёт ток в несколько мА, при напряжении ниже 1-3 В, показывая на дисплее падение напряжения между щупами. Некоторые мультиметры, при падении напряжения соответствующего падению напряжения на типичном кремниевом диоде выдают короткий звуковой сигнал. ВАХ некоторых типов мультиметров в режиме проверки диодов показана на рисунке 2.1. На рисунке видно, что

некоторые приборы в режиме измерения стабилизируют ток через нагрузку, а другие, просто используют токоограничивающий резистор, а fluke 175 может выдавать напряжение достигающее 8 В.

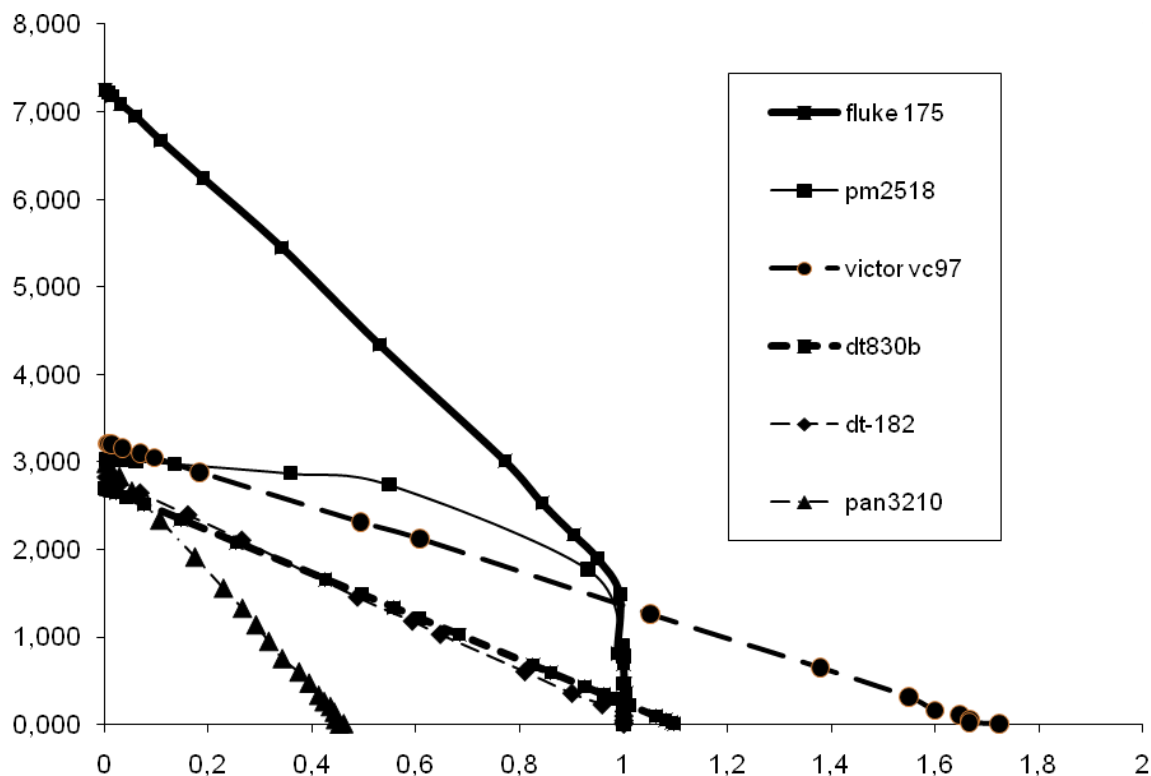


Рисунок 2.1 – ВАХ, в режиме проверки полупроводниковых приборов, мультиметров: fluke 175, philips pm2518, victor vc97, Carlo Gavazzi pan3210, dt-182, dt-830b

Однако, пленочные микросхемы, транзисторы Дарлингтона (составные) и тиристоры обладают сложным внутренним строением. Составной транзистор может обладать низким сопротивлением между базой (базами) и эмиттером, а почти все КУВ между катодом и затвором обладают низким сопротивлением, вызванным катодным шунтом.

Повышенная температура, кроме полного разрушения полупроводникового прибора, может приводить к деградации его характеристик, вызываемые ростом дендритов и перемещением примесей. То есть прибор может нормально работать при низком напряжении и

соответственно нормально проверяться мультиметром. Такие неисправности без выпайки из платы диагностировать, практически, невозможно. Для диагностики таких неисправностей служат характернографы (curve tracer), который покажет всю ВАХ полупроводникового прибора.

Кроме того, таким методом невозможно проверить униполярные приборы, так как ток утечки через МОП структуру или через диод Шотки без выпайки электронного компонента невозможно.

Другим быстро деградирующим типом электронных компонентов являются оксидные конденсаторы и дроссели с магнитопроводом из порошкового железа. В оксидных конденсаторах со временем, под действием электролита, разрушается оксидный изоляционный слой или испаряется электролит, а в дросселях деградирует полимерный изолятор крупинок железа, одновременно являющийся связующим звеном. Для диагностики неисправности таких электронных приборов используют специализированные LCR-метры. Принцип их работы основан на измерении активного и реактивного сопротивления электрическому току на определенных частотах, чаще всего на 1 кГц. Результат показывает в виде индуктивности или емкости с добротностью или тангенсом угла потерь. Эти приборы значительно дороже мультиметров, так как они значительно точнее. Анализ результатов замеров LCR-метром требуют большого опыта, так как исправные конденсаторы на частоте около 1 кГц имеют электрическую емкость в несколько раз меньше номинальной и высокий тангенс угла потерь, в тоже время полностью деградировавший конденсатор на частоте 100 Гц может показать идеальные характеристики. Кроме того, при деградации конденсатора сначала увеличивается тангенс угла потерь, величина которого, как правило, на корпус конденсатора не наносится.

Кроме полупроводниковых приборов, конденсаторов и дросселей на панелях регуляторов используются резисторы. Эти детали панелей электронных блоков проверяются омметрами, входящими в состав

мультиметров. Устройство узла проверки резисторов похоже на устройство узла проверки полупроводников.

Таким образом, для проверки почти для всех простых типов электронных компонентов существуют электроизмерительные приборы, которые путем подачи электрического тока заданной частоты измеряют его сопротивление и на основе этих данных оператор делает вывод о его исправности. Недостатком этого метода диагностики неисправностей является необходимость выпаивать некоторые компоненты, которые зашунтированы параллельно стоящими деталями, неприменимость для полупроводниковых приборов обладающих сложной структурой, сложность оценки состояния деградировавших компонентов и, самое важное, этот способ диагностики не способен протестировать функционирование панели.

2.2 Проверка функционирования всей панели

Методика настройки действующего электропривода и диагностика неисправностей в сломанной системе управления электропривода мало разработана. В учебной литературе, в основном, при описании устойчивости электропривода приводят различные критерии устойчивости (корневой, Гурвица, Михайлова, Найквиста) для использования которых необходимо знать различные параметры объекта управления, которые при наладке неизвестны. Кроме того, невозможно подавать на объект тестирующие воздействия для измерения отклика, так как нет приборов для измерения механических характеристик процесса и очень большая мощность установки. Если даже характеристики объекта управления известны и рассчитаны по формулам диф. уравнения в операторной форме с ЛАФЧХ характеристиками, то настроенные движки, предназначенные для настройки электропривода, не проградуированы. Поэтому эти методики из теории автоматического регулирования бесполезны. С диагностикой неисправностей ситуация похожая.

В настоящее время существует два способа диагностики неисправностей в регуляторах.

1. Оценивание АФЧХ разомкнутого контура.
2. Методика предлагаемая производителем конкретного электропривода.

Первый метод требует очень больших материальных затрат. Например, ООО ПКФ «МАГЕС» предлагает автоматизированную систему диагностики «Тест-Д» за цену выше 15000 тысяч рублей, в цену не входит управляющая ЭВМ. Эта установка производит тестирование плат электропривода за счет анализа реакции на ступенчатое задание.

В большинстве случаев производители электроприводов не предлагают стендов для проверки панелей входящих в электропривод и в руководстве не описывают как его ремонтировать, а если такой стенд выпускают, то он может обладать существенными недостатками. Например, на рисунке 2.2 показана упрощенная схема стенда СПМ-3 (название означает стенд проверки модулей). СПМ-3 предназначен для панелей входящих в состав системы управления электроприводом ПТ-240 и похожих на него seidel str-54k и kuka trm.

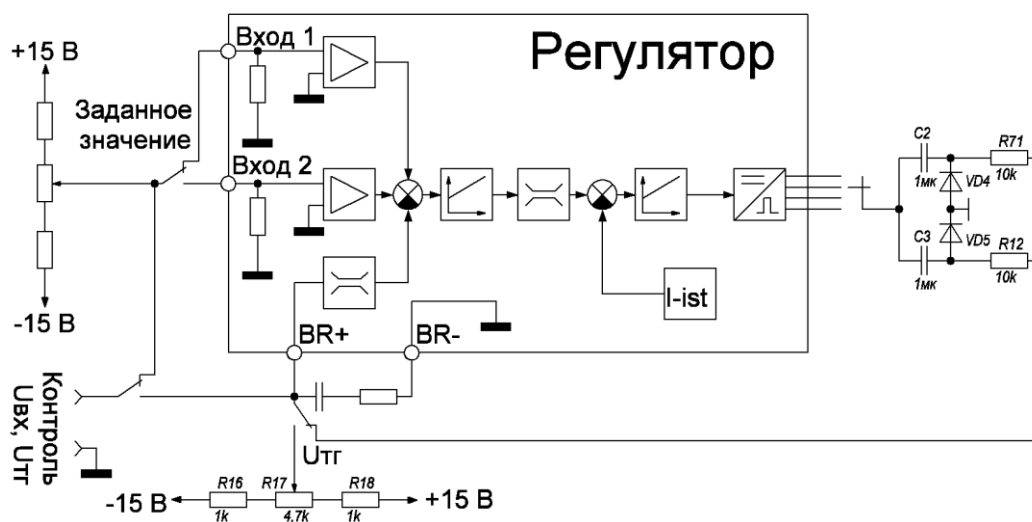


Рисунок 2.2 – Упрощенная схема стенда СПМ-3, производство ВАЗа

На схеме не показаны компоненты относящиеся к подаче питания и проверки защит.

Этот стенд хотя и эмулирует обратную связь по скорости, но она настолько слабая, что исправный регулятор ведет себя почти как компаратор с задержкой. Его реакция на изменение сигнала задания показана на рисунке 2.3.

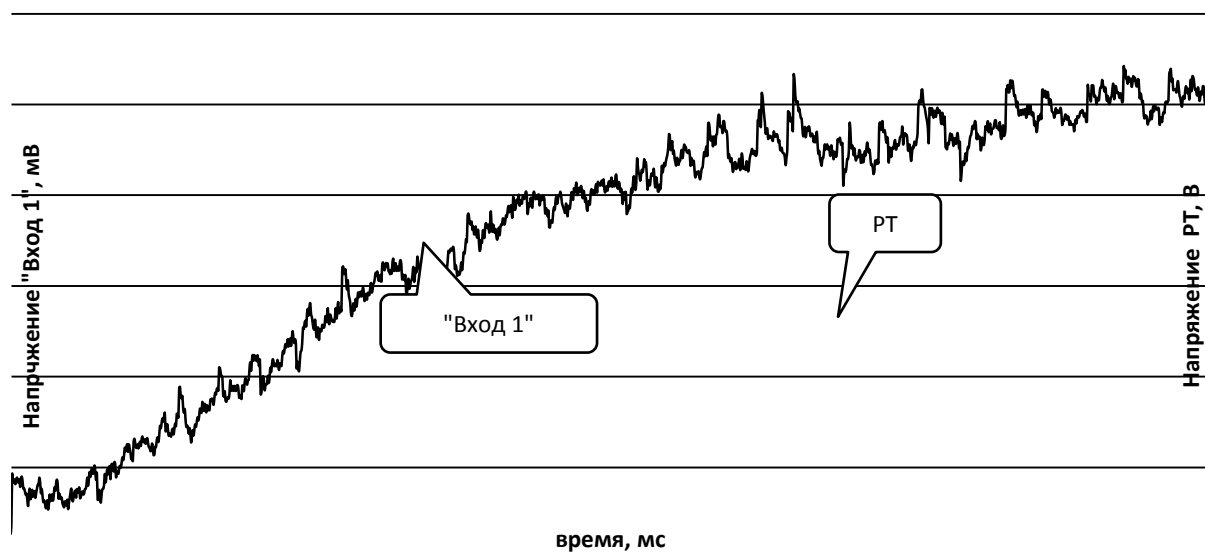


Рисунок 2.3 – Временная диаграмма реакции регулятора на изменение напряжения задания

2.3 Выводы

В настоящее время простой и доступной общей методики диагностики панелей (блоков или плат) от систем управления электроприводом постоянного тока, осуществляющих управление двигателем по алгоритму подчиненного регулирования не существует, а диагностика отдельных электронных компонентов не всегда возможна.

3 Разработка диагностического стенда

3.1 Разработка алгоритма работы стенда

Так как стенд предназначен для тестирования регулятора от электропривода постоянного тока подчиненного регулирования, то значит он должен симулировать отсутствующие узлы в регуляторе. То есть он должен симулировать работу ДПТ, силового преобразователя, преусилителя, ШИМ или СИФУ. Для простоты предположим, что эти узлы системы управления не добавляют инерционности общей системе. Тогда получится, что диагностический стенд должен симулировать только работу ДПТ с установленным на нем тахогенератором. При этом полученная структурная схема не должна содержать в себе обратных связей и колебательных звеньев, так как при изготовлении симулятора могут возникнуть трудно предотвращаемые автоколебания. Но в тоже время он должен давать возможность выводить регулятор в режим автогенерации при неправильной настройке. Так же желательно, что бы все преобразования входных переменных в выходные описывались диф. уравнениями первого порядка.

Структурная схема двигателя постоянного тока показана на рисунке 3.1. Из нее видно, что структурная схема обладает внутренней обратной связью, которая будет мешать при изготовлении стенда.

Дифференциальные уравнения описывающие поведение ДПТ

$$\frac{\omega}{U_{я}} = \frac{k_D}{T_{\theta} T_M p^2 + T_M p + 1}, \quad (3.1)$$

$$\frac{I_{я}}{U_{я}} = \frac{\frac{T_M}{R_{я}} p}{T_{\theta} T_M p^2 + T_M p + 1}, \quad (3.2)$$

и возмущающему воздействию

$$\frac{I_{\text{я}} \omega}{U_{\text{я}}} = \frac{1}{K_{\text{д}} (T_{\text{э}} T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1)}, \quad (3.3)$$

где ω – скорость вращения ротора, $U_{\text{я}}$ – напряжение якоря, $K_{\text{д}}$ – коэффициент передачи двигателя по управляющему воздействию, $T_{\text{э}}$ – электромагнитная постоянная времени, $T_{\text{м}}$ – электромеханическая постоянная времени, $R_{\text{я}}$ – сопротивление якоря, p – оператор дифференцирования.

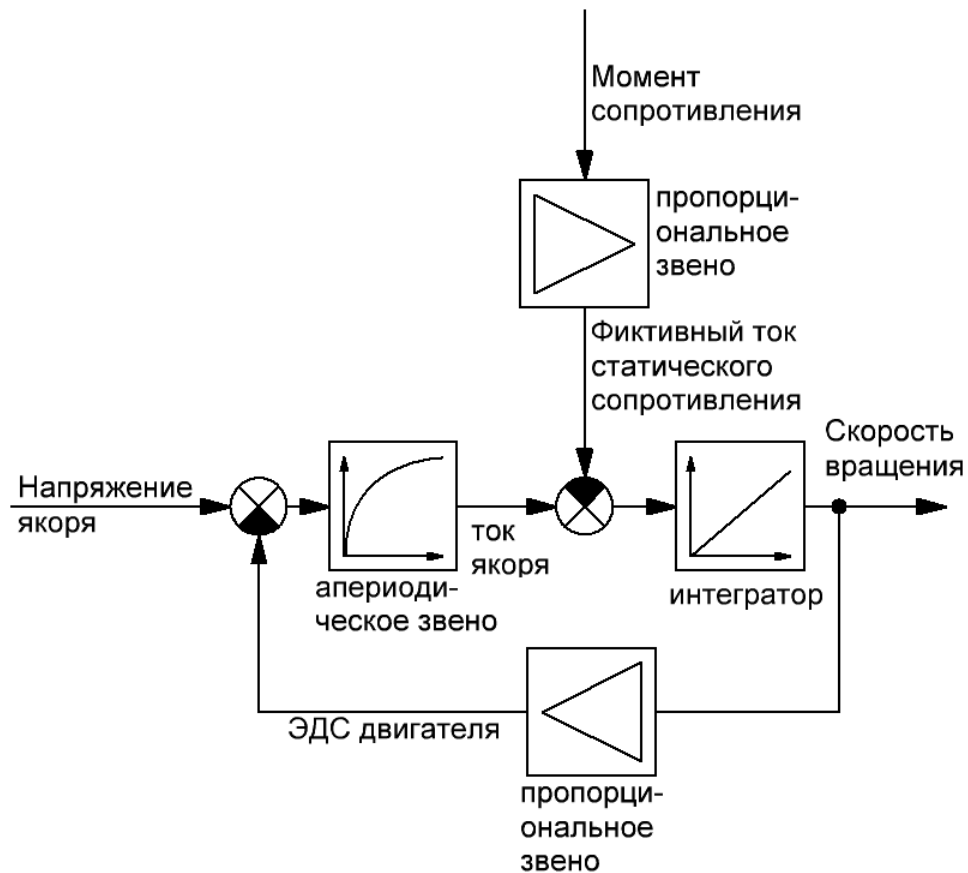


Рисунок 3.1 – Временная диаграмма реакции регулятора на изменение напряжения задания

Упростим эти передаточные функции до звеньев первого порядка, а так же заменим переменные связанные с ДПТ на соответствующие переменные регулятора. То есть заменим напряжение якоря на напряжение РТ (регулятора тока), момент на напряжение датчика тока якоря, скорость вращения на

напряжение тахогенератора. Тогда получатся следующие передаточные функции симулятора ДПТ.

$$\frac{U_{ТГ}(p)}{U_{РТ}(p)} = \frac{k_{ТГ}}{Tp+1}; \quad (3.4)$$

$$\frac{U_{дт}(p)}{U_{РТ}(p)} = \frac{k_1 p}{Tp+1}; \quad (3.5)$$

и по возмущающему воздействию

$$\frac{U_{дт}(p)}{U_c(p)} = \frac{k_2}{Tp+1}, \quad (3.6)$$

где $U_{ТГ}$ – напряжение на входе ТГ; $U_{РТ}$ – напряжение на выходе регулятора скорости; $U_{дт}$ – напряжение на входе датчика тока; U_c – напряжение симулирующее механическую нагрузку; $k_{ТГ}$ – отношение максимального напряжения ТГ к максимальному напряжению РТ, k_1 и k_2 – коэффициенты пропорциональности; T – эквивалентная постоянная времени.

Из формулы (3.5) видно, что в установившемся режиме, если нет возмущающего воздействия, ток через якорь отсутствует. Поэтому при симуляции ДПТ при помощи двух независимых каналов преобразования напряжения РТ в напряжение тахогенератора и напряжение датчика тока будет невозможна проверка функции ограничения тока. Использование для этого возмущающего воздействия по формуле (3.6) невозможно, так как регулятор тока чаще всего является астатическим звеном, а значит он уйдет в насыщение при любом значении постоянного смещения тока. Поэтому надо сделать так, что бы U_c стало пропорциональным $U_{РТ}$. То есть напряжения датчика тока в симуляторе ДПТ должно вычисляться по следующей формуле

$$U_{дт}(p) = \left(\frac{k_1 p}{Tp+1} + \frac{k_2}{Tp+1} \right) \cdot U_{РТ}(p) + U_c(p); \quad (3.7)$$

Подставив в формулу (3.7) выражение (3.4), получим окончательную формулу для вычисления $U_{дт}$.

$$U_{дт}(p) = \frac{k_1 p}{Tp+1} \cdot U_{РТ}(p) + k \cdot U_{ТГ}(p) + U_c(p). \quad (3.8)$$

Функциональная схема стенда с симулятором ДПТ, который реализует преобразование напряжения РТ в напряжение ТГ и датчика тока, показана на рисунке 3.2.

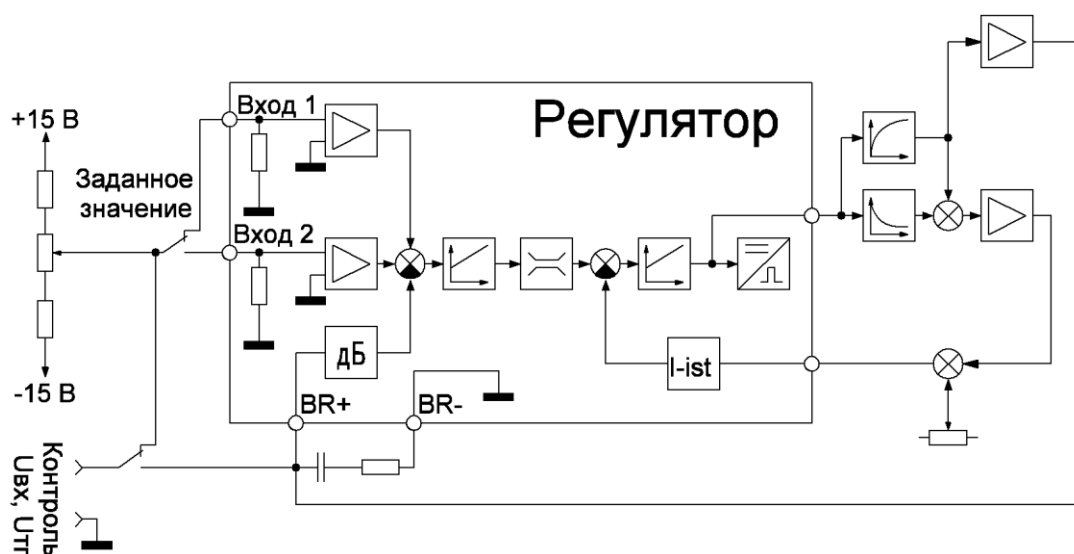


Рисунок 3.2 – Функциональная схема стенда диагностики системы управления с симулятором ДПТ

3.2 Разработка усилителя напряжения

Тахогенератор смонтированный на роторе двигателя постоянного тока выдает постоянное напряжение более 30 В, а типичный операционный усилитель может оперировать напряжениями с амплитудой ниже 10 В. То есть в разрабатываемом симуляторе двигателя постоянного тока должен быть усилитель постоянного тока который будет преобразовывать входной сигнал амплитудой ниже 10В в сигнал амплитудой выше 30 В. Полоса пропускания у него должна быть не ниже 1кГц, так как у систем управления электроприводом постоянного тока с ШИМ преобразователем полоса пропускания контура тока бывает равной 1кГц. Для этих целей «Арех Microtechnology» выпускает микросхемы операционных усилителей высокого напряжения. Самая дешевая из которых, PA81J, на digi-key стоит 135 долларов за штуку. То есть она одна будет стоить дороже всех вместе взятых необходимых для изготовления

стабилитроны и использована микросхема с внутренней коррекцией, тем самым удалось добиться 4 улучшений:

1. Отсутствие привязки к конкретной модели микросхемы операционного усилителя, тем самым облегчив будущую эксплуатацию.
2. Уменьшение количества использованных электронных компонентов.
3. Расширение полосы пропускания на несколько декад (более чем в сто раз), так как у стабилитрона по сравнению с резисторами, использованными Межлумяном в усилителе, в 100 раз меньше дифференциальное сопротивление.
4. Позволяет создавать усилители, рассчитанные на выходное напряжение равное 400В, без ухудшения остальных характеристик.

Схема усилителя показана на рисунке 3.4.

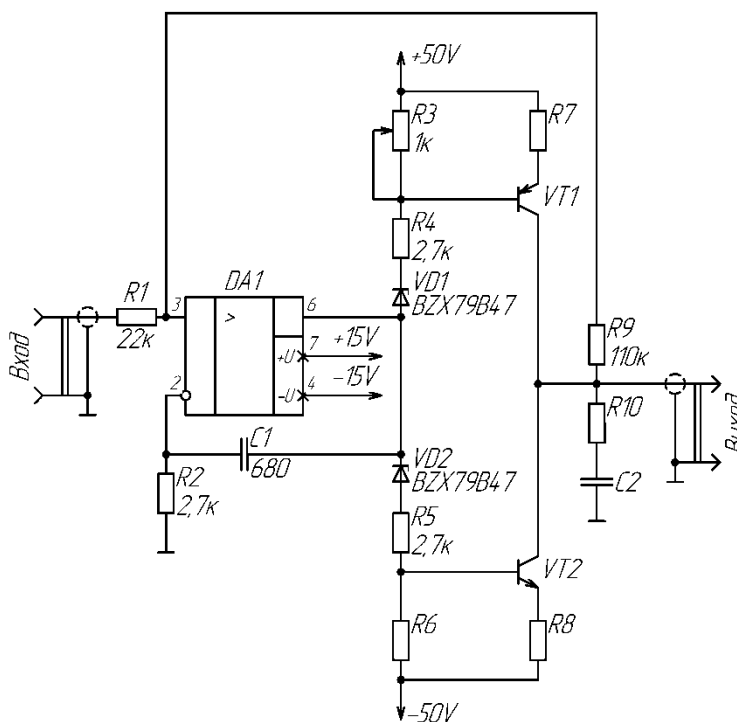


Рисунок 3.4 - Схема усилителя постоянного тока

Использовать в выходном каскаде полевые транзисторы не рекомендуется, так как при их использовании возникают высокие нелинейные искажения. R2 и C1 предотвращают автогенерацию усилителя за счет

уменьшения усиления ОУ по переменному току. R4 и R5 ограничивается ток стабилитронов VD1 и VD2 на допустимом уровне, их сопротивление должно быть больше $\frac{0,9(V_{ee} - V_Z + 15B)I_{ZM}}{P_{tot}}$ или $\frac{(V_{ee} - V_Z + 15B)I_{ZM}}{I_{ZM}}$ где V_{ee} – напряжение питания между общей шиной и эмиттером транзистора, к которому подключен этот резистор, а V_Z , P_{tot} и I_{ZM} – номинальное напряжение стабилизации, максимальная рассеиваемая мощность и максимальный допустимый ток, соответственно. Резисторы R6 и R3 используются для протекания обратного тока коллектора (в справочниках обозначаются как I_{CBO} или I_{KBO}) и установки тока покоя транзисторов VT1 и VT2. Резисторы R7 и R8 ограничивают максимальный ток транзисторов в допустимых пределах и создают местную обратную связь, способствующую температурной стабильности, их значение выбирается больше $\frac{(V_{ee} - V_Z + 15B) \cdot R6 / (R5 + R6) \cdot V_{BE(SAT)} / 2}{I_{МАКС}}$ где V_{ee} напряжение между минусом питания и общей шиной, V_Z напряжение стабилизации VD2, $V_{BE(SAT)}$ напряжение насыщения база-эмиттер, $I_{МАКС}$ максимальный ток коллектора VT2, выбираемый по области безопасной работы и максимальной рассеиваемой мощности. Транзисторы VT1 и VT2 служат для масштабирования слабого сигнала операционного усилителя, они выбираются из расчета $I_{CEO} \geq V_s$, где I_{CEO} предельно допустимое напряжение коллектор-эмиттер при оборванной базе, V_s полное напряжение между плюсом и минусом питания. Диоды Зенера VD1 и VD2 смещают выходной сигнал операционного усилителя на величину, требуемую для управления транзисторами. Их напряжение стабилизации выбирается на один-два номинала меньше (5%-10%), чем напряжение между общим проводом и шиной питания эмиттера соответствующего транзистора. Предельный допустимый ток должен быть больше $I_{ZM} > I_{МАКС} / h_{FE}$. В этом неравенстве используется h_{FE} указанный в паспорте транзистора для больших токов, так как уменьшение тока базы на величину тока через резисторы R6 или R3, компенсирует эффект модуляции

тока базы. R9 и R1 устанавливается требуемый статический коэффициент усиления ($K=R9/R1$). При очень больших напряжения питания, сопротивление R9 может приблизиться к 1 МОм, что не рекомендуется, так как это минимальная допустимая величина сопротивления изоляции во вторичных цепях. В этом случае на выходе усилителя можно использовать делитель напряжения. R10 и C2 служат для улучшения качества переходного процесса.

Для анализа влияния параметров микросхемы операционного усилителя и согласованных пар полупроводниковых триодов, схема была протестирована с двумя моделями микросхем ОУ разного быстродействия (uA741 с $SR=0,5$ В/мкс и tl081 с $SR=8$ В/мкс) и двумя типами комплементарных пар транзисторов (обычные tip31c/tip32c и содержащие схему Дарлингтона bdx53c/bdx54c), при этом ток покоя транзисторов был выбран равным 1мА. Всего получилось 4 схемы, номиналы настраиваемых компонентов которой показаны в таблице 1 [28].

Таблица 3.1 – номиналы настраиваемых компонентов схемы усилителя постоянного тока

Компонент	Схема			
	uA741 TIP3xC	и TL081 TIP3xC	и 741 BDX5xC	и TL081 BDX5xC
DA1	uA741	TL081	uA741	TL081
C2, нФ	47	2,2	4,7	перемычка
R6, Ом	470	470	560	560
R7,R8, Ом	47	47	22	22
R10, кОм	7,5	8,2	8,2	4,6
VT1	TIP32C	TIP32C	BDX54C	BDX54C
VT2	TIP31C	TIP31C	BDX53C	BDX53C

Осциллограммы реакций усилителя с разными типами полупроводниковых компонентов на ступенчатое воздействие при нагрузке 2,2

кОм показаны на рисунке 3.5, а диаграммы Бode на рисунке 3.6. Как показало исследование, на частотные характеристики под нагрузкой большое влияние оказывает тип микросхемы ОУ, а влиянием полупроводниковых триодов можно пренебречь.

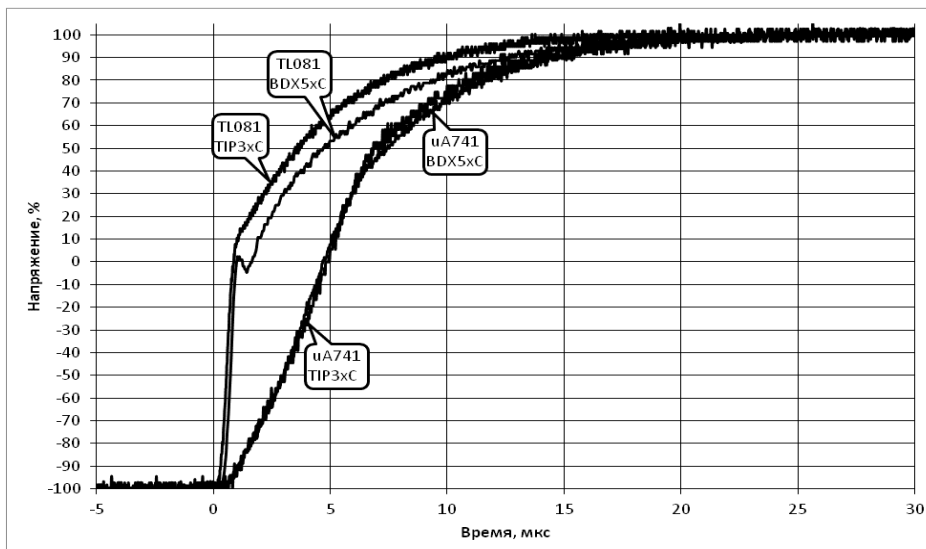


Рисунок 3.5 – Временная диаграмма напряжения на выходе усилителей постоянного тока с разными транзисторами и микросхемами при нагрузке 2,2 кОм

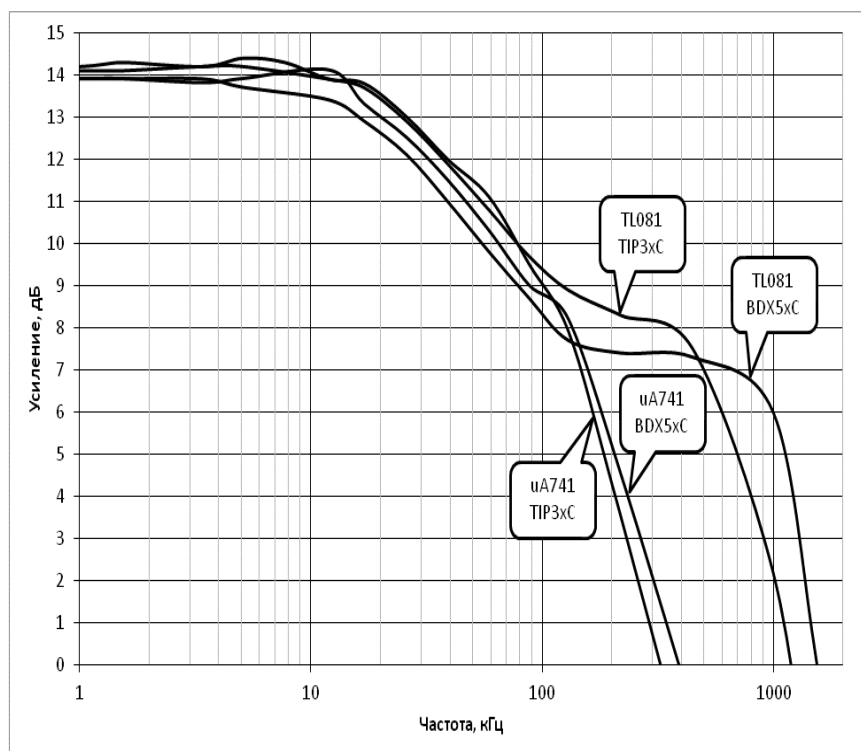


Рисунок 3.6 – Диаграмма Бode усилителей при нагрузке 2,2 кОм

Диаграммы Бode усилителей без нагрузки, для разных уровней входного напряжения на входе, показаны на рисунке 3.7. В метках на графике указано действующее значение напряжения (среднеквадратичное значение) на выходе при частоте напряжения 10 Гц. Из экспериментов выяснилось, что частота единичного усиления обратно пропорциональна входному напряжению и при напряжении ниже 5 В графики практически сливаются. Поэтому настройку демпфирующей цепочки (подбор C2 и R10) надо производить при входном напряжении ниже 5 В.

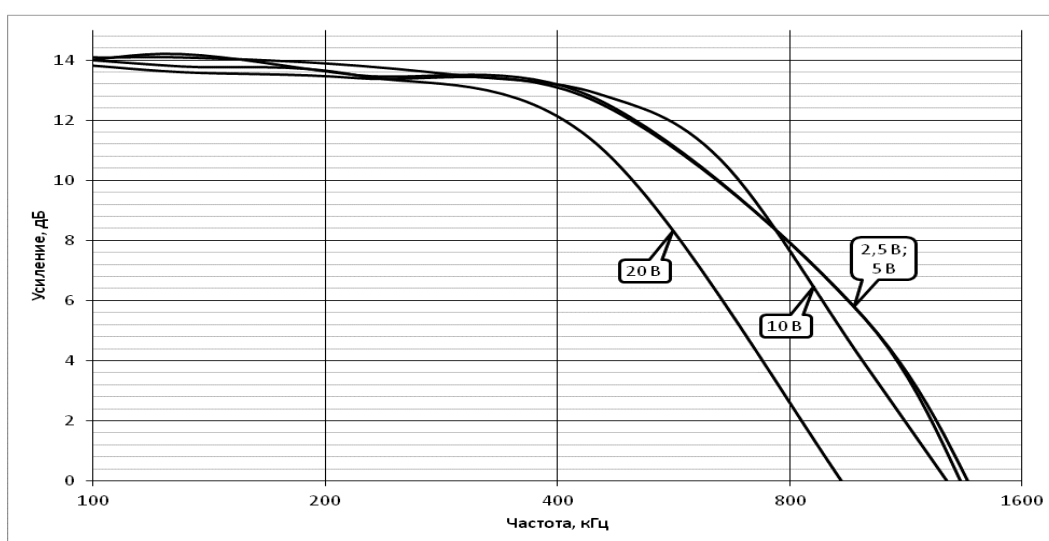


Рисунок 3.7 – Диаграммы Бode при разном уровне напряжения на входе

Диаграммы Бode для разных сопротивлений нагрузки показаны на рисунке 3.8. Из рисунка видно, что полоса пропускания прямо пропорциональна сопротивлению нагрузки.

Диаграммы Бode без нагрузки показаны на рисунке 3.9. Из рисунка видно, что при высоком сопротивлении нагрузки, наибольшая полоса пропускания у усилителя с триодами Дарлингтона и быстродействующим ОУ. При другой модели транзистора Дарлингтона амплитудно-частотные характеристики могут существенно отличаться, так как транзистор Дарлингтона – это микросхема с тремя или четырьмя выводами, которая содержит от 2 до 10 различных элементов.

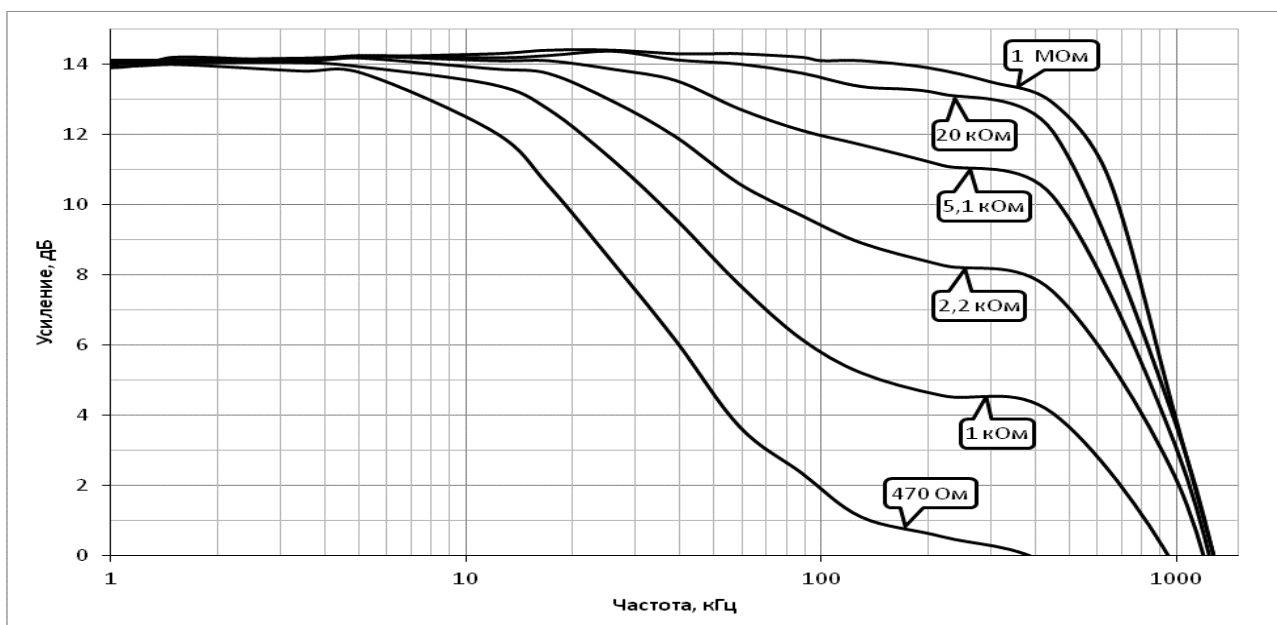


Рисунок 3.8 - Диаграммы Боде усилителя при разных сопротивлениях нагрузки

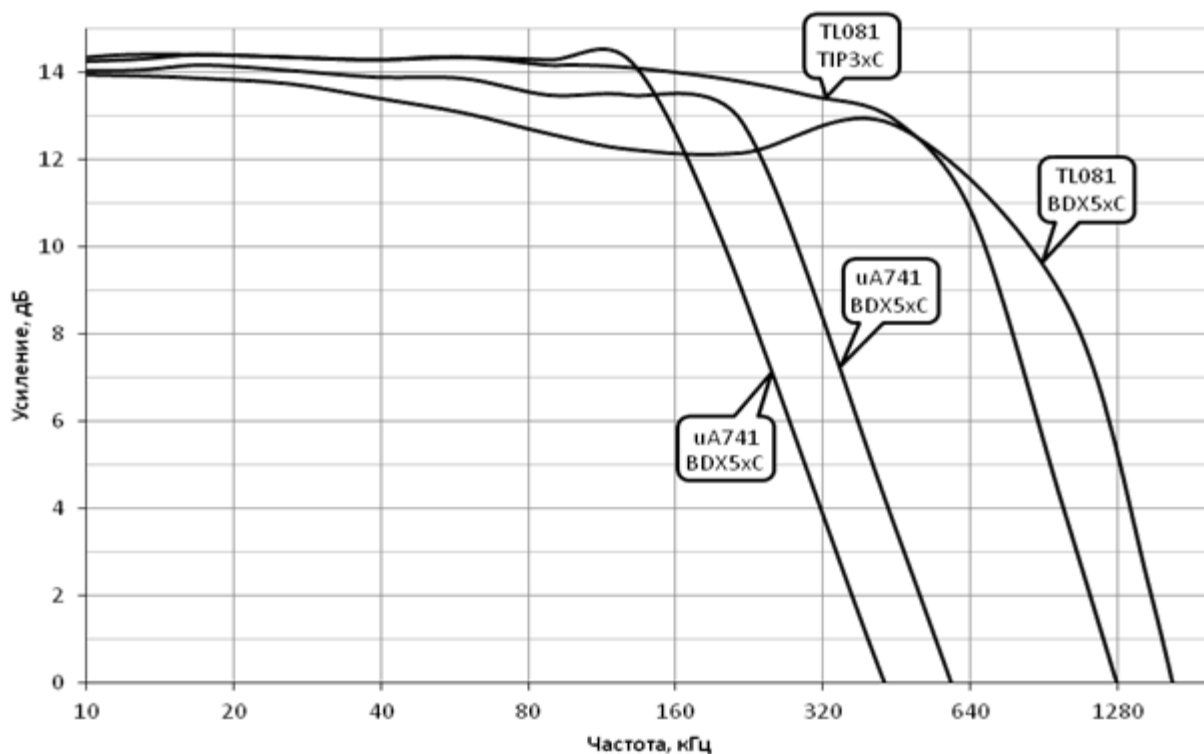


Рисунок 3.9 - Диаграммы Боде усилителя при разных сопротивлениях нагрузки

Таким образом, разработанная схема усилителя постоянного тока показывает лучшие результаты при использовании составных транзисторов и быстродействующего ОУ, хотя для симулятора ДПТ подходит любой выбор активных компонентов.

3.3 Разработка принципиальной схемы

Для тестирования разработанного алгоритма работы симулятора двигателя постоянного тока, была разработана принципиальная схема диагностического стенда для электропривода СТП-5. Функциональная схема электропривода показана на рисунке 3.10.

У этого электропривода принципиальная схема регулятора совпадает со схемой ПТ-240 (смотри рисунки 1.49, 1.51, 1.52, 1.53), но отличаются конструкции ИИП, предусилителя и силового преобразователя: у него силовой преобразователь выполнен на БТИЗ. Упрощенная принципиальная схема стенда показана на рисунке 3.11, на этой схеме не показан фрагмент необходимый для проверки срабатывания защит.

Описание работы стенда. R30 и R31 являются задатчиками скорости вращения. С6 и R29 предотвращают срабатывание защиты по обрыву тахогенератора. R1, R3, R4, DD1, DA1.1 – генератор меандра частотой 8,5 кГц, необходим для функционирования узла контроля обрыва тахогенератора. VD1, VD2, R2, DA1.2 – узел защиты стенда от неисправностей в тестируемом модуле управления. R5, DA1.4, C3, R7 – апериодическое звено преобразующее напряжение на выходе регулятора тока в сигнал тахогенератора. R10, R13, DA2.3, C6, VD3, VD4, R21, R22, R23, R24, R27, C5 – усилитель постоянного тока необходимый для согласования уровней. R6, R7, R8, R14, R15, R20, C2, C4, DA1.3, DA2.4 – узел реализующий выполнение формулы (3.7). R16, R17, DA2.1 – симуляция внешнего тормозного момента. R26, R25, R28, DA2.2 – суммирование двух слагаемых напряжения на датчике тока, один из которых зависит от выхода РТ, а другое не зависит. C7, L1 – Заградительный фильтр на 8,5 кГц, требуется для предотвращения взаимного влияния цепи контроля обрыва тахогенератора и узла согласования уровней ТГ с ОУ.

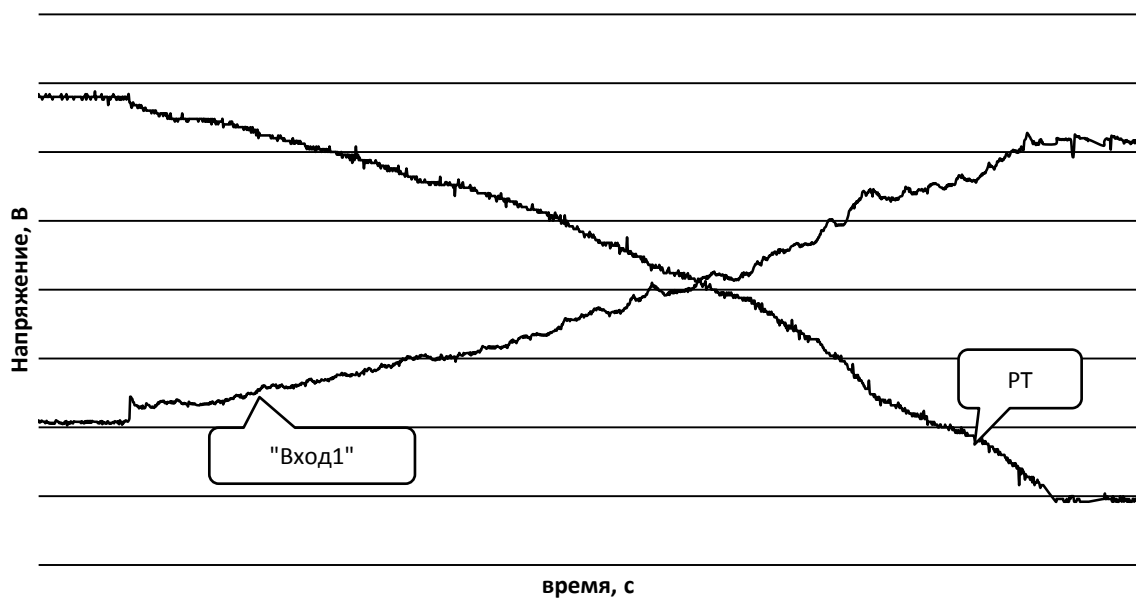


Рисунок 3.12 – Временная диаграмма изменения напряжения РТ и напряжения задания

Заключение

1. Диагностический стенд можно собрать, используя только 3 микросхемы малой степени интеграции, 6 дискретных полупроводниковых приборов, 30 резисторов, один дроссель и 7 конденсаторов, в результате итоговая цена получается на несколько порядков дешевле, чем диагностический стенд «ТЕСТ-Д».

2. Получены упрощенные уравнения двигателя постоянного тока, на основе которых можно создать симулятор ДПТ, пригодный для встраивания в стенд диагностики плат системы управления ДПТ.

3. В усилители постоянного тока повышенного напряжения необязательно использовать 4 высоковольтных транзистора, достаточно двух.

4. МОП-ПТ, в усилителе согласования с входом ТГ, использовать в качестве выходного каскада усиления с общим истоком нельзя.

5. В усилителе постоянного тока, схема которого показана на рисунке 3.4, выходной каскад лучше делать на составных транзисторах, так как в этом случае этот усилитель будет обладать более широкой полосой пропускания при низких нагрузках.

6. Наибольшее влияние на быстродействие усилителя напряжения с дискретными биполярными транзисторами на выходе и микросхемой ОУ на входе оказывает тип микросхемы ОУ, а не тип триодов на выходе.

7. Разработанный усилитель постоянного тока с микросхемой ОУ и двумя триодами на выходе, работает, без заметных линейных искажений, в полосе частот от 0 Гц до 10 кГц.

Список использованных источников

1. Уголовный кодекс Российской Федерации" от 13.06.1996 N 63-ФЗ (ред. от 17.04.2017)
2. Инструкция о порядке учета и хранения драгоценных металлов, драгоценных камней, продукции из них и ведения отчетности при их производстве, использовании и обращении: приказ Минфина России от 09.12.2016 N 231н (Зарегистрировано в Минюсте России 09.01.2017 N 45111).
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: Приказ Министерства энергетики РФ от 13 января 2013 г. N 6 (Зарегистрировано в Минюсте России 22.01.2013 N 4145).
4. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок: Приказ Минтруда России от 24.07.2013 N 328н (ред. от 19.02.2016) (Зарегистрировано в Минюсте России 12.12.2013 N 30593).
5. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения: СанПиН 2.1.4.1074-01 от 26 сентября 2012 года (Зарегистрировано в Минюсте России 31.10.2012 N 3011).
6. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны: ГН 2.2.5.1313-03 от 30 апреля 2013 года (Зарегистрировано в Минюсте России 19.05.2013 N 4568).
7. Abdelhak Benkrid. Operational Amplifier Applications. / Abdelhak Benkrid. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2013.
8. Abdelhak Benkrid. Electronic fundamentals. Basics of Electronic circuits and control engineering. / Abdelhak Benkrid. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2013.
9. Abdullah El-Bayoumi. Design of High-Performance Differential Voltage-to-Time Converters. / Abdullah El-Bayoumi, Hassan Mostafa, Ahmed M.

- Soliman. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2016 – 140 p.
10. Aigboviosa Amaize. Impact of Unbalanced Voltage on Induction Motor. / Aigboviosa Amaize, Stanley Uzairue. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2016 – 76 p.
 11. Anshul Saxena. Investigation Of Low Power Voltage Control Oscillator. / Anshul Saxena, Akansha Shrivastava. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014 – 60 p.
 12. Apurva Patil. Variable Voltage Variable Frequency Power Source Using SPWM. / Apurva Patil. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2016 – 80 p.
 13. Bhavika Chandna. Single-Capacitor Active-Feedback Compensation with Feedforward Stage. / Bhavika Chandna. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2013 – 76 p.
 14. Charles Alexander. Fundamentals of Electric Circuits. / Charles Alexander, Matthew Sadiku. – 6th Edition - New York, N.Y.: McGraw-Hill Education, 2017.
 15. Charles Alexander. Connect 1-Semester Online Access for Fundamentals of Electric Circuits. / Charles Alexander, Matthew Sadiku. – 5th Edition - New York, N.Y.: McGraw-Hill Education, 2013.
 16. Charles Platt. Make: Electronics: Learning Through Discovery. / Charles Platt. . – Second Edition – San Francisco, CA: Maker Media, 2015.
 17. Charles Platt. Encyclopedia of Electronic Components Volume 2: LEDs, LCDs, Audio, Thyristors, Digital Logic, and Amplification. / Charles Platt, Fredrik Jansson. - First Edition – San Francisco, CA: Maker Media, 2015.
 18. Charles Platt. Encyclopedia of Electronic Components Volume 3: Sensors for Location, Presence, Proximity, Orientation, Oscillation, Force, Load, Human Input, Liquid ... Light, Heat, Sound, and Electricity. / Charles Platt, Fredrik Jansson. - First Edition – San Francisco, CA: Maker Media, 2016.

- 19.Ch. V. V. Ramana. Capacitance measurement system using integrated instruments. / Ch. V. V. Ramana, M. Ashok Kumar. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2015 – 304 p.
- 20.Drazen Jurisic. Active-RC Filter. Design Using Impedance Tapering. / Drazen Jurisic. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2013.
- 21.Matthew Scarpino. Motors for Makers: A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines. / Matthew Scarpino. – 1st Edition - USA: Pearson Education, 2016.
- 22.Md. Ruhul Amin. Electrical Power System Analysis. / Md. Ruhul Amin, Rajib Baran Roy. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2013 – 136 p.
- 23.Mehrdad Esmaeilipour. Op-amp configuration and performance analysis. / Mehrdad Esmaeilipour. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2016.
- 24.Michael Geier. How to Diagnose and Fix Everything Electronic. / Michael Jay Geier. – Second Edition – New York, N.Y.: McGraw-Hill Education, 2016.
- 25.Mohamed Abdellatif. Ferrites, Theory and Applications. / Mohamed Abdellatif, Aisha Moustafa. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2016.
- 26.Mohit Chand. DC-Link Capacitor Voltage Balancing for Neutral Point Clamped Inverter. / Mohit Chand. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2016 – 84 p.
- 27.Parry Moon. Foundations of Electrodynamics / Parry Moon Domina Eberle Spencer. – Mineola, New York: Dover Publications, 2013. – 320 p.
- 28.Paul Scherz. Practical Electronics for Inventors. / Paul Scherz, Simon Monk. – Fourth Edition - New York, N.Y.: McGraw-Hill Education, 2016.
- 29.Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook / edited by Muhammad H. Rashid. – 3rd ed. - Burlington,MA: Elsevier Inc, 2011.

30. Rania F. Ahmed. Testing Methods For Fault Detection In Electronic Circuits. / Rania F. Ahmed, Ahmed M. Soliman, Ahmed G. Radwan. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014.
31. Selvakumar Muthu. Electrochemical Capacitor. / Selvakumar Muthu, Sudhakar Yethadka Narahari. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2015 – 100 стр.
32. Sergio Franco. Design With Operational Amplifiers And Analog Integrated Circuits. / Sergio Franco. – 4th Edition - New York, N.Y.: McGraw-Hill Education, 2015.
33. Sergio Franco. Analog Circuit Design: Discrete & Integrated. / Sergio Franco. – 1st Edition - New York, N.Y.: McGraw-Hill Education, 2015.
34. Shweta Chauhan. Hysteretic controlled DC-DC converters. A study of Hysteretic control technique. / Shweta Chauhan. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2015.
35. Souhir Tounsi. Analytical Design and Control of Electric Vehicles Power Chain. / Souhir Tounsi. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014.
36. Stan Gibilisco. Beginner's Guide to Reading Schematics. / Stan Gibilisco. – Third Edition - New York, N.Y.: McGraw-Hill Education, 2014.
37. Stephen Umans. Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery. / Stephen Umans. – 7th Edition - New York, N.Y.: McGraw-Hill Education, 2014.
38. Sushanta Paul. Impact of Voltage Reduction and Optimal Capacitor Placement. / Sushanta Paul. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2016 – 256 p.
39. Teshome Goa Tella. An Optimal Power Loss Reduction by Using Shunt Capacitor / Teshome Goa Tella. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2013 – 148 p.
40. Vikramarajan Jambulingam. Capacitor Based Resonant Converter with Phase Shift Control. / Vikramarajan Jambulingam. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014 – 88 p.

41. Vikramarajan Jambulingam. Design of Boost Converter with Coupled Inductor. / Vikramarajan Jambulingam. - Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014 – 116 p.
42. Wael Fareed. Voltage and Time Dependence of the Potential Induced Degradation(PID). / Wael Fareed. - Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2015 – 120 p.
43. Адаменко, М.В. Радиотехника. Конструкции для всех. Книга 1 / М.В. Адаменко. М.: Солон-Пресс, 2017. - 144 с.
44. Адаменко, М.В. Радиотехника. Конструкции для всех. Книга 2 / М.В. Адаменко. М.: Солон-Пресс, 2017. - 144 с.
45. Алексеенко, А.Г. Применение прецизионных аналоговых микросхем. / А.Г. Алексеенко, Е.А. Коломбет, Г.И. Стародуб 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и Связь, 2014. – 304 с., ил.
46. Алиев, И.И. Электротехника и электрооборудование. В трех частях. Часть 1. Учебное пособие для СПО / И.И. Алиев. – М.: Юрайт, 2017. – 374 с.
47. Беляков, Г.И. Электробезопасность. Учебное пособие для академического бакалавриата. / Г.И. Беляков. – М.: Юрайт, 2017. – 125 с.
48. Бобровников, Л.З. Электроника. Часть 1. Учебник. / Л.З. Бобровников. – М.: Юрайт, 2017. – 288 с.
49. Бобровников, Л.З. Электроника. Часть 2. Учебник. / Л.З. Бобровников. – М.: Юрайт, 2017. – 275 с.
50. Борисенко, А.Л. Схемотехника аналоговых электронных устройств. Функциональные узлы. / А.Л. Борисенко. – М.: Юрайт, 2017. – 126 с.
51. Водовозов, А. Основы электроники. Учебное пособие. / А. Водовозов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2017. – 130 с.
52. Гуревич, В. Устройства электропитания релейной защиты. Проблемы и решения. / Владимир Гуревич. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2013. – 288 с.
53. Данилов, И.А. Общая электроника. Часть 1. / И.А. Данилов. - 2-е издание. - М.: Юрайт, 2017. – 426 с.

54. Жаднов, В.В. Расчет надежности электронных модулей. / В.В. Жаднов. – М.: Юрайт, 2016. – 232 с.
55. Зиновьев, Г.С. Силовая электроника. Часть 1. Учебное пособие для академического бакалавриата. / Г.С. Зиновьев. – М.: Юрайт, 2016. – 390 с.
56. Зиновьев, Г.С. Силовая электроника. Часть 2. Учебное пособие для академического бакалавриата. / Г.С. Зиновьев. – М.: Юрайт, 2016. – 285 с.
57. Захаров, О.Г. Поиск дефектов в релейно-контактных схемах. / О.Г. Захаров. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2017. – 212 с.
58. Калиниченко, А.В. Справочник инженера по КИПиА. / А.В. Калиниченко. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. – 564 с.
59. Карпов, К.А. Основы автоматизации производств нефтегазохимического комплекса. Учебное пособие. / К.А. Карпов. – СПб.: Лань, 2017. – 108 с.
60. Курбатов, П.А. Электрические аппараты. Учебник и практикум. / П.А. Курбатов. – М.: Юрайт, 2017. – 250 с.
61. Лыкин, А.В. Электроэнергетические системы и сети. Учебник для вузов. / А.В. Лыкин. – М.: Юрайт, 2017. – 360 с.
62. Миленина, С.А. Электроника и схемотехника. Учебник и практикум / С.А. Миленина. – М.: Юрайт, 2017. – 208 с.
63. Москатов, Е.А. Электронная техника. Учебное пособие. / Е.А. Москатов. – М.: КноРус, 2017. – 200 с.
64. Нефедов, В.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник для академического бакалавриата. / В.И. Нефедов, А.С. Сигов. – М.: Юрайт, 2017. – 266 с.
65. Осадченко, В.Х. Электротехника: фильтры высоких и низких частот. Учебное пособие. / В.Х. Осадченко, Я.Ю. Волкова, Ю.А. Кандрина. – М.: Юрайт, 2017. – 80 с.
66. Попов, А.К. Элементы теории автоматического управления. Самоучитель по основам теории автоматического управления. / А.К. Попов. – М.: ИПЦ «Маска», 2017. – 328 с.

- 67.Покотило, С.А. Электротехника и электроника. / С.А. Покотило, В.И. Панкратов. – М.: Феникс, 2017. - 283 с.
- 68.Рачков, М.Ю. Технические средства автоматизации. Учебник. / М.Ю. Рачков. – М.: Юрайт, 2017. – 180 с.
- 69.Ревич, Ю. Азбука электроники. Учебник. / Ю. Ревич. – М.: АСТ, 2016. – 224 с.
- 70.Ревич, Ю. Занимательная электроника. / Юрий Ревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 640 с.
- 71.Ситников, А.В. Прикладная электроника. Учебник. / А.В. Ситников, И.А. Ситников. – М.: Курс, 2017. – 272 с.
- 72.Скрыник, А. Стабилизированный регулятор частоты вращения. /А. Скрыник. // Радио. – 1996. - №9. – С. 46.
- 73.Тимофеев, И.А. Основы электротехники, электроники и автоматики. Лабораторный практикум. / И.А. Тимофеев. – СПб.: Лань, 2016. – 196 с.
- 74.Черепашин, А.А. Электротехническое и конструкционное материаловедение. / А.А. Черепашин, Т.И. Балькова, А.А. Смолькин. – М.: Феникс, 2017. – 349 с.
- 75.Штыков, В.В. Введение в радиоэлектронику. Учебник и практикум для СПО. / В.В. Штыков. – М.: Юрайт, 2016. – 271 с.
- 76.Шустов, М.А. Основы силовой электроники. / М.А. Шустов. – СПб.: Наука и Техника, 2017. – 336 с.
- 77.Штерн, М.И. Силовая электроника. Расчеты и схемотехника. / М.И. Штерн. – СПб.: Наука и Техника, 2016. – 398 с.
- 78.Шогенов, А.Х. Основы теории цепей. Учебник и практикум. / А.Х. Шогенов, Д.С. Стребков. – М.: Юрайт, 2017. – 248 с.
- 79.Herbert Sax. HOW TO DRIVE DC MOTORS WITH SMART POWER ICS. [электронный ресурс]: AN380 / Herbert Sax. – STMicroelectronics, 2003. – URL:http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/1f/e0/a4/2a/2b/08/49/43/CD00003758.pdf/files/CD00003758.

- pdf/jcr:content/translations/en.CD00003758.pdf - (Дата обращения: 5.06.2017).
80. Этикетка LTS25-NP [электронный ресурс]. – URL: <http://www.lem.com/docs/products/lts%2025-np.pdf>. – (Дата обращения: 5.06.2017).
81. Этикетка ina216 [электронный ресурс]. – URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina216.pdf>. – (Дата обращения: 5.06.2017).
82. Этикетка lm324 [электронный ресурс]. – URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm124-n.pdf>. – (Дата обращения: 5.06.2017).
83. Этикетка tl084 [электронный ресурс]. – URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl084.pdf>. – (Дата обращения: 5.06.2017).
84. Этикетка ACS709 [электронный ресурс]. – URL: <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS709-Datasheet.ashx?la=en&hash=9533652556F4932E8622A89CE14C8E47D8E95051>. – (Дата обращения: 5.06.2017).
85. Этикетка LA55-P [электронный ресурс]. – URL: http://www.lem.com/docs/products/la_55-p_e.pdf. – (Дата обращения: 5.06.2017).
86. Этикетка kblc [электронный ресурс]. – URL: http://www.kbelectronics.com/data_sheets/kblc_data_sheet.pdf. – (Дата обращения: 5.06.2017).
87. Асташкин, А.В. Усилитель постоянного тока. / Роль инноваций в трансформации современной науки: сборник статей народной научно-практической конференции [5 декабря 2016г., г. Волгоград]. В 4 ч. Ч.2 / - Уфа: АЭТЕРНА, 2016. – С. 12-18.
88. Асташкин, А.В. Пассивный преобразователь интерфейсов EIA – «Токовая петля». / Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы: сборник статей народной научно-практической

конференции [15 ноября 2016г., г. Екатеринбург]. В 6 ч. Ч.3 / - Уфа:
АЭТЕРНА, 2016. – С. 11-15.