

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

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

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

Электромеханика  
(направленность (профиль))

## **БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему «Проектирование блока защиты асинхронных двигателей»

Студент(ка)

С.С. Чистяков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.В. Ермаков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

**Допустить к защите**

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

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Тольятти 2016

## Аннотация

Целью выпускной квалификационной работы является разработка блока защиты асинхронного двигателя. В работе проанализированы варианты возможного конструктивного исполнения блоков защиты асинхронных двигателей. Разработана электрическая принципиальная схема системы защиты асинхронных двигателей на основе современного цифрового процессора. Разработан алгоритм работы блока, разработано программное обеспечение. Произведена отладка программного обеспечения на макетном образце.

Выпускная квалификационная работа представлена пояснительной запиской на 47 листах и приложениями, состоящими из 6 листов формата А1.

## Содержание

Введение	4
1 Анализ предыдущих разработок	7
2 Разработка блока защиты асинхронных двигателей	13
2.1 Разработка системы защиты асинхронных двигателей	14
2.2 Разработка функциональной схемы блока защиты асинхронных двигателей	16
2.3 Выбор элементной базы	22
2.4 Разработка электрических принципиальных схем БЗАД	23
2.5 Алгоритм работы БЗАД	27
2.6 Написание программы работы БЗАД	35
3 Расчет элементов электрических принципиальных схем	39
3.1 Расчет обвязки микросхемы микроконтроллера	39
3.2 Расчет обвязки микросхем драйверов и коммутатора	40
3.3 Расчет искусственного освещения	42
Заключение	45
Список использованных источников	46

## Введение

В настоящее время, основой промышленного электрического привода являются асинхронные двигатели. Развитие различных систем автоматизации производства, связанные с повышением качества, производительности труда, экономической целесообразности, надежности, приводят к тому, что роль автоматизации производства, в частности электропривода промышленных систем, неуклонно возрастает.

Электрическим приводом называется электромеханическая система, состоящая из электрического двигателя (или нескольких электрических двигателей), передаточного механизма и всей аппаратуры для управления электрическим двигателем. Наиболее часто, в современной промышленности используются в качестве электрических двигателей электроприводов асинхронные двигатели переменного тока. Трудно представить себе промышленность без асинхронных двигателей, ведь это самые первые двигатели переменного тока, которые начали производить промышленным способом. Различные мощности, геометрические размеры, частоты вращения, наборы многоскоростных систем, все многообразие исполнений и простота конструкции определили будущее современной промышленности.

Асинхронные двигатели имеют множество преимуществ, однако имеют и недостатки. Одним из недостатков является малый момент при пуске двигателя и высокие пусковые токи, в пять семь раз превышающие номинальные значения. Что требует использования пусковой и пуско-регулирующей аппаратуры, особенно на двигателях с мощностью более десяти кВт. Чаще всего это резисторные и конденсаторные системы пуска. Реже системы понижения питающего напряжения и частотно-регулируемые пусковые системы. Однако, минимальный набор пусковой и пуско-регулирующей аппаратуры асинхронных двигателей привел к широкой их популяризации в промышленности всех стран мира. Также простота

конструкции и легкая возможность ремонта самого двигателя, сказались на частоте использования электрических приводов с асинхронными двигателями.

Сложившаяся экономическая ситуация в мировой промышленности и на рынке электрооборудования требует внимательного отношения к ресурсам и оборудованию, используемому в производстве. Стоимость даже асинхронных двигателей растет с каждым днем, достигая уже 4-5 тысяч рублей за 1 кВт мощности. Также следует отметить, что выход из строя, какого-либо из электрических или электромеханических аппаратов на производстве, приводит к неизбежной остановке самого производства, что приносит уже более существенные убытки предприятиям промышленности. Также наносит ущерб оборачиваемости капитала.

Неизбежным фактором развития современного производства, является защита основных средств, предприятия, для предотвращения простоя бизнеса. Таким образом, коммерческие предприятия, сделали предпосылки для создания средств защиты оборудования от нештатных ситуаций, аварий и простоев. Одним из направлений, позволяющих предотвратить остановку линий и производств, промышленных предприятий, является защита электромеханических устройств и электроприводов.

Фактическое использование электроприводов на основе асинхронных электродвигателей, несмотря на простоту конструкции и простоту управления, привело в ранние годы, к исключению защитных устройств, при работе с данными электрическими приводами и электрическими двигателями. В настоящее время проходят массовые модернизации производственных мощностей, которые позволяют существенно образом продлить использование основных средств, предприятий, в виде асинхронных двигателей, путем установки на них специальных средств защиты.

В настоящее время на рынке присутствует множество специальных электронных и микропроцессорных устройств, используемых для защиты асинхронных двигателей. Но большинство данных изделий настолько не удобны в использовании, или имеют ограничения в условиях монтажа,

диаметру подводимых проводов питания электродвигателей, месту монтажа, плохой информативности, что задача разработки блока защиты асинхронных двигателей становится наиболее актуальной.

Также, наиболее предпочтительной для разработки является система с программным управлением, возможностью записи значений параметров и отображения информации на широком дисплее, позволяющей пользователю без обращения к инструкции на прибор оценить возможные неисправности и незамедлительно приступить к устранению аварийной ситуации. Прибор должен быть приспособлен для монтажа в шкаф управления, например на DIN-рейку, должен иметь независимые датчики, включать в себя системы защиты от всех основных неисправностей, которые могут повлечь выход из строя электродвигателя или стать причиной других неисправностей. Также следует предусматривать минимальное подключение к цепям питания, к трехфазному току и т.д. Система должна использовать все возможные средства удаленного контроля и защиты асинхронных двигателей.

## 1 Анализ предыдущих разработок

В связи с растущим спросом, множество производителей электрооборудования, автоматики и автоматизации промышленных производств, предлагают на рынке множество средств защиты электрооборудования. В частности и средства защиты асинхронных двигателей.

Одним из ярких представителей данных устройств является прибор, выпускаемый предприятием «Сибэлектрозащита» (ООО «СЭЗ», г. Красноярск). Данное предприятие специализируется на выпуске средств защиты электрооборудования, выпускает прибор защиты электродвигателей. Фотография данного прибора представлена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1- Прибор защиты электродвигателей фирмы «Сибэлектрозащита»

Основным недостатком данной системы служит отсутствие индикации на блоке защиты. Для настройки и контроля параметров данного прибора, необходимо производить при помощи переносного персонального компьютера, со специальным переходным электронным блоком, для связи. Это очень неудобно при эксплуатации данного изделия. Память аварийных ситуаций отсутствует. Память предыдущих установок отсутствует. Контроль температуры двигателя присутствует. Контроль перекоса и обрыва фаз присутствует. Контроль утечек тока отсутствует. Также следует отметить и ряд

преимуществ, таких как наличие выносных датчиков тока с достаточно широкими диаметрами внутренних отверстий.

Также, следует отметить неудобство монтажа данного прибора, необходимость использования перфораторов и дрелей, поскольку в приборе нет встроенного крепления на дин-рейку.

Следующим представителем группы производителей электрооборудования для защиты асинхронных электродвигателей является фирма «Новатек-Электро» и его серия приборов «универсальный блок защиты электродвигателей» прибор убз-302. Фотография прибора представлена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2- Универсальный блок защиты электродвигателей убз-302 фирмы «Новатек-Электро»

Основными преимуществами данной системы служит достаточно высокая степень информативности системы, большое количество защит. Наличие семисегментных индикаторов и светодиодов индикации упрощает работу в неосвещенных шкафах управления. Память аварийных ситуаций



отсутствует. Память предыдущих установок отсутствует. Контроль перекоса и обрыва фаз присутствует. Контроль утечек тока присутствует. Контроль температуры двигателя присутствует. Однако установка и настройка параметров защиты программы требует также использование специального персонального компьютера, крайне низкое удобство в монтаже, т.к. трансформаторы тока встроены в сам блок защиты и толстые провода необходимо протягивать через электронный блок. Ограниченный диаметр отверстий также плохо сказывается на монтаже и применимости системы. Требуется подключение к трем фазам для контроля напряжения питания асинхронного двигателя. Что усложняет монтаж изделия.

Следующим представителем блоков защиты является изделие бз-031м-блок защиты асинхронных электродвигателей (вариант для эл. щитов, эл. шкафов; диапазон 0-200а и 100-900а) изготовленный фирмой ООО ПКФ «Электротрейд». На рисунке 1.3 представлена фотография блока защиты асинхронного двигателя.



Рисунок 1.3- Блок защиты асинхронного двигателя бз-031м производства фирмы ООО ПКФ «Электротрейд»

Основными преимуществами данной системы служит достаточно высокая степень информативности системы, большое количество защит. Наличие однострочного буквенно-цифрового дисплея индикации упрощает работу в неосвещенных шкафах управления. Память аварийных ситуаций отсутствует. Память предыдущих установок присутствует. Контроль перекоса и обрыва фаз присутствует. Контроль утечек тока отсутствует. Контроль температуры двигателя присутствует. Также, очевидным плюсом данного изделия является возможность ручного ввода параметров и их значений для работы программы защиты. Наличие выносных трансформаторов тока, тоже является плюсом. Требуется подключение к трем фазам для контроля напряжения питания асинхронного двигателя, что усложняет монтаж прибора. Отсутствуют встроенные крепления на дин-рейку. Что усложняет монтаж изделия.

Следующим представителем блоков защиты асинхронных двигателей является блок защиты марки бз-041 - микропроцессорный блок защиты асинхронных электродвигателей, произведенный компанией ОАО Опытный завод Электрооборудования. Фотография блока защиты асинхронных двигателей представлена на рисунке 1.4. Основными преимуществами данной системы служит выносные датчики тока. Также, очевидным плюсом данного изделия является возможность ручного ввода параметров и их значений для работы программы защиты. Присутствует встроенное крепление на дин-рейку. Что упрощает монтаж системы. Память аварийных ситуаций отсутствует. Память предыдущих установок отсутствует. Контроль температуры двигателя присутствует. Требуется подключение к трем фазам для контроля напряжения питания асинхронного двигателя, что усложняет монтаж прибора. Система имеет крайне низкую степень информативности. Не позволяет работать в плохо освещенных шкафах управления. Имеет крайне низкую степень точности установленных параметром защиты.



Рисунок 1.4- Блок защиты асинхронных двигателей БЗ-041 компании ОАО  
Опытный завод Электрооборудования

Таким образом, проведя анализ предыдущих разработок, можно сформулировать основные требования к блоку защиты асинхронных двигателей:

- наличие хорошей индикации с подсветкой и управлением, наличие возможности крепления на дин-рейку;
- отдельные трансформаторы (датчики тока) по фазам, с большими проходными диаметрами;
- память аварийных (нештатных) ситуаций;
- память предыдущих установок параметров защиты;
- отсутствие необходимости подключения трех фаз;
- контроль перекоса фаз и обрыва фазы;
- контроль токов утечки.

Для проведения разработки блока защиты асинхронных двигателей необходимо выполнить несколько этапов проектно-конструкторской деятельности, а именно:

- разработать концепцию защиты асинхронных двигателей, определить датчики, устройства управления, концепцию блока управления;
- разработать функциональную схему блока защиты асинхронных двигателей;
- разработать электрические принципиальные схемы блока защиты асинхронных двигателей;
- разработать алгоритмы работы системы защиты асинхронных двигателей;
- провести выбор элементной базы;
- рассчитать элементы электрических принципиальных схем;
- выполнить макетное моделирование электрических принципиальных схем, с разработкой печатных плат;
- разработать программное обеспечение программного комплекса блока защиты асинхронных двигателей;
- провести отладку программного обеспечения путем программно-аппаратного комплекса.

## 2 Разработка блока защиты асинхронных двигателей

### 2.1 Разработка системы защиты асинхронных двигателей

Разработка блока защиты асинхронных двигателей сводится к нескольким основным этапам. Концепция защиты асинхронного двигателя хорошо поясняется схемой, представленной на рисунке 2.1.

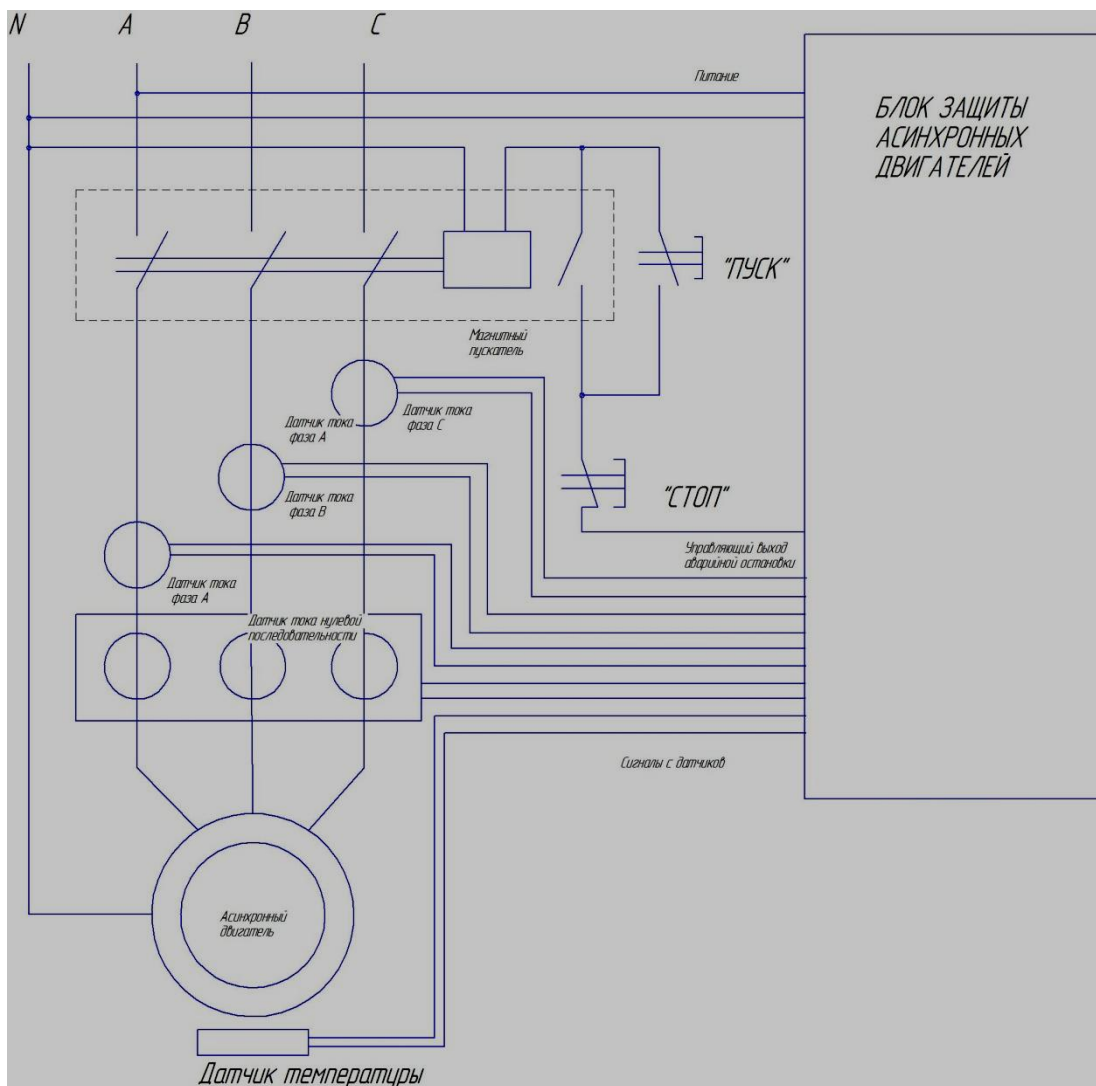


Рисунок 2.1- Схема блока защиты асинхронных двигателей

Работа блока защиты заключается в следующем: проводить анализ токов, по фазам, соответствие фаз, соответствие температуры двигателя, соответствие времени пуска двигателя, защита от токов утечки и повреждения изоляции,

соответствие частоты питающего переменного тока, защиты от неправильного включения фаз.

Анализ работы асинхронного двигателя блок защиты проводит в реальном времени, в непрерывном режиме.

Таким образом, мы определились, что для работы системы требуется три датчика тока(трансформатора тока) по одному на каждую фазу, требуется датчик тока нулевой последовательности, позволяющий оценивать значение токов утечки и проводить защитное отключение. Все выше перечисленные датчики имеют двухпроводную систему. Датчик температуры двигателя, причем по практике установки щитов управления, а значит и блоков защиты электродвигателей, блок защиты может находиться в пределах расстояния до 1000 метров от самого двигателя, поэтому выходной сигнал с датчика температуры необходимо иметь в виде частоты импульсов. В качестве датчика температуры необходимо использовать двухпроводный термочувствительный кварцевый резонатор, позволяющий работать с двухпроводным сигналом. В качестве управляющего сигнала должна выступать релейная схема управления электромагнитным пускателем.

Питание на блок защиты асинхронных двигателей заводится с фазы А и с подключением к нейтрали.

С учетом требований к блоку защиты асинхронных двигателей:

- контроль фазных токов, установка превышения рабочего тока и контроль тока короткого замыкания;
- наличие хорошей индикации с подсветкой и управлением, наличие возможности крепления на дин-рейку в шкафу управления;
- отдельные трансформаторы (датчики тока) по фазам, с большими проходными диаметрами;
- память аварийных (нештатных) ситуаций;
- память предыдущих установок параметров защиты;
- отсутствие необходимости подключения трех фаз;
- контроль перекоса фаз и обрыва фазы;

- контроль токов утечки.

Можно сформулировать основное содержание блока защиты асинхронных двигателей. Блок должен содержать аппарат для программной установки различных значений фазных токов в широком диапазоне. Должен содержать микропроцессорную систему, с индикацией состояния и установкой регулируемых и защищаемых параметров. Должен иметь энергонезависимую память, должен иметь систему схемной обвязки, формирователи сигналов датчиков и усилители сигналов управляющих воздействий. Также следует отметить, что вновь создаваемая система при своей работе не должна вносить изменений в электрические сети, такие как высокочастотные помехи и т.д.

## 2.2 Разработка функциональной схемы блока защиты асинхронных двигателей

Любая система, учитывающая множество параметров с разных типов датчиков и производящая различные алгебраические и логические операции опирается на цифровую электронику. Для минимизации схемных решений и упрощения жесткой логики используем систему на основе однокристальной микро ЭВМ (ОмЭВМ). Используя программный код, сузим использование элементов электрических принципиальных схем.

Разработанная функциональная схема системы защиты асинхронных двигателей представлена на рисунке 2.2.

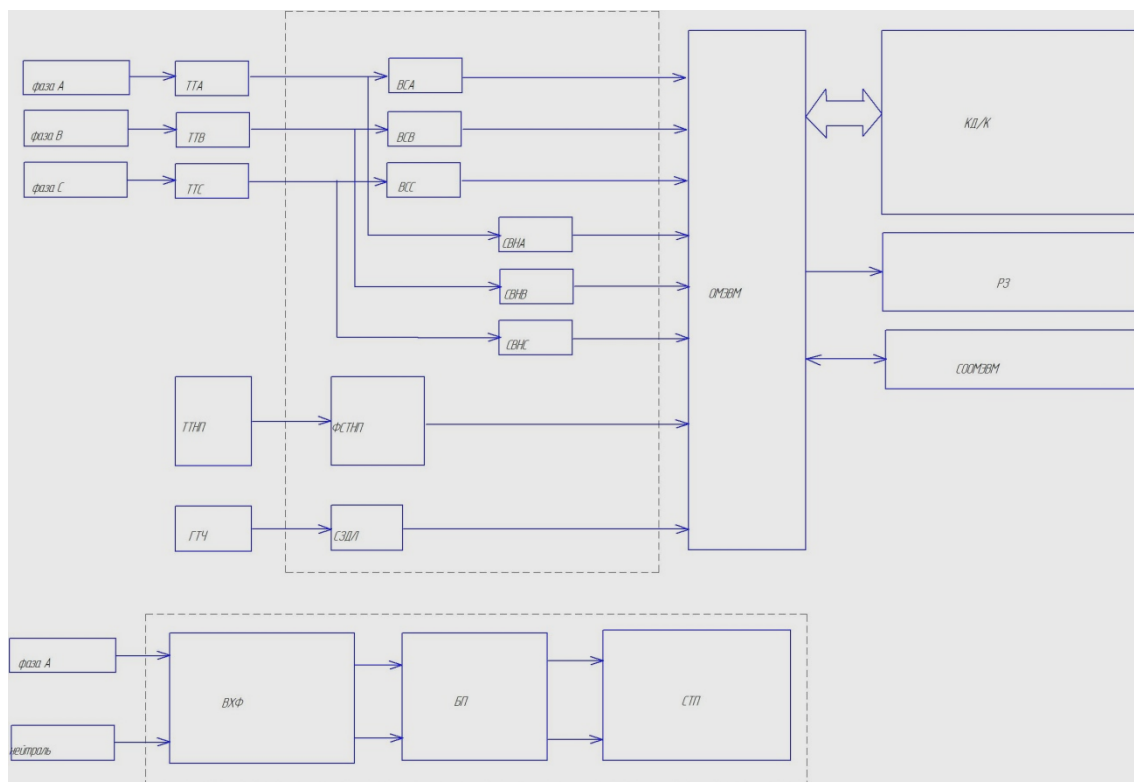


Рисунок 2.2- Система защиты асинхронных двигателей, схема функциональная

Функциональная схема блока защиты асинхронных двигателей представлена на рис.1 и состоит из:

- ТТА- трансформатор тока фазы А – предназначен для бесконтактного преобразования тока протекающего по фазе А к двигателю, в измерительный ток;
- ТТВ- трансформатор тока фазы В – предназначен для бесконтактного преобразования тока протекающего по фазе В к двигателю, в измерительный ток;
- ТТС- трансформатор тока фазы С – предназначен для бесконтактного преобразования тока протекающего по фазе С к двигателю, в измерительный ток;
- ВСА- выпрямитель сигнала с фазы А – предназначен для выпрямления электрического сигнала, поступающего с фильтра низких частот фазы А,



- для анализа амплитудных значений силы тока прямой и обратной полуволны;
- ВСВ- выпрямитель сигнала с фазы В – предназначен для выпрямления электрического сигнала, поступающего с фильтра низких частот фазы В, для анализа амплитудных значений силы тока прямой и обратной полуволны;
  - ВСС- выпрямитель сигнала с фазы С – предназначен для выпрямления электрического сигнала, поступающего с фильтра низких частот фазы С, для анализа амплитудных значений силы тока прямой и обратной полуволны;
  - СВНА- схема выделения нуля фазы А – предназначена для определения перехода через ноль тока фазы А, для определения правильности фазировки питающего кабеля и двигателя и для измерения частоты тока в фазе А;
  - СВНВ- схема выделения нуля фазы В – предназначена для определения перехода через ноль тока фазы В, для определения правильности фазировки питающего кабеля и двигателя и для измерения частоты тока в фазе В;
  - СВНС- схема выделения нуля фазы С – предназначена для определения перехода через ноль тока фазы С, для определения правильности фазировки питающего кабеля и двигателя и для измерения частоты тока в фазе С;
  - ОМЭВМ- однокристалльная микро-ЭВМ – предназначена для анализа, обработки информации и выдачи управляющих воздействий на аппараты и выдачи информации на индикатор;
  - ТТНП- трансформатор тока нулевой последовательности – предназначен для измерения токов утечки, сопротивления изоляции, тока короткого замыкания фазного провода в трехфазном кабеле, и представляет собой датчик устройства защитного отключения;

- ФСТНП- формирователь сигнала тока нулевой последовательности – предназначен для формирования сигнала с трансформатора токов нулевой последовательности и преобразования его в сигнал напряжения приемлемого для дальнейшей обработки вида;
- ГЧТ- генератор температура-частота – предназначен для измерения температуры корпуса асинхронного двигателя, посредством изменения частоты генерации импульсного сигнала;
- СЗДЛ- схема защиты длинных линий – предназначена для защиты информации с датчика температуры от искажений и электромагнитных наводок на соединительный кабель, для защиты микропроцессорной части блока защиты асинхронного двигателя;
- КД/К- контроллер дисплея/клавиатуры – предназначен для ввода информации в ОМЭВМ пользователем и вывода информации на дисплей, содержит в себе схемы защиты от дребезга контактов и т.д.;
- РЗ- реле защиты – предназначено для разрыва цепи пуска асинхронного двигателя и его аварийной остановки, либо предотвращения пуска двигателя при неправильной фазировке, наличии токов нулевой последовательности и прочих аварийных режимов;
- СООМЭВМ- схема обвязки ОМЭВМ – предназначена для подачи на ОМЭВМ сигналов тактовой частоты, сброса, сброса по включению напряжения питания, внутрисхемной отладки и т.д.;
- ВХФ- входной фильтр питания – предназначен для защиты питающей сети от высокочастотных наводок блока питания и наоборот;
- БП- блок питания – предназначен для выпрямления питающего напряжения, его высокочастотного преобразования в напряжение питания электронного блока защиты асинхронного двигателя;
- СТП- стабилизатор питания – предназначен для стабилизации напряжения питания электронного блока асинхронного двигателя и защиты от короткого замыкания.

Блок защиты асинхронного двигателя работает следующим образом, перед пуском двигателя осуществляется программирование значений параметров защиты, путем задания времени пуска двигателя, токов пуска, рабочих токов двигателя, защиты по току, частоты тока питающей сети, сопротивления изоляции, порогового значения температуры двигателя. Программирование осуществляется посредством контроллера клавиатуры и дисплея при помощи 4-х клавиш. Две клавиши предназначены для выбора параметра программирования, а две других для задания значения программируемого параметра.

После программирования ОМЭВМ возможно осуществление пуска двигателя. Реле защиты двигателя при поданном напряжении питания находится в замкнутом состоянии, при снятии напряжения питания с блока защиты асинхронного двигателя, контакты реле переходят в нормальное разомкнутое состояние, таким образом, при аварийном отключении питания, с блока защиты, блок предотвращает незащищенный пуск двигателя.

В момент пуска двигателя блок защиты анализирует правильность подключения питания двигателя, посредством анализа последовательности перехода импульсов сигнала тока через нуль, по фазам двигателя, поступающих с трансформаторов тока. В случае неправильного подключения питания двигателя по фазам, блок защиты производит защитное отключение двигателя с выдачей на дисплей информации об ошибке и ее записью в память.

Одновременно с проверкой фазировки питания двигателя, блок защиты проверяет сопротивление изоляции и наличие токов утечки в трехфазном кабеле питания двигателя. В этот момент осуществляется анализ токов нулевой последовательности. В случае их наличия выше пороговых пределов осуществляется защитное отключение двигателя, с выдачей на дисплей информации об ошибке и ее записью в память, причем процесс анализа токов нулевой последовательности продолжается и по завершению процесса пуска, при нормальной работе двигателя.

В случае отсутствия ошибок пуск двигателя продолжается и включается таймер времени пуска двигателя, при обнулении таймера пуска двигателя включается система анализа действующего тока двигателя. Поскольку пусковые токи двигателя значительно превышают рабочие, то если к моменту обнуления таймера пуска двигатель не вышел на рабочий режим, и присутствует превышение действующего значения силы тока двигателя выше значения тока отключения, то блок защиты прекратит пуск двигателя с выдачей на дисплей информации об ошибке и ее записью в память.

В случае аварийного прекращения пуска двигателя, блок защиты предотвращает повторный пуск двигателя на время, определенное пользователем и необходимое для устранения неисправности.

В случае выхода двигателя на нормальный режим работы, блок защиты последовательно производит анализ информации о действующем значении тока двигателя, по трем фазам одновременно, наличии и значении токов нулевой последовательности и температуры двигателя, поочередно выдавая действующую информацию на дисплей в режиме реального времени с усреднением, за последние 5 секунд.

В случае превышения действующего значения тока двигателя за время, задаваемое пользователем от 0,1 до 5 секунд, блок защиты производит остановку двигателя с выдачей на дисплей информации об ошибке и ее записью в память.

В случае превышения температуры двигателя над пороговым значением, блок защиты производит остановку двигателя с выдачей на дисплей информации об ошибке и ее записью в память.

В случае аварийной остановки двигателя, блок защиты предотвращает повторный пуск двигателя на время, определенное пользователем и необходимое для устранения неисправности.

В процессе работы, блок защиты асинхронного двигателя осуществляет опрос клавиатуры и при необходимости производит задержку необходимой информации на дисплее.

## 2.3 Выбор элементной базы

Для современного периода развития промышленной электроники характерны следующие тенденции:

- замена электрических узлов на дискретных элементах электронными.;
- применение электронных устройств в качестве средств диагностики и сбора информации;
- постоянная модернизация всех систем.

Возможность создания практически любого алгоритма управления с помощью микроконтроллера (МК) повлекла за собой изменение конструкций самих агрегатов. Поэтому современные промышленные системы необходимо рассматривать как комплекс электронной аппаратуры и управляемых исполнительных устройств.

Однако внешние условия, воздействующие на промышленное оборудование, сильно отличает электронику, разрабатываемую для использования в промышленности, от своих аналогов, используемых в быту.

Требования к электрооборудованию четко определены ГОСТ Р 53734.5.2-2009, ГОСТ Р 53768-2010, ГОСТ Р 53769-2010, ГОСТ Р 8.675-2009, и ГОСТ Р 50571.18-2000. Согласно им устанавливаются диапазоны воздействий внешней среды на изделия, при которых функционирование изделий должно соответствовать ТУ. Опираясь на выше перечисленные государственные стандарты, следует проектировать электрооборудование, сохраняющее работоспособность в диапазоне температур от - 55 до + 85 °С.

В соответствии с требованиями, выбираем в качестве элементной базы блока защиты асинхронных двигателей комплектующие следующих производителей электронных компонентов: Internationalrecifier, Panasonic, Siemens Matsushita components, ONSemiconductor (ON). Основным достоинством данных компонентов являются точность и стабильность характеристик при малых габаритах. В качестве однокристалльной микро ЭВМ осуществляем выбор между основными производителями контроллеров.

Одним из основных требований к микроконтроллерам является не высокая стоимость, высокие потребительские свойства, наличие высокого развитого программного комплекса, наличие встроенных таймеров и аналого-цифрового преобразователя, развитой инфраструктуры хранения и передачи данных.

Выбираем микроконтроллер фирмы MICROCHIP PIC 18F452, который имеет следующую структуру:

- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- система таймеров;

Система таймеров используется для генерирования управляющих импульсов и для измерения временных интервалов.

- оперативно запоминающее устройство (ОЗУ) – 4 кБ;
- энергонезависимую память типа флэш – 16 кБ.

Микроконтроллер имеет частоту шины 5 МГц, тактовую частоту 20 МГц и производительность 2.5 миллионов операций в секунду, погрешность измерения временных интервалов 200 нс.

Выходы MODA и MODB определяют режим работы с внешней памятью.

Выходы A0...A15 – шина адреса, D0...D7 шина данных.

Выходы AN0...AN7 – входы АЦП, из которых используются только AN0 и AN1. Для защиты входов АЦП последовательно включены резисторы R60 и R61 номиналом 10 кОм в соответствии с документацией на микроконтроллер.

Для увеличения нагрузочной способности выводов микроконтроллера и подачи управляющих сигналов на исполнительные механизмы, используется микросхема ULN2003.

#### 2.4 Разработка электрических принципиальных схем БЗАД

Блок защиты асинхронных двигателей представляет собой сложное техническое устройство, содержание в себе как микропроцессорную систему,

слаботочную и низковольтную. Так и силовые блоки с высоковольтными преобразователями.

Разработку электрических схем производим на основе разработанных ранее функциональных схем.

Электрическая принципиальная схема выпрямления сигнала тока фазы А представлена на рис. 2.3.

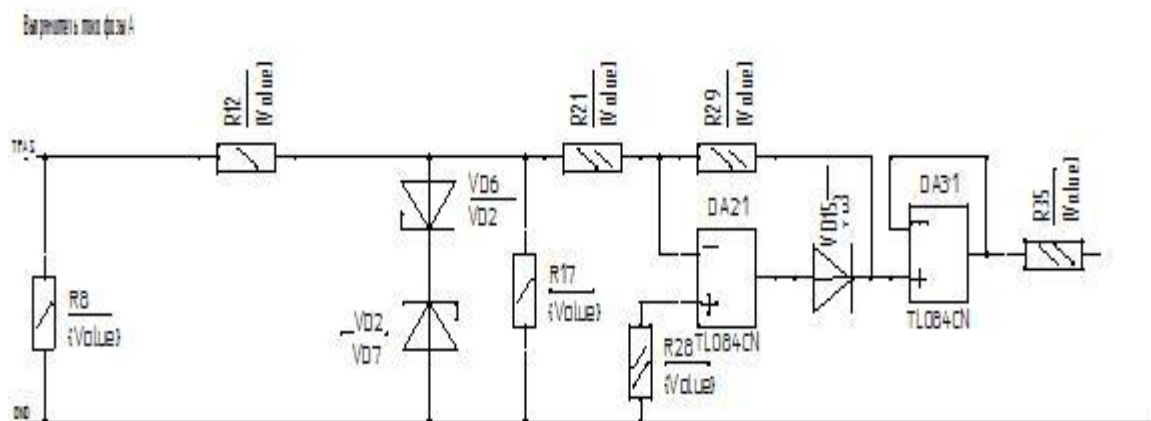


Рисунок 2.3- Схема выпрямления сигнала с фазы А

В схеме использован выпрямитель, построенный на операционном усилителе. После получения сигнала осуществляется повторение сигнала через повторитель. Выпрямление происходит на диоде VD15. Для предотвращения снижения сигнала на рп переходе диода, обратная связь подключена по выходу диода.

Схема выделения перехода фаз через ноль представлена на рисунке 2.4.

В схеме перехода фаз через ноль учитываются точные переходы токового сигнала через ноль. Схема построена на основе операционных усилителей.

Схема блока питания и блока защитного реле представлена на рисунке 2.5.

Схема блока питания строится на основе импульсного преобразователя с понижением напряжения с 220В переменного тока до 5 В постоянного тока. Подключение начинается с дросселя и конденсаторной схемы гашения

импульсных помех, далее следует диодный мост и высоковольтный конденсатор.

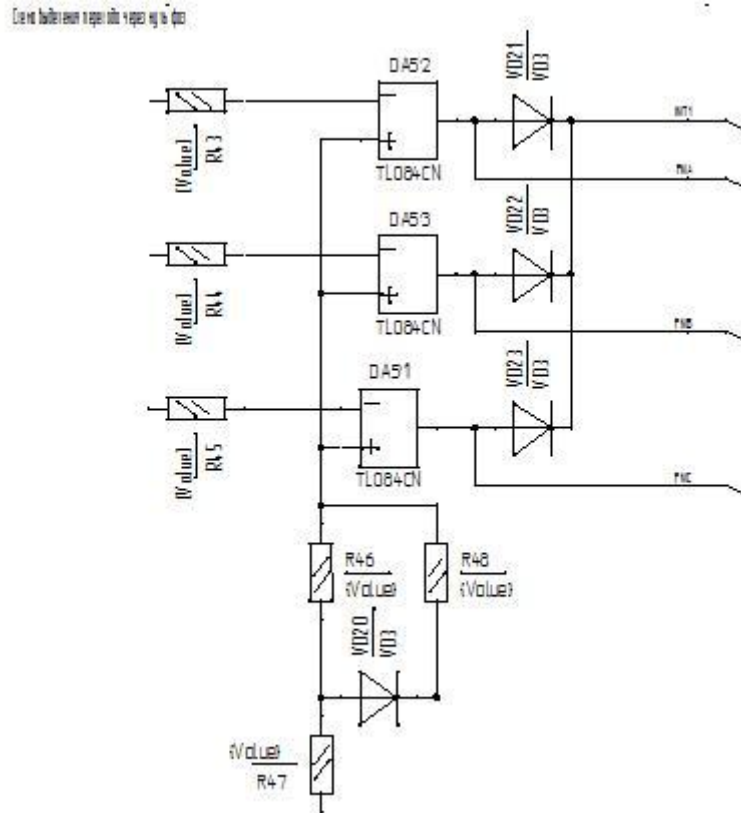


Рисунок 2.4- Схема выделения перехода сигнала через ноль фаз

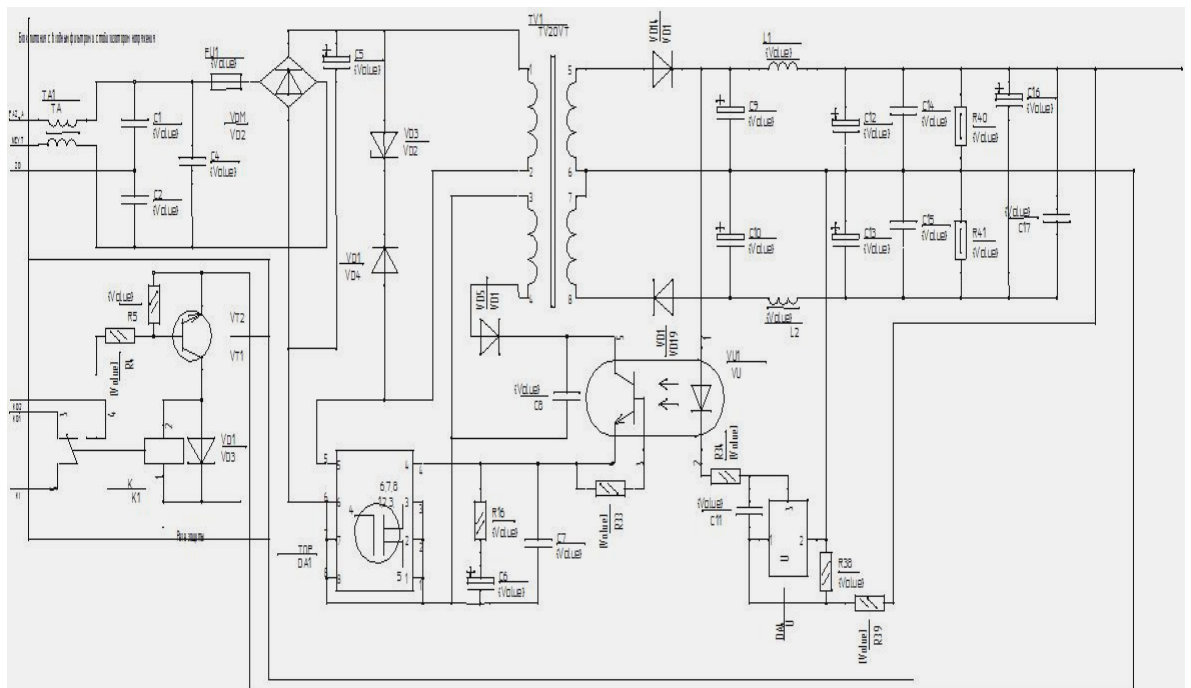


Рисунок 2.5- Блок питания БЗД и блока реле защиты





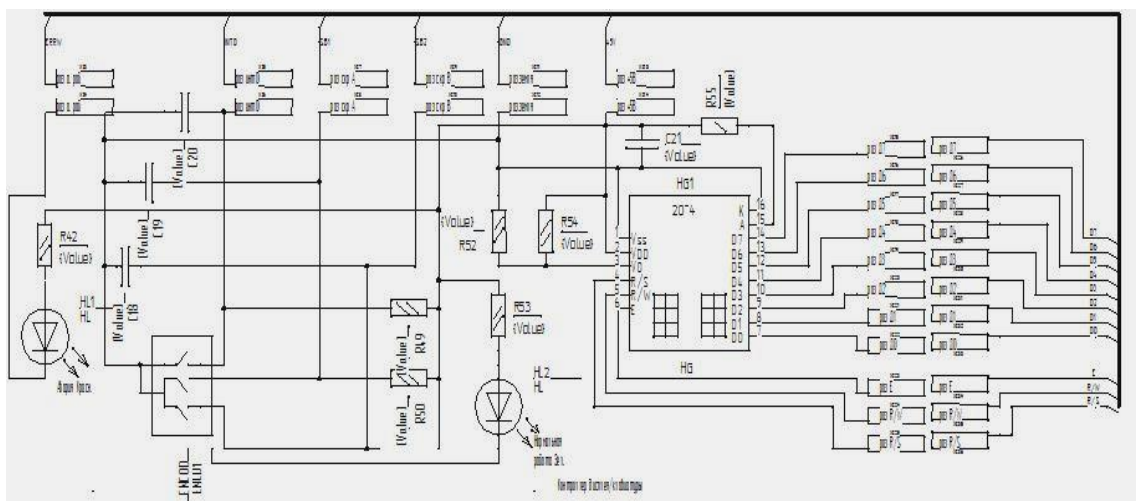


Рисунок 2.7- Блок индикации и управления БЗАД

Схема блока индикации включает в себя четырех строчный индикатор, по двадцать символов в каждой строке. Также схема включает в себя частотный энкодер косинусной последовательности и два светодиодных индикатора зеленого и красного цвета. Энкодер выдает последовательность соответствующего сигнала с переходом через ноль, для определения направления вращения энкодера, а выбор элемента фиксируется через кнопку.

## 2.5 Алгоритм работы БЗАД

Для разработки алгоритма работы используются технические возможности однокристалльной микроЭВМ. Наличие энергонезависимой памяти и большой объем оперативной памяти, набор команд и встроенных подпрограмм позволяет

На рис.2.8 представлен алгоритм опроса энкодера системы управления контроллером блока защиты асинхронных двигателей.

Алгоритм основан на работе задающего последовательность переключателя. В зависимости от направления вращения энкодера на двух выходах меняется состояние с логического нуля на логическую единицу.

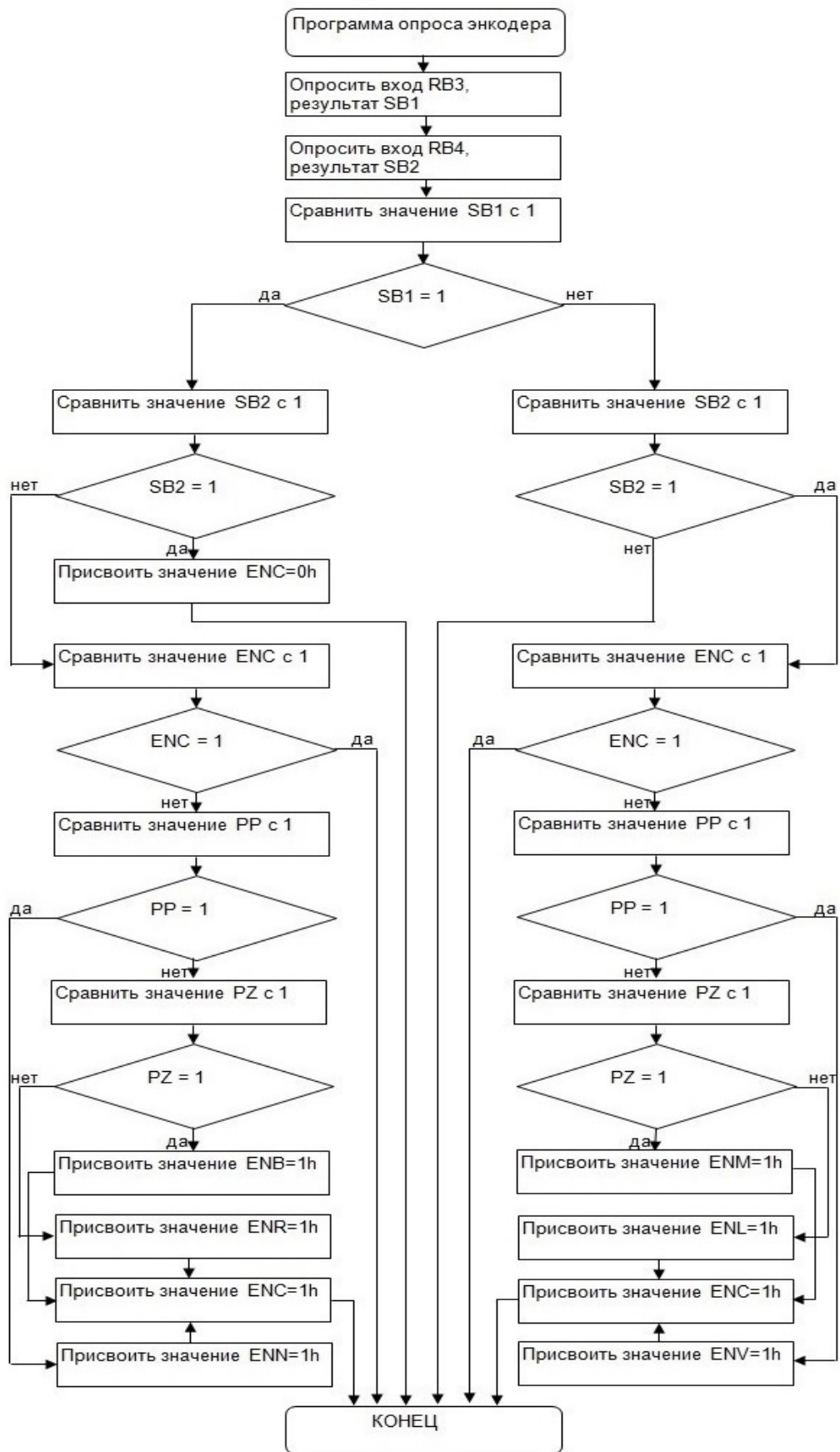


Рисунок 2.8- Алгоритм программы опроса энкодера блока защиты асинхронных двигателей.

Алгоритм программы запуска двигателя представлен на рис. 2.9.

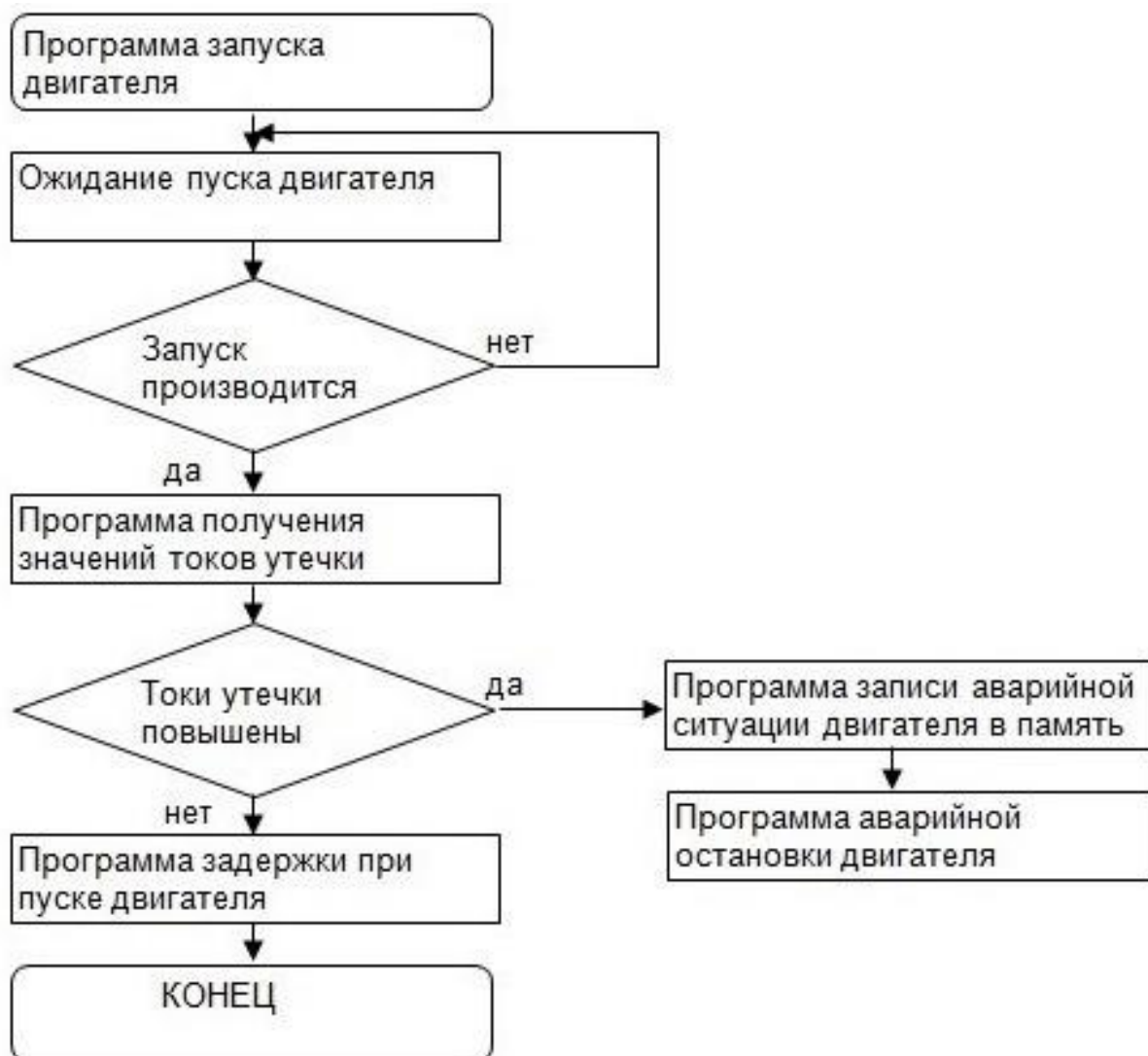


Рисунок 2.9- Алгоритм программы запуска двигателя БЗАД

Таким образом, опрашивая два входа однокристальной ЭВМ система может понять последовательность вращения энкодера, а именно вращения и его направления, а также возможность выбора определенного пункта меню в системе отображении на четырех строчном индикаторе блока защиты асинхронных двигателей.

Алгоритм работы блока защиты асинхронного двигателя в момент пуска двигателя обусловлен заданием на разработку блока защиты асинхронных двигателей. Для работы данной программы производится анализ программируемых данных, которые включают в себя время запуска двигателя,

а также анализ состояния по токам утечки. В качестве программируемого параметра используется время пуска, а также значение параметров пусковых токов, сигнализирующих о том, производится ли пуск двигателя, проходит ли запуск двигателя успешно, или пусковые токи повышены, время пуска двигателя завышено.

Алгоритм программы инициализации жидкокристаллического индикатора представлен на рис. 2.10.

Алгоритм программы представлен производителем жидкокристаллического индикатора. В зависимости от требуемого режима работы, скорости и частоты отображения информации, в зависимости от параметров начальной работы индикатора, осуществляется двунаправленная связь с жидкокристаллическим индикатором.

Первыми данным отправляется состояние работы индикатора. Управляющее слово 30H отправляется трижды на индикатор, причем отправка осуществляется с некоторой задержкой. Задержка по времени между первой отправкой управляющего слова и второй отправкой этого же управляющего слова составляет 5 мс. Запускается программа задержки на 5 мс. После второй отправки управляющего слова запускается программа задержки, но со временем 0,1 мс. После второй отправки управляющего слова в третий раз отправляется управляющее слово.

Трижды прописав управляющее слово 30H, запускается программы чтения управляющего слова из жидкокристаллического индикатора. После чего производится анализ полученного управляющего слова из жидкокристаллического индикатора, если значение управляющего слова положительное, то программа инициализации продолжается далее, если управляющее слово отрицательное, то осуществляется повторный опрос управляющего слова из жидкокристаллического индикатора, до тех пор, пока слово не станет положительным.

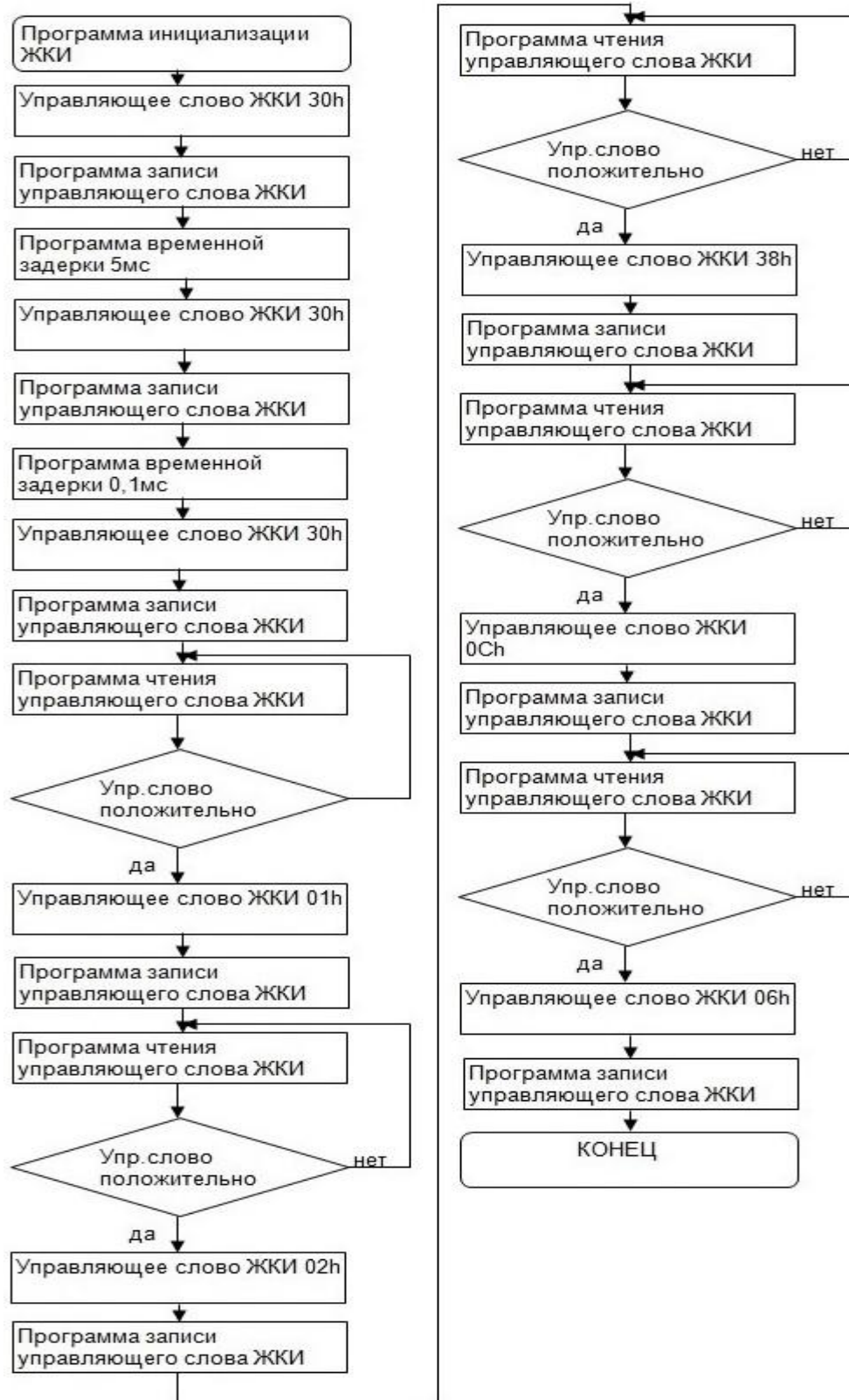


Рисунок 2.10- Алгоритм программы инициализации жидкокристаллического индикатора БЗАД

Далее следует запись управляющих слов на жидкокристаллический индикатор с программой анализа состояния управляющих слов, однако используются программы ожидания положительного ответа от индикатора, а программы временных задержек не используются. Следующими управляющими словами для жидкокристаллического индикатора являются 01Н, 02Н, 38Н, 0СН, 06Н.



Рисунок 2.11- Алгоритм получения действующего значения тока фазы

Алгоритм программы, получения действующего значения тока фазы представлен на рис. 2.11.

В основе алгоритма заложен принцип анализа тока в каждой фазе за каждую полуволну. В каждой полуволне оценивается 256 значений силы тока. Для этого осуществляется возведение значений в квадрат, после чего значения суммируются, делятся на количество значений и из полученных данных извлекается квадратный корень.

Программа начинает свою работу с момента перехода сигнала тока фазы через ноль. После этого производится анализ данных с аналого цифрового преобразователя. После возведения значения в квадрат все значения размещаются в памяти блока, для того чтобы оценивать последовательность значений, их рост и падение за 256 периодов, пользуемся принципом FIFO, при получении каждого последующего значения силы тока, оно добавляется к анализу, а самое первое удаляется из памяти.

На рис.2.12 представлен алгоритм извлечения квадратного корня из четырех байтного числа с высокой точностью воспроизведения результата, высокоскоростную и высокоточную.

Для данного алгоритма используется принцип высокоскоростных аналогоцифровых преобразователей с поразрядным уравниванием.

Для получения результата происходит подстановка значения соответствующего разряда числа со значением единица, со старшего разряда до младшего. После подстановки единицы в разряд числа происходит возведение в квадрат полученного числа и происходит сравнение. Если число больше, то единица в искомом результате остается, если число меньше, то в текущий разряд записывается ноль, программ опускается на разряд ниже.

Таким образом, для получения результата необходимо возвести двухбайтное число в квадрат 16 раз и сравнить его с исследуемым числом.



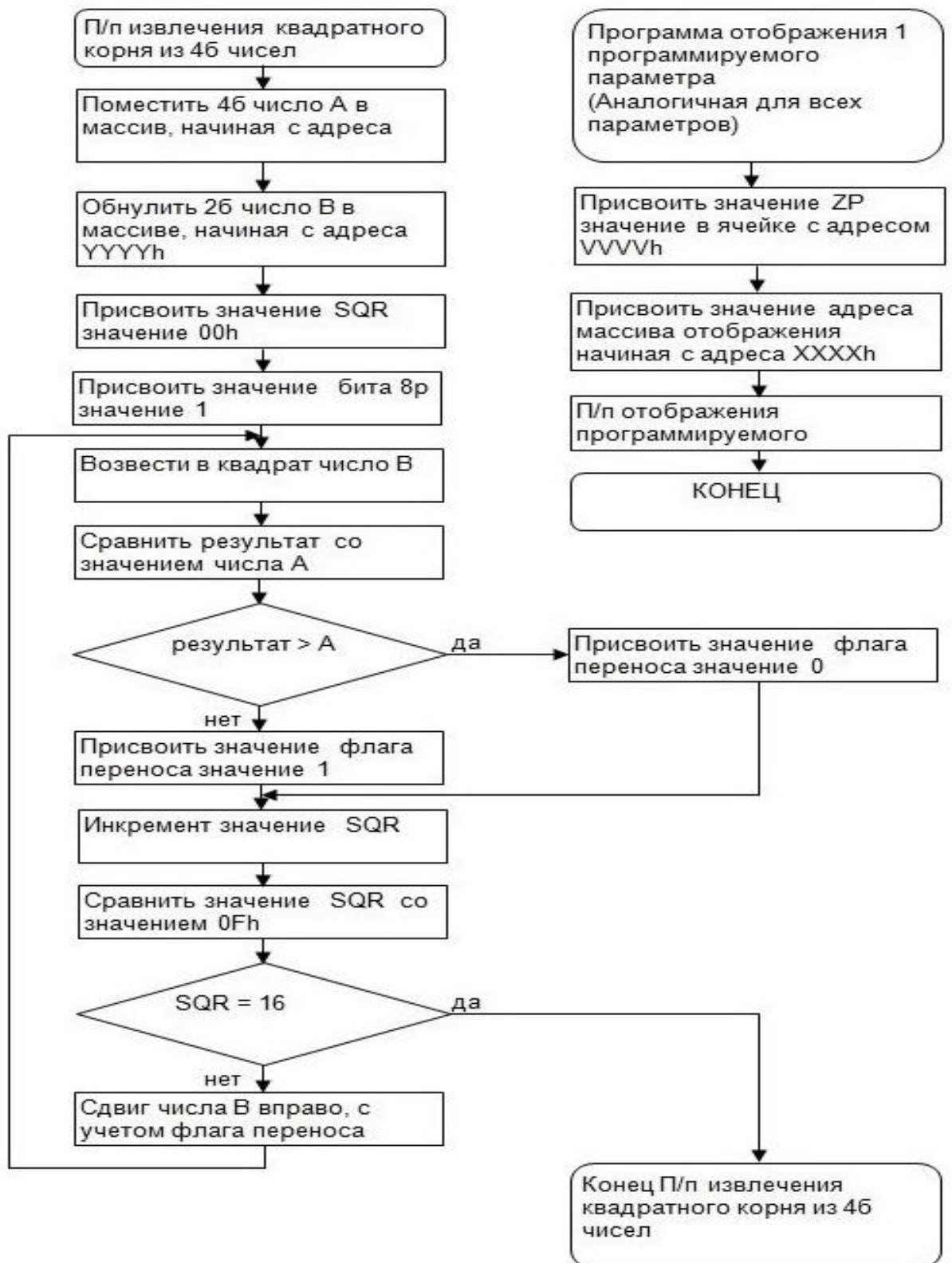


Рисунок 2.12- Алгоритм программы извлечения квадратного корня из четырехбайтного числа

Точность программы извлечения квадратного корня ограничивается последним битом полученного значения.

Данная программа является уникальной и ранее нигде не используемой.

## 2.6 Написание программы работы БЗД

Написание программы работы блока защиты асинхронного двигателя осуществляется на языке машинного программирования – ассемблере. Для PIC контроллеров язык программирования соответствует основным языкам программирования микроконтроллеров.

Основное отличие ассемблеров в синтаксисе программ. Основные команды соответствуют во всех языках программирования, однако синтаксис их написания различен.

Процедура написания полностью соответствует алгоритму, разработанному ранее. При написании и отладке программного обеспечения используются соответствующие редакторы ассемблера. После написания программы работы осуществляется перевод программы в машинный код – ассемблирование.

При написании программ на ассемблере после каждой строчки кода рекомендуется ставить комментарии, для того, чтобы программисты могли в любой момент понять, какие действия осуществляются, в какой последовательности и какие действия выполняются. В качестве примера ассемблирования можно привести программу извлечения квадратного корня, для блока защиты асинхронного двигателя.

```
0000033F    01229 SQR    EQU H'033F'; РЕГИСТР ПОРАЗРЯДНОГО
УРАВНОВЕШИВАНИЯ КВАДРАТНЫЙ КОРЕНЬ
```

```
00000340    01230 TSV_1  EQU H'0340';
```

```
00000341    01231 TSV_2  EQU H'0341';
```

```
00000342    01232 ZP01_1 EQU H'0342';
```

```
00000343    01233 ZP01_2 EQU H'0343';
```

00000344	01234 ZP02_1	EQU H'0344';
00000345	01235 ZP02_2	EQU H'0345';
00000346	01236 ZP03_1	EQU H'0346';
00000347	01237 ZP03_2	EQU H'0347';
00000348	01239 A1	EQU H'0348';
00000349	01240 A2	EQU H'0349';
0000034A	01241 A3	EQU H'034A';
0000034B	01242 A4	EQU H'034B';
0000034C	01244 B1	EQU H'034C'; РЕЗУЛЬТАТ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КВ.КОРНЯ МЛ.
0000034D	01245 B2	EQU H'034D'; РЕЗУЛЬТАТ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КВ.КОРНЯ СТ.
0000034E	01248 X1	EQU H'034E'; ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
0000034F	01249 X2	EQU H'034F'; ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
00000350	01250 X3	EQU H'0350'; ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
00000351	01251 X4	EQU H'0351'; ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
00000352	01252 X5	EQU H'0352'; ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
00000353	01253 X6	EQU H'0353'; ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
00000354	01254 X7	EQU H'0354'; ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
00000355	01255 X8	EQU H'0355'; ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
00000356	01257 Y1	EQU H'0356'; ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ

00000357	01258 Y2	EQU H'0357'; ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
00000358	01259 Y3	EQU H'0358'; ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
00000359	01260 Y4	EQU H'0359'; ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
0000035A	01262 Z1	EQU H'035A'; РЕЗУЛЬТАТ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
0000035B	01263 Z2	EQU H'035B'; РЕЗУЛЬТАТ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
0000035C	01264 Z3	EQU H'035C'; РЕЗУЛЬТАТ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
0000035D	01265 Z4	EQU H'035D'; РЕЗУЛЬТАТ ВОЗВЕДЕНИЯ В КВАДРАТ
0000035E	01267 S1	EQU H'035E';
0000035F	01268 S2	EQU H'035F';
00000360	01269 S3	EQU H'0360';
00000361	01270 S4	EQU H'0361';
00000362	01272 M1	EQU H'0362';
00000363	01273 M2	EQU H'0363';
00000364	01274 M3	EQU H'0364';
00000365	01275 M4	EQU H'0365';

Для программирования используется специальная программа, предоставленная производителем микроконтроллеров, называемая MPASM. Общий вид страницы ассемблирования программы для микроконтроллеров представлен на рис.2.13



Рисунок 2.13- Внешний вид программы ассемблирования для контроллеров фирмы MICROCHIP

Отладку программного обеспечения осуществляют на уже смонтированной печатной плате, или в эмуляторе программного обеспечения. Процедура написания программного обеспечения и ее отладки может занимать значительное время, зачастую даже большее, нежели разработка электрических принципиальных схем, а также сборки технического устройства.

Для процедуры отладки микроконтроллера часто используют сервисные платы, с фиксацией выходов по портам микроконтроллера.

После отработки программного обеспечения на сервисной плате осуществляется отладка программного обеспечения на макетном образце.

На рис. 2.14 представлена процедура отладки программного обеспечения на макетном образце блока защиты асинхронных двигателей.

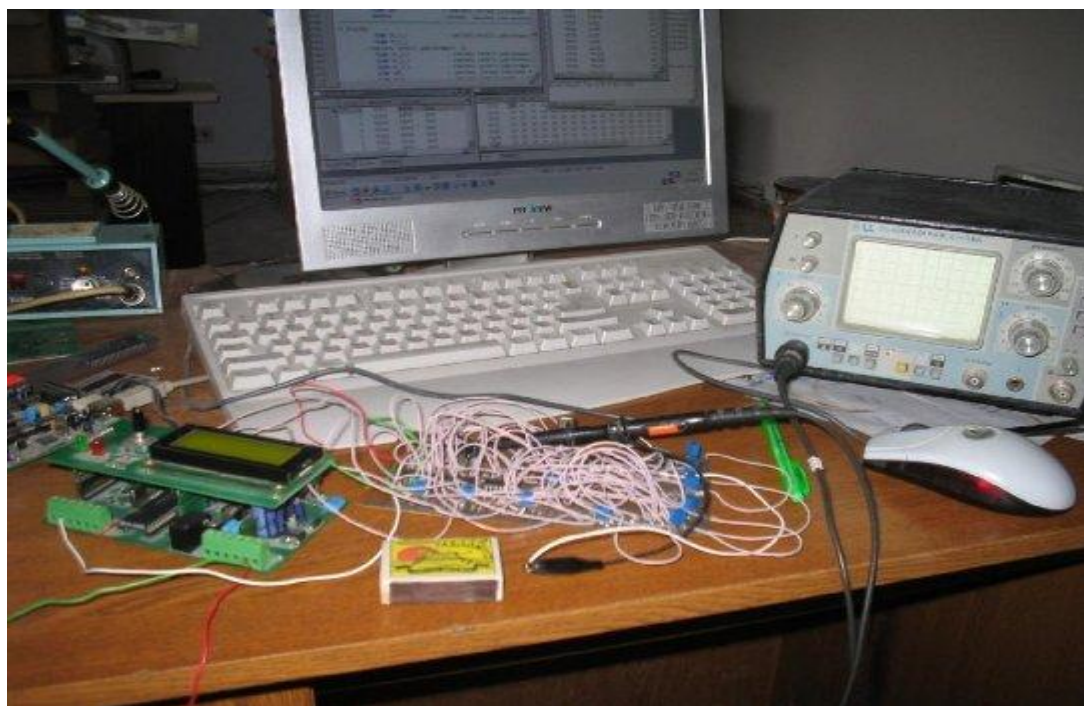


Рисунок 2.14- Процедура отладки программного обеспечения на макетном образце БЗД

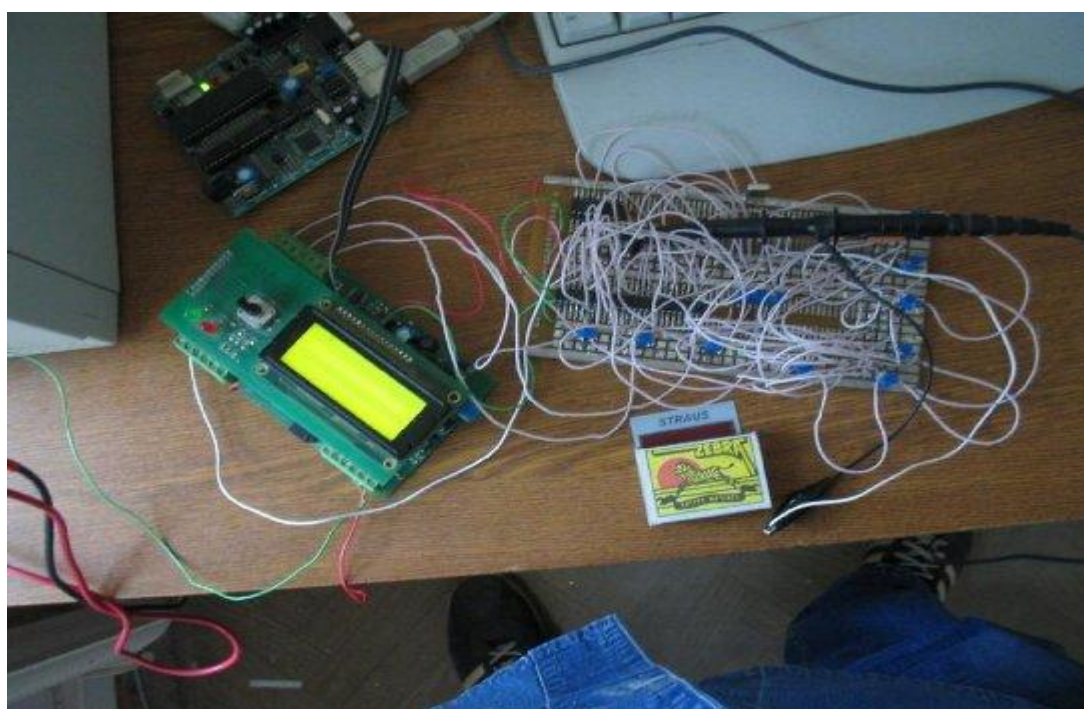


Рисунок 2.15- Процедура программирования микроконтроллера через сервисную плату

На рис. 2.15 представлена процедура программирования микроконтроллера через сервисную плату микрочип.

### 3 Расчет элементов электрических принципиальных схем

#### 3.1 Расчет обвязки микросхемы микроконтроллера

В качестве микроконтроллера в разрабатываемой системе управления используется микросхема PIC 18F452. В соответствии с документацией на используемый микроконтроллер выберем элементы обвязки.

В качестве C7 выбираем полярный конденсатор фирмы Panasonic KS-50B-1 мкФ.

Из ряда номинальных значений E24 в качестве резистора R6 выбираем P1-46-0,125-2,2 кОм  $\pm 1\%$ .

Из ряда номинальных значений E24 в качестве резисторов R7, R8, R9 выбираем P1-46-0,125-200 кОм  $\pm 1\%$ .

Из ряда номинальных значений E24 в качестве резистора R10 выбираем P1-46-0,125-24 Ом  $\pm 1\%$ .

В качестве C8 выбираем из ряда E24 K10-17-25-M1500-3300 пФ.

В качестве C10 выбираем из ряда E24 K10-17-25-N90-0,15 мкФ.

В качестве C9, C11 выбираем из ряда E24 K10-17-25-M47-2,2 пФ.

В качестве кварцевого резонатора BQ1 выбираем прибор марки H-49/U 20 МГц.

#### 3.2 Расчет обвязки микросхем драйверов и коммутатора

В качестве драйверов в разрабатываемой системе управления используется микросхемы IR2302. В соответствии с документацией на используемые драйвера выберем элементы обвязки.

В качестве VD3, VD6, VD9 выбираем диоды марки КД212А.

Из ряда номинальных значений E24 в качестве резисторов R12, R13, R19, R20, R26, R27 выбираем P1-46-0,125-22 Ом  $\pm 1\%$ .

Выбор транзисторов коммутатора следует производить по критерию максимально допустимого продолжительного тока, потребляемого обмоткой фазы. Согласно расчету, проведенного в третьей главе, величина тока

потребления в номинальном режиме  $I_{ф.ном} = 5,13$  А. В соответствии с этим значением выбираем ключи VT1...VT6 марки IRFU024N со следующими параметрами:  $I_{ном} = 17$  А,  $R_{канала} = 0,075$  Ом,  $U_{max} = 55$  В. Рассчитаем мощность тепловыделения в установившемся режиме:

$$P_{расс} = I_{ф.ном}^2 \cdot R_{канала} = 5,13^2 \cdot 0,075 = 1,974 \text{ Вт.}$$

Согласно описанию на выбранный полупроводниковый ключ, максимальная мощность рассеивания корпуса составляет 2 Вт. Следовательно, радиатор не требуется.

В качестве вентилях VD4, VD5, VD7, VD8, VD10, VD11 следует выбрать диоды Шоттки. Диоды используются для рекуперации энергии, запасенной в индуктивностях фазных катушек, в сеть. Выбираем диоды марки MBR360 со следующими параметрами:  $I_{пр.мах} = 3$  А,  $I_{имп.мах} = 80$  А,  $U_{пр.мах} = 60$  В.

Для расчета значения бутстрепной емкости (C12, C15, C17 и C13, C16, C18) в документации рекомендуется следующая формула:

$$C_b = \frac{15 \cdot 2 \cdot [2 \cdot Q_3 + \frac{I_{з.стат}}{f} + \frac{Q_3}{I_{вкл}} \cdot (I_{вкл} + I_{выкл})]}{U_n - U_{VD3} - U_{VD4}}, \quad (3.1)$$

где  $I_{вкл}$  и  $I_{выкл}$  - токи включения и выключения затвора соответственно;

$Q_3$  - заряд затвора;

$f$  - частота следования импульсов;

$U_n$  - напряжение питания;

$U_{VD3}$  - прямое падение напряжения на зарядовом диоде VD3;

$U_{VD4}$  - прямое падение напряжения на оппозитном диоде VD4;

$I_{з.стат}$  - ток затвора в статическом режиме.

Для выбранных элементов коммутатора вышеприведенные величины имеют следующие значения:  $I_{вкл} = 60$  мкА и  $I_{выкл} = 10$  мкА;  $Q_3 = 20$  нК;  $f = 20$  кГц;  $U_n = 3,3$  В;  $U_{VD3} = 1,1$  В;  $U_{VD4} = 1$  В;  $I_{з.стат} = 100$  нА. Можно рассчитать величину бутстрепной емкости:



$$C_b = \frac{15 \cdot 2 \cdot [2 \cdot 20 \cdot 10^{-9} + \frac{100 \cdot 10^{-9}}{20 \cdot 10^3} + \frac{20 \cdot 10^{-9}}{60 \cdot 10^{-6}} \cdot (60 \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 10^{-6})]}{3,3 - 1,1 - 1} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

В качестве С12, С15, С17 и С13, С16, С18 выбираем из ряда Е24 К10-17-25-Н90-1,5 мкФ.

В качестве демпфирующей емкости С14 выбираем электролитический конденсатор FC-16В-2200 мкФ.

### 3.3 Расчет искусственного освещения.

В помещении научно-производственной лаборатории температура воздуха не опускается ниже 10 °С, а напряжение в сети не падает ниже 90% от номинального. Поэтому в качестве источника света выбираем экономичные газоразрядные лампы.

Поскольку в помещении научно-производственной лаборатории производятся работы высокой точности, требующие хорошего освещения, выбирается комбинированная система освещения.

Рассмотрев все критерии научно-производственной лаборатории (загрязненность, взрыво - и пожаробезопасность) выбираем светильники типа ОРД.

Минимальное расстояние между центрами светильников

$$L = k_x \cdot h = 1,5 \cdot 3 = 1,5 \text{ м,}$$

где  $k$  – отношение расстояния между центрами светильников к высоте их подвеса над рабочей поверхностью,  $k_x = 1,5$ ;

$h$  – высота подвеса светильника; принимаем  $h = 3$  м.

Индекс помещения

$$i = \frac{bl}{h(b+l)} = \frac{6 \cdot 12}{3 \cdot (6+12)} = 1,33$$

где  $b$  – ширина помещения;  $b = 6$  м;

$l$  – длина помещения;  $l = 12$  м.

Коэффициент использования светового потока  $\eta$  принимается в зависимости от марки светильника и коэффициентов отражения потолка  $\rho_{п}$ ,

стен  $\rho_c$  и пола  $\rho_p$ .

Для сухого нормального помещения выбираем светильник марки ОДР. Коэффициенты отражения принимаем в зависимости от цвета поверхности:

- для светло-желтой поверхности потолка  $\rho_n = 50\%$ ;
- для бежевой поверхности стен  $\rho_c = 30\%$ ;
- для коричневой поверхности пола  $\rho_p = 10\%$ .

В соответствии с индексом помещения принимаем  $\eta = 38\%$ .

Количество светильников

$$N = \frac{E \cdot S \cdot k \cdot z}{\Pi_n \cdot \Phi \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 72 \cdot 1,5 \cdot 1,5}{2 \cdot 2600 \cdot 0,38} = 16$$

где  $E$  – минимальная нормируемая освещенность, лк; принимаем в соответствии со СНиП для работы высокой точности  $E = 200$  лк;

$S$  – площадь помещения,  $m^2$ ;  $S = 72 m^2$ ;

$k$  – коэффициент запаса, учитывающий старение ламп, запыление и загрязнение светильников; принимаем  $k = 1,5$  для помещений с небольшим содержанием пыли с газоразрядными лампами;

$z$  – отношение средней освещенности к минимальной,  $z=1,5$ ;

$\Pi_n$  – количество ламп в светильнике,  $\Pi_n = 2$ ;

$\Phi$  – световой поток одной лампы, лм; принимаем  $\Phi = 2600$  лм для ЛХБ 40–4.

Принимаем  $N = 16$  штук.

Проектный план установки светильников изображен на рис. 6.2.

Выбор местного освещения.

Минимальный индекс цветопередачи источников света  $R_a$ , для данного помещения составляет 50. Согласно СНиП, выбираем уровень местной освещенности 450 лк. Выбираем светильник соответствующий требованиям: длина светильника 1200 мм, люминесцентная лампа мощностью 72 Вт, с регулировкой направления потока света. Наименование - ДЛ – 12.

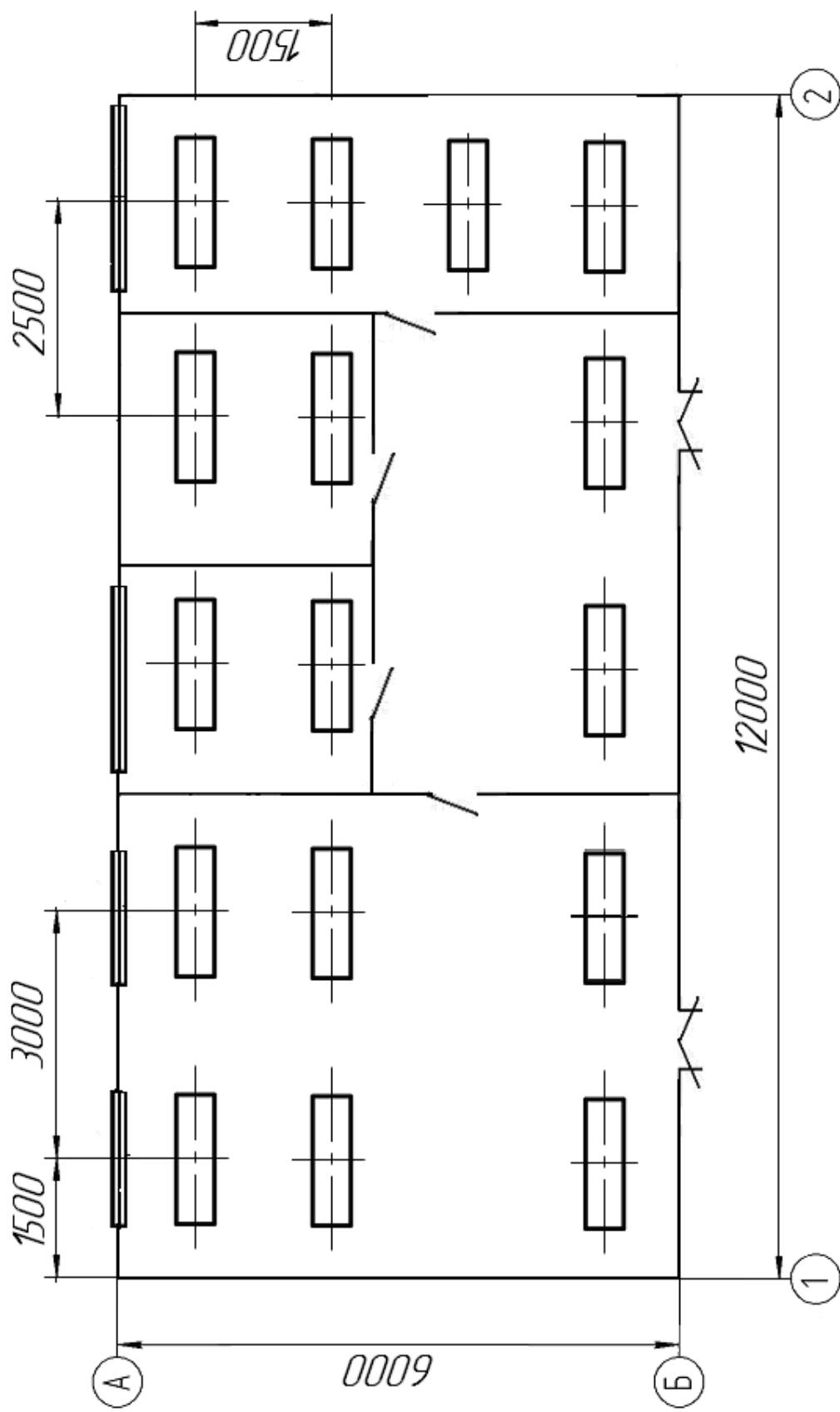


Рисунок 3.1 Проектный план установки светильников

## Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был разработан блок защиты асинхронного двигателя, отвечающий современным требованиям к электронным устройствам промышленного назначения.

Разработанное устройство обладает отличными характеристиками, легкой установкой, широкой степенью интеграции.

Разработанное устройство обладает следующими характеристиками и соответствует всем требованиям к блоку защиты асинхронных двигателей:

- наличие хорошей индикации с подсветкой и управлением, наличие возможности крепления на дин-рейку;
- отдельные трансформаторы (датчики тока) по фазам, с большими проходными диаметрами;
- память аварийных (нештатных) ситуаций;
- память предыдущих установок параметров защиты;
- отсутствие необходимости подключения трех фаз;
- контроль перекоса фаз и обрыва фазы;
- контроль токов утечки.

При проведении разработки блока защиты асинхронных двигателей были выполнены несколько этапов проектно-конструкторской деятельности, а именно:

- разработана концепция защиты асинхронных двигателей, определены датчики, устройства управления, концепцию блока управления;
- разработаны функциональная схема блока защиты асинхронных двигателей;
- разработаны электрические принципиальные схемы блока защиты асинхронных двигателей;
- разработаны алгоритмы работы системы защиты асинхронных двигателей;
- проведен выбор элементной базы;

- выполнено макетное моделирование электрических принципиальных схем, с разработкой печатных плат;
- разработано программное обеспечение программного комплекса блока защиты асинхронных двигателей;
- проведена отладка программного обеспечения путем программно-аппаратного комплекса.

## Список использованных источников

1. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов.– М: Энергия, 2008 г.- 422 с.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений.-3-е изд., перераб. / А.И. Вольдек.- М.: Академия, 2010.- 782с.
3. Петров, Г.Н.. Электрические машины. В 3-х частях. Ч.1. Введение. Трансформаторы. Учебник для вузов / Г.Н. Петров.- М.: Энергия, 2006. - 240с.
4. Ломоносов, В. Ю. Электротехника / В.Ю. Ломоносов, К.М. Поливанов, О.П. Михайлов. – М: Энергоиздат, 2010 г.
5. Копылов, И.П. Справочник по электрическим машинам / И.П. Копылов.– М: Энергия, 2008 г.- 360 с.
6. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов – М: Энергия, 2008 г.- 456 с.
7. Балагуров, В.А. Проектирование электрических машин переменного тока / В.А. Балагуров. – М: Энергия, 2006 г.- 420 с.
8. Морозов, А.Г. Расчет электрических машин постоянного тока / А.Г. Морозов. – М: Энергия, 2007 г.- 264 с.
9. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов.– М: Энергия, 2008 г.- 422 с.
10. Юдин, Е.Я. Охрана труда в машиностроении: учеб. пособие/ Юдин Е.Я., Белов С.В.– М.: Машиностроение, 2009. – 34с.
11. Зимин, Е.Н. Автоматическое управление электроприводами. Учеб. пособие для студ. ВУЗов/ Зимин Е.Н., Яковлев В.И.. – М.: Высш. Шк., 2009. – 49с.
12. Гребнев, В.В. Однокристалльные микроЭВМ (микроконтроллеры) семейства MCS-96 / В.В. Гребнев – М.: Псковская коммерческая палата, 2006.- 246 с.

13. Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930 - Thomas Parke Hughes
14. George Shultz, George Patrick Shultz (1997). Transformers and Motors. Newnes. p. 159. ISBN 978-0-7506-9948-8. Retrieved 2008-09-26.  
Wizard: the life and times of Nikola Tesla : biography of a genius. Citadel Press. 1996. p. 24. ISBN 9780806519609.
15. Polyphase electric currents and alternate-current motors. Spon. 1895. p. 87.
16. Innovation as a Social Process. Cambridge University Press. 2003-02-13. p. 258. ISBN 9780521533126.
17. Fritz E. Froehlich, Allen Kent, The Froehlich/Kent Encyclopedia of Telecommunications: Volume 17, page 36. Books.google.com. 1998-12-01. ISBN 9780824729158. Retrieved 2012-09-10.
18. Ершова, Н.Ю., Ивашенков О.Н., Курсков С.Ю. Микропроцессоры [Электронный ресурс] / Н.Ю. Ершова, О.Н. Ивашенков, С.Ю. Курсков. Режим доступа: <http://dfe3300.karelia.ru/koi/posob/microcpu/vved.htm>  
Дата обращения 10.05.2016
19. Бесщеточные двигатели постоянного тока: Электромонтажные работы [Электронный ресурс] / Режим доступа : [http://electric-220.ru/news/besshchetochnye\\_dvigateli\\_postojannogo\\_toka/2014-11-21-750](http://electric-220.ru/news/besshchetochnye_dvigateli_postojannogo_toka/2014-11-21-750)  
Дата обращения 01.06.2016
20. Промышленное электрооборудование [Электронный ресурс]/ Школа для электриков. Электрон. дан. – режим доступа: <http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1352-jelektrooborudovanie.html> – Дата обращения 25.05.2016 г.