

Список литературы

1. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.

УДК: 004.272.4-022.53:681.586.7

**МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

*Кадыров Ишенбек Шакирович, д.т.н., проф. КГТУ им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, e-mail: [bgtu\\_kg@mail.ru](mailto:bgtu_kg@mail.ru)*

*Борукеев Туйгун Саботарович, к.т.н., доц. КГТУ им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, e-mail: [tuigun\\_ktu@rambler.ru](mailto:tuigun_ktu@rambler.ru)*

*Матеева Гульзат Дюшеналиевна, ст. пр. КГТУ им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, e-mail: [gulzat-7@mail.ru](mailto:gulzat-7@mail.ru)*

Цель статьи – разработка макетного образца цифровой системы импульсно-фазового управления (СИФУ), реализованный с помощью 8-ми разрядного RISC микроконтроллера Atmega 128. Описана как на основе элементной базы 8-ми разрядного микроконтроллера построен алгоритм работы цифрового СИФУ для тиристорного преобразователя. Показан как при реализации микропроцессорной СИФУ был применен модульный принцип построения цифрового СИФУ, работающая с независимой аналоговой системой синхронизации. Обоснована возможность использования макетного образца цифрового СИФУ как для отладки программного обеспечения цифрового СИФУ для управления тиристорным преобразователем, так и использования в учебном процессе при проведении лабораторных занятий.

**Ключевые слова:** макетный образец, цифровая система импульсно-фазового управления, микроконтроллер, алгоритм, аналого-цифровой преобразователь, таймер, счетчик

**THE MICROPROCESSOR SYSTEM OF PULSE-PHASE CONTROL THYRISTOR  
CONVERTER**

*Kadyrov Ishenbek Shakirovich, D.E.S., prof. Kyrgyz State Technical University named I. Razzakova Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatov str. 66, e-mail: [bgtu\\_kg@mail.ru](mailto:bgtu_kg@mail.ru)*

*Borukeev Tuigyn Sabotarovich, C.E.S., doc. Kyrgyz State Technical University named I. Razzakova Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatov str. 66, e-mail: [tuigun\\_ktu@rambler.ru](mailto:tuigun_ktu@rambler.ru)*

*Matekova Gulzat Dushenalievna, Senior lecturer Kyrgyz State Technical University named I. Razzakova Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatov str. 66, e-mail: [gulzat-7@mail.ru](mailto:gulzat-7@mail.ru)*

The purpose of the development of the model sample digital system pulse-phase control (SPPC), implemented with the help of an 8-bit RISC microcontroller built algorithm of digital SPPC for the thyristor converter. It showed how the implementation of microprocessor SPPC was applied modular design of digital SPPC, working with independent analogsynchronization system. The possibility of using a digital model sample SPPC for debugging software for managing digital SPPC thyristor converter, and use in the learning process in laboratory studies.

**Keywords:** Model sample, digital system of pulse-phase control, microcontroller, algorithm, analog-to-digital converter, timer, counter.

**Введение.** В процессе выполнения научно-исследовательской работы «Учебной научно-исследовательской лабораторией» Института совместных образовательных программ (УНИЛ ИСОП КГТУ им. И. Раззакова) по гранту МОиН КР, связанный с автоматизацией технологии производства тепловой и электрической энергии Бишкекской ТЭЦ в техническом задании на НИР был предусмотрен пункт внедрения результатов проекта в учебный процесс.

**Цели и методы.** На рис.1 показан макетный образец цифрового СИФУ, реализованный с помощью 8-ми разрядного RISC микроконтроллера Atmega 128. Элементная база 8-ми разрядного микроконтроллера позволила реализовать алгоритм цифрового СИФУ тиристорного преобразователя. Причем его быстродействие до 16 млн. операций в секунду оказалось достаточным для выполнения алгоритма программного обеспечения СИФУ с заданной точностью.

Эти микросхемы выпускаются большим тиражом, имеют сравнительно низкую стоимость, работают при широких пределах изменения температур окружающей среды, имеют доступную систему программирования и перепрограммирования, обладают высокой степенью защиты от помех, поэтому не требуют создания особых условий в процессе эксплуатации.

Макетный образец служит: во-первых, для отладки программного обеспечения цифрового СИФУ; во-вторых, является устройством для управления тиристорным преобразователем; в-третьих, пособием для обучения студентов. В процессе обучения студентам наглядно поясняется место и



Рис. 1. Макетный образец цифрового СИФУ.

назначение каждого из элементов блока цифрового формирования сигналов управления в шестиканальном СИФУ, позволяет подробно и полно рассмотреть принцип действия каждого из них как самостоятельной единицы в единой системе цифрового формирования управляющих сигналов с возможностью вывода их на экран монитора персонального компьютера (ПК).

Следует отметить, что использование стандартных программных обеспечений СИФУ в учебном процессе не имеет возможности, так как производители программные обеспечения подобных блоков располагают на нижнем уровне в иерархической структуре управления ТП и обеспечивают защиту от несанкционированного доступа, оставляя доступ лишь на верхнем уровне – на уровне блока регуляторов.

На рис 1 основным блоком макетного образца СИФУ является блок с микроконтроллером (МК) Atmega 128 AVR controller, вставленный в специальную розетку. На одной плате с МК расположен интерфейс FTDI. FTDI - это интерфейс USB, который в себе объединяет функциональные возможности двух микросхем FTDI второго поколения вычислительных машин (ВМ), выполненных в одном устройстве. Нижний ведомый USB порт конвертируется в два канала, каждый из которых может быть индивидуально настроен как интерфейс UART типа FT232В или как интерфейс FIFO типа FT245ВМ без необходимости добавления USB хаба. Вход FTDI предоставляет драйверу виртуального СОМ порта или D2XX прямой доступ для написанного для этих целей программного обеспечения (ПО). Все необходимые настройки режимов работы СИФУ хранятся памяти ЕПРОМ.

Прямой доступ в энергонезависимой памяти программ, а так же подключенной к интерфейсной микросхеме FTDI к данным микросхемы FTDI с применением драйверов D2XX позволяет обеспечить надежную работу ПО при низких системных затратах на ресурсы процессора.

При реализации микропроцессорной СИФУ был применен модульный принцип построения цифрового СИФУ, работающей с независимой системой синхронизации. Аналоговые микросхемы монтированы на отдельную плату (на рис.1 над блоком МК), называемой блоками цепей синхронизации. Цепи синхронизации на аналоговых микросхемах формируют входные сигналы  $U_{Г(A)}$ ,  $U_{Г(B)}$ ,  $U_{Г(C)}$ ,  $U_{Г(-A)}$ ,  $U_{Г(-B)}$ ,  $U_{Г(-C)}$  для МК. На этой же плате расположены источники питания стабилизированных напряжений. Входными сигналами блоков цепей синхронизации являются напряжения синхронизации  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$ , поступающие на зажимы отдельной платы (на рис.1 слева от МК), предназначенную для нормирования сигналов по уровню.

Принципиальная схема макетного образца цифрового СИФУ представлена на рис. 2. При разработке принципиальной схемы учитывалась ограниченное быстродействие микроконтроллера, поэтому блоки цепей синхронизации требующие значительного времени вычисления, связанного с вычитанием полуволн синхронизирующих напряжений  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  и сравнением с опорными напряжениями выполнены на аналоговых микросхемах.

На рис 3 для наглядности показаны осциллограммы напряжений, поясняющие принцип формирования синхроимпульса  $U_{Г(A)}$ . Левый операционный усилитель в блоке формирования синхроимпульса  $U_{Г(A)}$  (рис. 2), работающий в режиме сумматора производит алгебраическое суммирование  $u_a - u_c$  (рис. 3, б). В результате этого действия получается сигнал, в котором полезным являются положительная составляющая напряжения, начальная фаза которой отстает на  $30^\circ$  электрических градусов от напряжения синхронизации  $u_a$  (рис. 3, а). Второй операционный усилитель, работающий в режиме регенераторного компаратора преобразует этот полезный сигнал в синхроимпульс  $U_{Г(A)}$  (рис. 3, в). Остальные аналоговые блоки формируют синхроимпульсы по такому же алгоритму по другим пяти каналам СИФУ.

Шесть внешних входов прерываний  $INT0-INT5$  микроконтроллера на рис. 2 отведены для подачи синхроимпульсов  $U_{Г(A)}$ ,  $U_{Г(B)}$ ,  $U_{Г(C)}$ ,  $U_{Г(-A)}$ ,  $U_{Г(-B)}$ ,  $U_{Г(-C)}$ .

Центральный блок на рис. 2 микроконтроллер программно реализует линейно-изменяющее напряжение по форме, совпадающей с осциллограммой на рис. 3, з, производит сравнение с цифровым кодом напряжения  $U_y$ , формирует импульс подобный сигналу на рис. 3, д, нормированный по длительности и выдает на выход спаренные импульсы (основной и подтверждающий рис. 3, е).

Напряжение управления  $U_y$ , поступающее на вход  $ADC0$  микроконтроллера, преобразуется в цифровой код с помощью встроенного 10-ти разрядного АЦП в диапазоне от 0 до 1023 чисел. Этим числам соответствует диапазон изменения входного напряжения от 0 до 5 В. Сигнал с выхода  $P1$  подается на вход блока формирования импульса для тиристора  $VT1$  (рис. 2).

Тенденция перевода от аналого-цифровых систем управления электроприводами на микропроцессорный вариант началась в конце прошлого столетия, когда бурное развитие в области микроэлектроники привели к производству многоразрядных и быстродействующих процессоров. Разрядность и быстродействие в первую очередь влияет на точность вычисления математических операций.

Оценим, какую точность может обеспечить выбранный МК исходя из того, что в аналоговом шестиканальном СИФУ [1] одновременно работают 3 генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН).

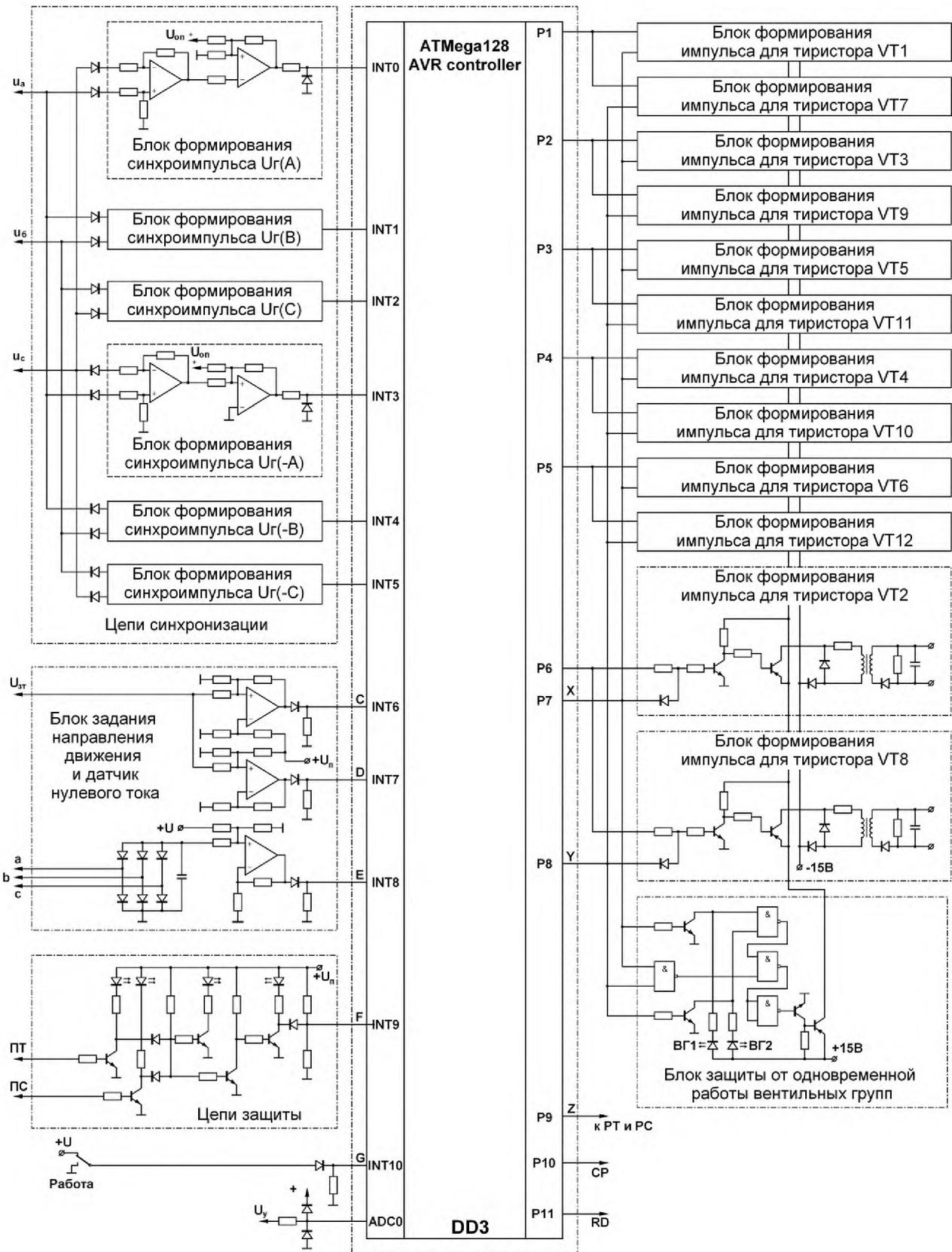


Рис.2. Принципиальная схема цифрового СИФУ

Для выполнения функции цифрового ГЛИН выделены три 16-ти разрядные таймеры – счетчики (*Timer 1*, *Timer 2*, *Timer 3*), а таймер (*Timer 0*) для отсчета длительности управляющих импульсов, подаваемые на управляющие электроды силовых вентилялей. Каждый из 4-х таймеров в составе микроконтроллера имеет внутренний предделитель тактовой частоты для обеспечения необходимого интервала работы. В статье [2] приведены коэффициенты предделителей для каждого из 4-х таймеров и обоснован выбор коэффициента 256, позволяющий производить счет слов длиной в восемь бит и получить 256 цифровых значений в диапазоне  $[0 \div 255]$  чисел.

В данном диапазоне работы таймера–счетчика частота тактовых импульсов, обеспечивающих заданное быстродействие при заданной длительности синхроимпульсов  $T_H = 8,33 \text{ мс}$ , поступающие на входы прерываний микроконтроллера *INT0-INT5*, заданная точность вычисления МК достигается при расчетной частоте:

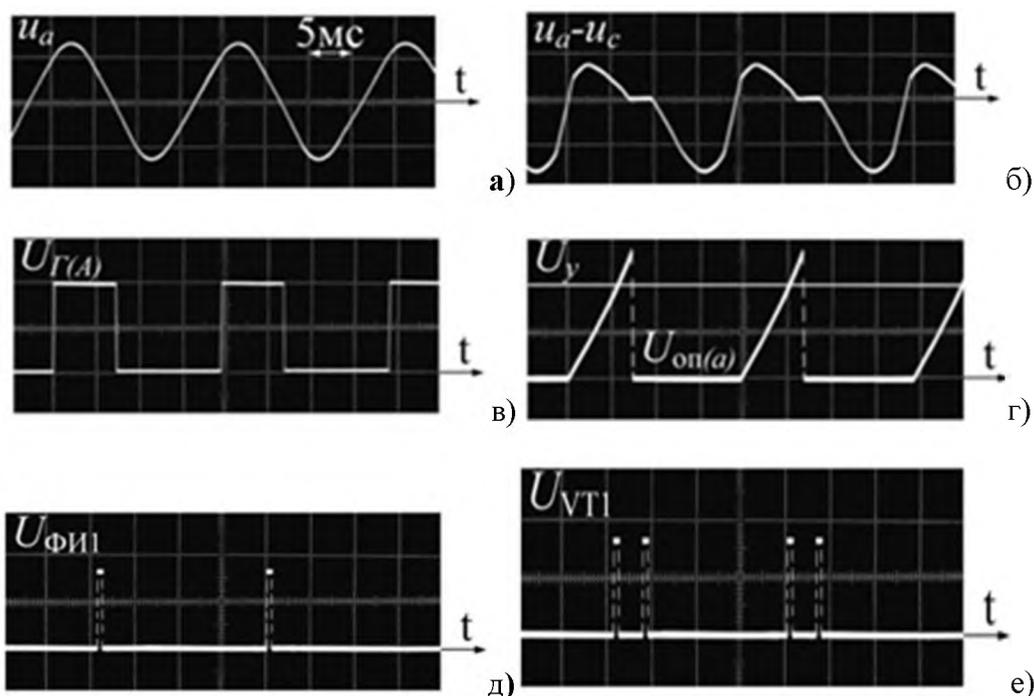


Рис.3. Диаграммы напряжений блоков цифро-аналогового СИФУ.

$$T_{\text{сч}} = T_H / 255 = (8,33 \cdot 10^{-3}) / 255 = 32,68 \cdot 10^{-6} \text{ с.} \quad (1)$$

Так как таймеры-счетчики (*Timer 1-3*) должны работать согласованно при одинаковом коэффициенте предделителя, то имеет смысл привести в соответствие частоту тактирования таймеров с частотой тактирования микроконтроллера. Тогда период тактовых импульсов микроконтроллера можно вычислить, используя выражение:

$$T_{\text{конт}} = T_{\text{сч}} / 256 = (32,68 \cdot 10^{-6}) / 256 = 0,128 \cdot 10^{-6} \text{ с,} \quad (2)$$

а частота кварцевого генератора, обеспечивающая заданное быстродействие, определится как:

$$f_{\text{кв}} = 1/T_{\text{конт}} = 1/(0,128 \cdot 10^{-6}) = 7,83 \cdot 10^6 \text{ Гц.} \quad (3)$$

Из стандартного ряда выпускаемых промышленностью кварцевых генераторов ближайшей к расчетной является кварцевый генератор с рабочей частотой  $f_{\text{квст}} = 8$  МГц. Тогда 16-ти разрядный таймер-счетчик, работая в режиме прямого счета с тактовыми импульсами с периодом  $T'_{\text{сч}}$ , весь диапазон изменения чисел от 0 до 255 произведет за время  $T_{\text{ир}} = T'_{\text{сч}} \cdot 255 = 32 \cdot 10^{-6} \cdot 255 = 8,16 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ . Отношение интервала времени  $T_{\text{ир}}$  формирования цифрового напряжения *ГЛИН*, прообраза аналогового, к заданному  $T_{\text{и}}$  даст возможность определить точность вычисления, производимого таймерами-счетчиками:

$$T_{\text{ир}}/T_{\text{и}} = 8,16/8,33 = 0,98, \quad (4)$$

что составляет точность не хуже 0,2%, поэтому этот показатель является высоким. Разность интервала времени  $\Delta T = T_{\text{и}} - T_{\text{ир}} = 8,33 - 8,16 = 0,17 \text{ мс}$  (в пересчете на электрические градусы примерно  $3^\circ$ ), можно отнести к погрешности вычисления.

**Результаты исследований.** На рис. 4 представлен алгоритм работы микропроцессорного *СИФУ*, из которого видно, что работа микроконтроллера состоит из двух этапов. На первом этапе производится подготовка основных элементов центрального процессора (внутренние регистры, счетчики-таймеры, цифровые компараторы и др.) и периферийных устройств (цепи интерфейсов) к работе. Ко второму этапу можно отнести формирование управляющих импульсов силовых вентилях тиристорного преобразователя.

Программная последовательность команд *МК* является циклическим и поддерживает четыре основных направления обработки. Первое направление относится к функции преобразования аналогового напряжения управления  $U_{\gamma}$  в цифровой код. Остальные три направления относятся к цифровому *СИФУ*, предназначенные для формирования управляющих импульсов силовыми вентилями. Счетчики-таймеры этих направлений запускаются по переднему фронту программной последовательности и работают в режиме счета. Останов счетчиков происходит по сигналам прерываний, образующихся после сравнения слов: слово *A* с выходов таймера-счетчика; слово *B*, пропорционального мгновенному значению напряжения управления  $U_{\gamma}$ . Одновременно по сигналам прерываний цифровых *ГЛИН* происходит запуск таймера *Timer 0* для задания требуемой длительности управляющих импульсов для всех шести каналов силовых вентилях.

Распределение импульсов по выходам (*P1–P6*) микроконтроллер формирует в зависимости от синхроимпульсов на входах *INT0–INT5*. Например, по каналу вентиля *VT1* управляющий основной импульс в соответствии с синхроимпульсом  $U_{\Gamma(A)}$  поступает на выход *P1*, а на выход *P6* – подтверждающий и т.д.

Для варианта реверсивного электропривода с тиристорным преобразователем используется блок логики *БЛ*, с помощью которого производится управление группами вентилях, обеспечивающих различные режимы работы двигателя: двигательного, тормозного и реверса. Кроме этого в функцию блока логики входит отслеживание значений регулируемых параметров, на случай блокирования подачи управляющих импульсов в силовые вентиля, если их значение превышают допустимые. Блок логики состоит из трех основных устройств, выделенные отдельно в зависимости от их функциональных назначений: логического переключающегося устройства (*ЛПУ*), блока задания направления движения (*БЗНД*) и цепей защиты (*ЦЗ*), способствующих непрерывному управлению электроприводом.

*ЛПУ* предназначен для выработки сигнала блокирования подачи управляющих импульсов на работающую группу вентилях с момента, когда напряжение задания на скорость  $U_{\text{сч}}$  поменяет свой знак на обратное в соответствии с программой работы. При этом сигнал на разрешение подачи управляющих импульсов на вновь вступающую группу вентилях *ЛПУ* выработает только после спада тока в цепи якоря до нуля и задания времени на восстановление запирающих свойств вентиля. В микропроцессорном варианте функция *ЛПУ* реализуется программным способом. Контроль токов, протекающие через силовые вентиля, производятся с помощью датчика нулевого тока (*ДНТ*). Сигнал с выхода *ДНТ* подается на вход *INT8* (рис.2).

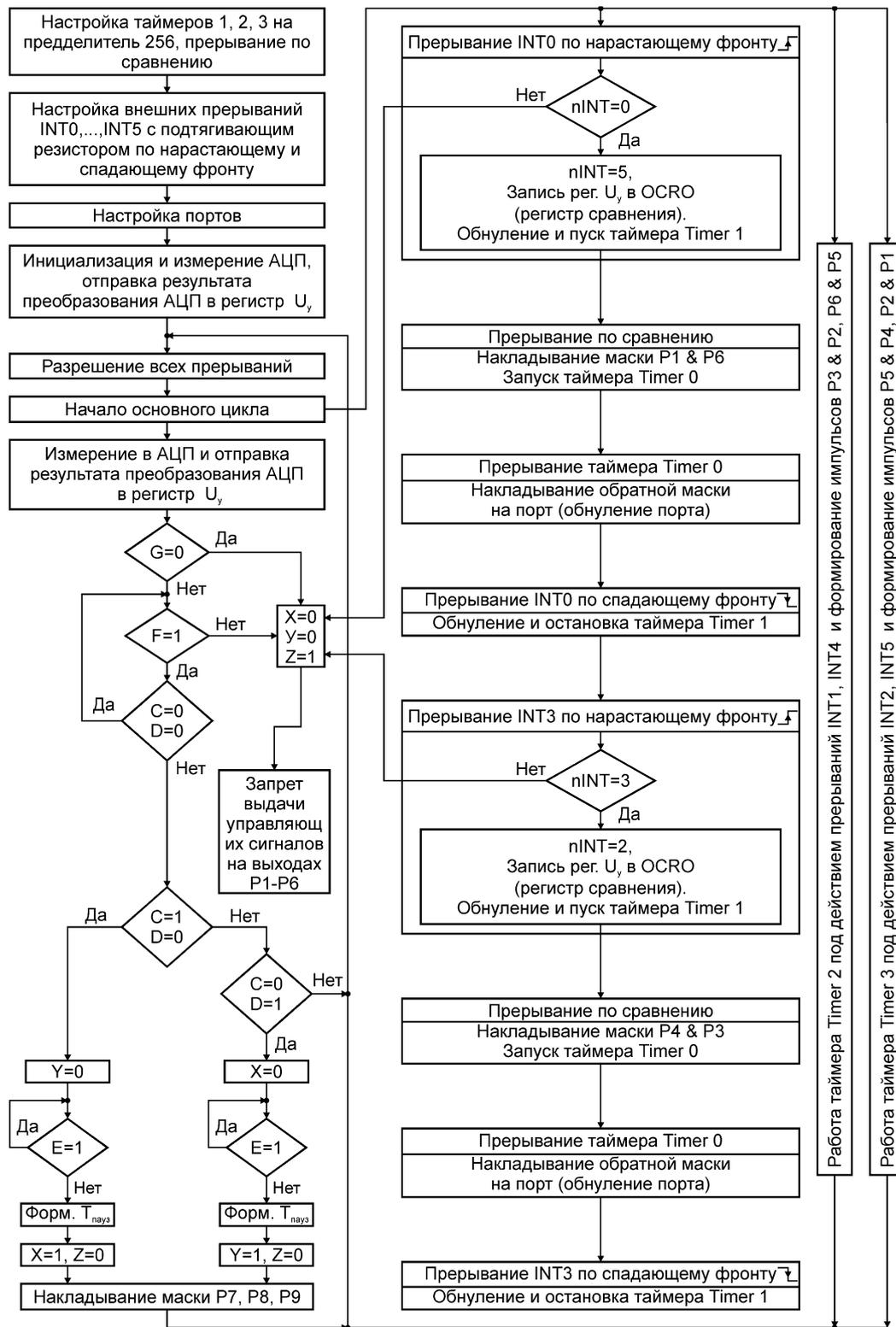


Рис.4. Алгоритм программы для микроконтроллера, реализующего цифровое СИФУ.

БЗНД реализован на регенераторных компараторах, принцип действия которых описана в работе [1]. Выходные сигналы БЗНД подаются на входы INT6 и INT7 соответственно для задания работы двигателя условно «Вперед» и «Назад».

В программном обеспечении *МК* предусмотрен алгоритм, по которому выполняются защитные функции в системе управления тиристорным преобразователем. Основными из них являются защиты: от неправильного чередования и от обрыва фаз питающего напряжения; от превышения тока в цепи якоря двигателя; от превышения скорости на валу двигателя и др. Защитные функции в *ПО МК* вырабатываются в результате анализа синхроимпульсов по входам *INT0–INT5*, сигнала по входу *INT9* по цепи – защита от превышения тока и скорости двигателя. Защитная функция *ПО* обеспечивается в результате выработки команды, по которому автоматически блокируется подача управляющих импульсов силовым вентилям, отключается питающее напряжение в силовых цепях тиристорного преобразователя. При этом загорается соответствующая индикация, указывающая на наличие сбоя в работе системы управления тиристорным преобразователем.

Управляющая программа включает, настраивает, вводит в необходимый режим и контролирует работу всех элементов вычисления центрального процессора и периферийных устройств в составе контроллера.

Коротко поясним об операциях прерывания, используемых в блок-схеме на рис 4, которые делятся на аппаратные и программные. В *ПО СИФУ* были использованы аппаратные прерывания для организации взаимодействия с внешними устройствами, так как запросы прерывания, поступающие на вход контроллера, выполняются аппаратными средствами *ЭВМ* автоматически. Программные прерывания используются в особых случаях, когда выполнение команд препятствует нормальному продолжению программы или при обращениях к специальным функциям операционной системы для ввода-вывода информации.

**Выводы.** Все режимы работы цифрового *СИФУ*, несмотря на ограниченность программных ресурсов, быстродействия и усложненных условий настройки каналов *СИФУ*, согласно приведенным осциллограммам на рис. 3, имеют место быть. В заключение следует отметить, что в связи с бурным развитием вычислительной, микропроцессорной техники цифровые системы управления электроприводами получили наибольшее распространение. В связи с этим при подготовке бакалавров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» – профиль «Электропривод и автоматика» изучению вопросов микропроцессорных систем управления электроприводами необходимо уделять большое внимание. Эти системы имеют более широкие возможности реализации сложных и эффективных алгоритмов обработки сигналов, которые в большинстве своем недоступны для реализации аналоговыми цепями.

### Список литературы

1. Кадыров И.Ш. Принципы, методы и алгоритмы построения микропроцессорных систем управления электромеханическими машинными агрегатами [текст]: Монография / Кадыров И.Ш. – Бишкек: ИЦ «Текник», 2007. – 206 с.
2. Кадыров И.Ш. Разработка цифровой унифицированной системы управления электроприводами. [текст]: / Кадыров И.Ш., Полянинов Г.А., Постнов А.А. Известия КГТУ им. Раззакова, № 29, 2013. – Бишкек: – С. 213-217.