

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ НА ОСНОВЕ ОДНОКРИСТАЛЬНОЙ микроЭВМ

Евгений Забудский

Аннотация: Особенности развития электроэнергетики, а именно: рост единичных мощностей энергоустановок, большая протяженность электросетей, наличие слабых межсистемных связей, повышение неравномерности графиков нагрузки обуславливают необходимость совершенствования систем автоматического управления (САУ) энергетическими объектами. Опыт эксплуатации микропроцессорных САУ электроэнергетическими объектами показал их преимущества по сравнению с устройствами, выполненными на дискретных компонентах. Разработана микропроцессорная САУ, которая совместно со статическим компенсатором реактивной мощности (СКРМ) предназначена для поддержания напряжения в электроэнергетической системе в месте его установки на заданном уровне. Одновременно со стабилизацией напряжения снижаются потери мощности в системе, и улучшается режим работы электропотребителей.

Ключевые слова: микроЭВМ, система автоматического управления, управляемый реактор, распределительная электросеть.

ITHEA Keywords: J.7 Computers in Other Systems – Process control.

Введение

В автоматических устройствах управления с встроенными микроЭВМ реализуются более сложные алгоритмы управления. Запись программ в перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) позволяет изменять алгоритмы в процессе эксплуатации при развитии энергосистем и адаптировать их к индивидуальным характеристикам конкретных электрических схем. Применение встраиваемых микроЭВМ в устройствах автоматического управления электроэнергетическими объектами дает возможность снизить ущерб от повреждения электрооборудования и повысить качество вырабатываемой электроэнергии.

Разработана, изготовлена и испытана микропроцессорная система управления углом открытия оптоэлектронных тиристорных управляемых реакторов (УР), электромагнитные схемы которых

рассмотрены и исследованы [Zabudsky, 2003]. Одно из назначений управляемого реактора – выполнение функций регулирующего элемента СКРМ, который предназначен для работы в распределительных сетях (Рис. 1,а,б).

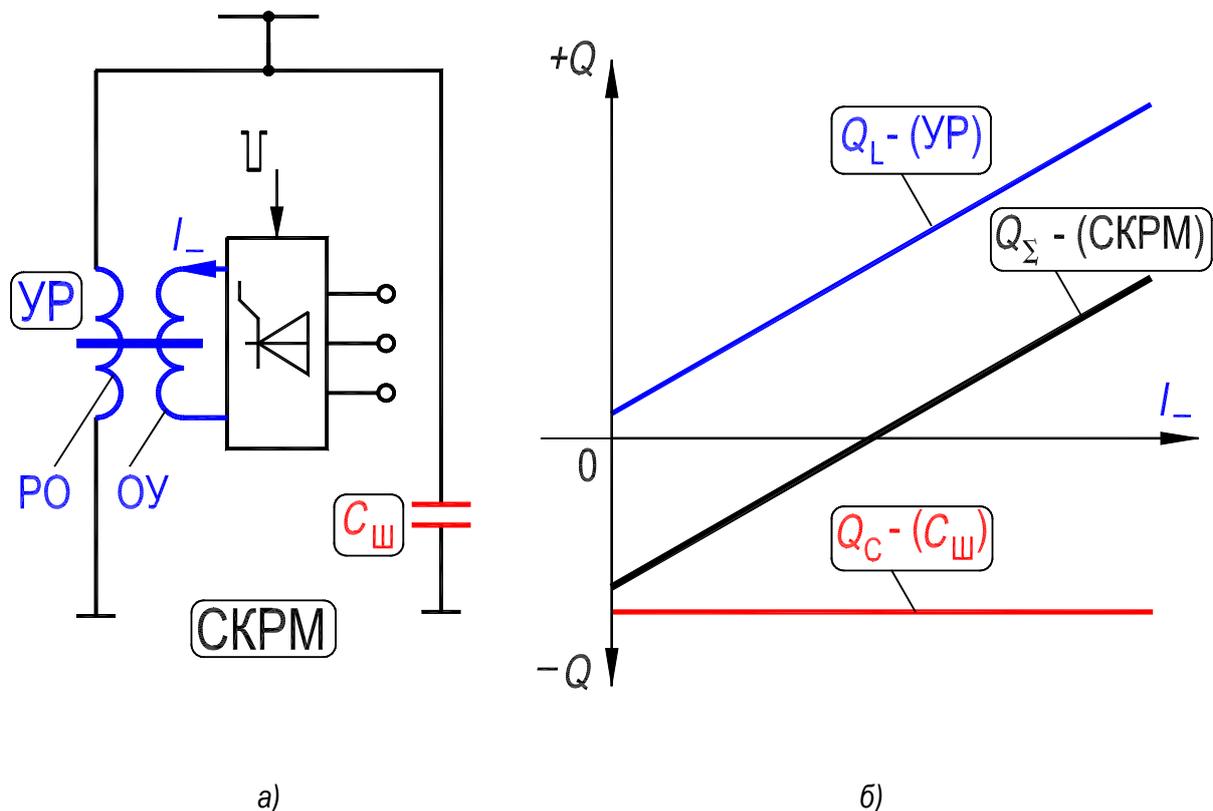


Рис. 1. Принципиальная схема СКРМ (а); характеристика реактивной мощности СКРМ (б)

Так как при компенсации реактивной мощности Q потери напряжения в сети уменьшаются, то при определенных условиях СКРМ используется не только для обеспечения баланса реактивной мощности, но и в качестве средства регулирования и стабилизации напряжения в сети в месте его установки. Это достигается регулированием потребления и выдачи реактивной мощности компенсатором посредством выработки управляющего воздействия, подаваемого на оптотиристоры в соответствии с измеряемыми переменными системы. Одновременно со стабилизацией напряжения снижаются потери мощности в электроэнергетической системе, и улучшается режим работы электропотребителей.

Микропроцессорная система управления реализована на основе однокристалльной микроЭВМ KP1816BE51 [Stashin, 1990]. Разработан алгоритм и составлена управляющая ассемблер-программа. Управление реакторами, предназначенными для работы в распределительных

сетях, осуществляется автоматически путем сравнения номинального напряжения сети с измеряемым напряжением в месте установки реактора. Управление реакторами, предназначенными для дальних высоковольтных ЛЭП, осуществляется автоматически путем сравнения натурального тока линии с протекающим по линии током в месте установки реактора [Aleksandrov, 1993]. Целью автоматического регулирования в первом случае является поддержание напряжения в сети на заданном уровне. Во втором случае целью автоматического регулирования является компенсация избыточной реактивной мощности линии.

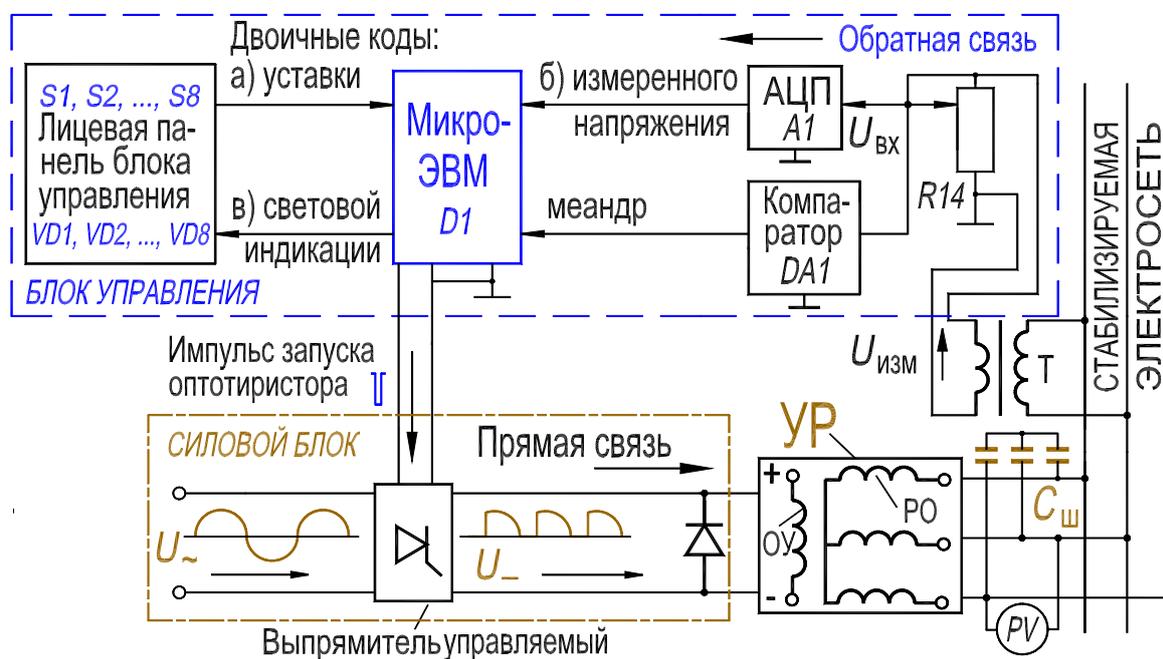


Рис. 2. Функциональная схема САУ

1. Структура и принцип действия САУ

Целью действия САУ является автоматическая стабилизация напряжения распределительной электросети в месте установки реактора на уровне соответствующем номинальному напряжению с заданной точностью приблизительно $\pm 1\%$. Это реализуется за счет изменения тока подмагничивания $I_{\text{с}}$ совмещенных управляемых реакторов и реакторов-трансформаторов. При уменьшении напряжения сети необходимо уменьшать ток подмагничивания до тех пор, пока напряжение сети не увеличится до нормируемого уровня, а при увеличении напряжения – необходимо соответственно увеличить ток подмагничивания. САУ состоит из блока управления,

силового блока и источника постоянного стабилизированного напряжения +5 В, +15 В и -15 В. На Рис. 2 показана функциональная схема САУ.

Однокристалльная микроЭВМ КР1816ВЕ51 (*D1*), на основе которой реализован блок управления, имеет следующие аппаратные средства: процессор, в состав которого входят восьмиразрядное арифметико-логическое устройство и схемы аппаратной реализации команд умножения и деления; перепрограммируемое ПЗУ емкостью 4 Кбайт, ОЗУ данных емкостью 128 байт; два 16-битных таймера/счетчика; программируемые схемы ввода/вывода (32 линии); блок двухуровневого векторного прерывания от пяти источников; асинхронный канал дуплексного последовательного ввода/вывода информации со скоростью до 375 Кбит/с; генератор; схема синхронизации и управления.

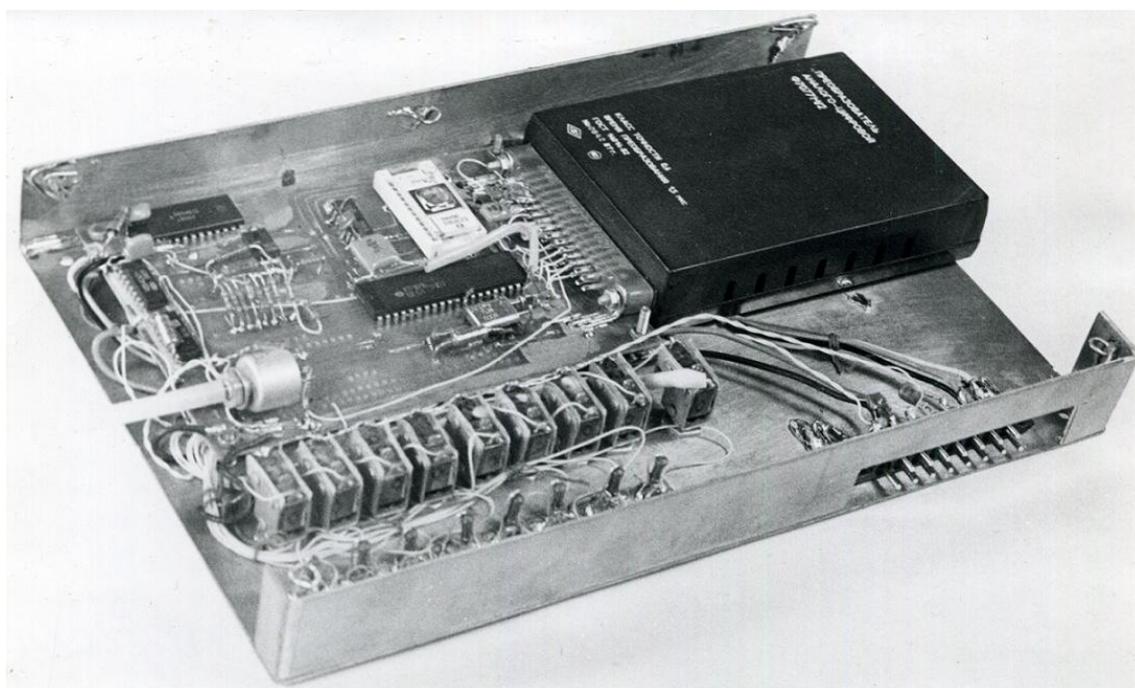
МикроЭВМ серии 1816 требуют одного источника электропитания $+5\text{ В} \pm 10\%$, рассеивают мощность $\sim 1,5$ Вт. Исходные тексты программ для микроЭВМ составляются на языке ассемблера. МикроЭВМ может работать в диапазоне частот от 1,2 до 12 МГц, при этом минимальный цикл выполнения команды равен 1 мкс, а быстродействие – 1 млн коротких операций в секунду.

Однокристалльная микроЭВМ КР1816ВЕ51 обладает значительными функционально-логическими возможностями и представляет собой эффективное средство автоматизации на основе применения средств и методов обработки данных и цифрового управления разнообразных, в том числе и электроэнергетических объектов и процессов.

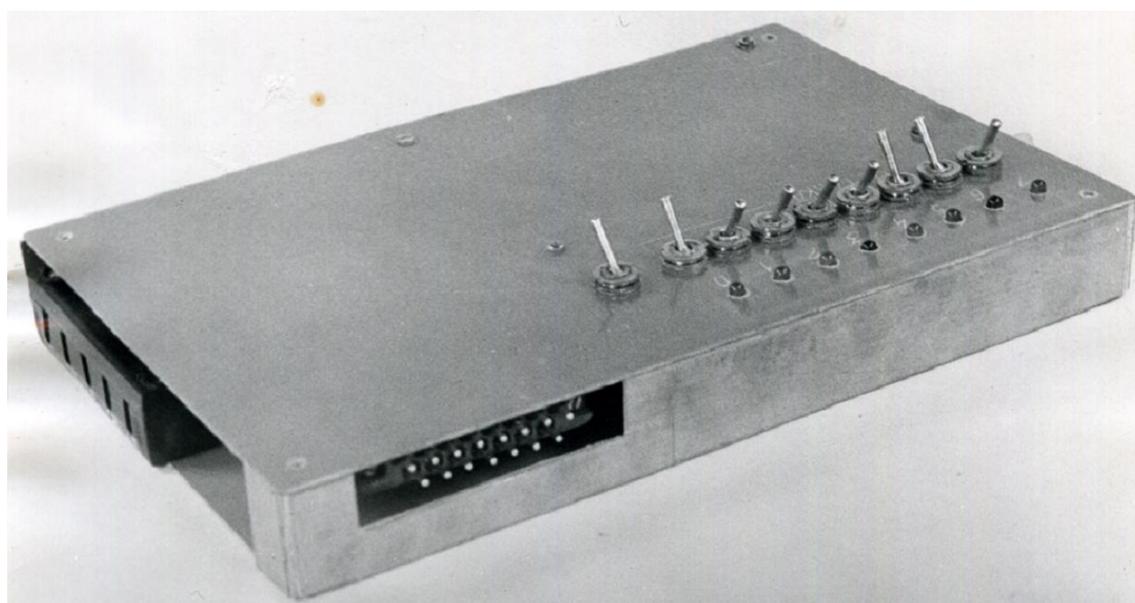
В состав блока управления входит также АЦП (преобразователь) Ф7077М/2 (*A1*), который выполняет функцию преобразования измеряемого напряжения стабилизируемой электросети в цифровой двоичный код. Преобразователь *A1* характеризуется следующими основными техническими данными: принятый диапазон преобразуемого напряжения от $-1,02$ до $+1,02$ В; класс точности – 0,6; номинальная ступень квантования – 4 мВ; время преобразования не более 1,5 мкс; время цикла кодирования не более 1 мкс; выходной код преобразователя – двоичный, параллельный девятиразрядный. Преобразователь *A1* реализован на основе полупроводниковой интегральной схемы К1108ПВ1 – десятиразрядного, прецизионного, быстродействующего АЦП.

Питание блока управления САУ осуществляется от источника питания +5 В, +15 В, -15 В, а силовой блок питается от сети переменного тока. Габаритные размеры блока управления 260x180x40 мм, его масса составляет не более 1 кг. Фотографии блока управления приведены на Рис. 3,а,б. Посредством оптодиодов, которые включены в два плеча мостового управляемого выпрямителя питающего обмотку управления (ОУ) реактора, осуществляется

воздействие блока управления на силовой блок; с другой стороны, посредством оптодиристоров осуществляется гальваническая развязка этих блоков, т.е. слаботочной и силовоточной цепей.



а)



б)

Рис. 3. Фотографии блока управления: вид на плату – (а); вид на лицевую панель – (б)

Принцип действия САУ заключается в следующем. Стабилизируемое напряжение распределительной электросети через трансформатор напряжения Т поступает на АЦП А1 (Ф7077М/2), где преобразуется в цифровой двоичный код, который сравнивается процессором с цифровым двоичным кодом (уставкой) задающимся с помощью переключателей S1, S2, ..., S8, установленных на лицевой панели блока управления (Рис. 2 и 3,б). При неравенстве этих кодов определяется знак рассогласования и соответствующим образом изменяется угол открытия оптоисториков в каждом полупериоде сети, от которой питается силовой блок, что приводит к изменению постоянной составляющей тока протекающего в ОУ реактора и в свою очередь к изменению напряжения стабилизируемой электросети [Zabudsky, 1994]. Система автоматического регулирования, совместно с управляемым реактором, образуют замкнутую систему автоматического поддержания заданного уставкой напряжения электросети.

2. Основы функционирования САУ

При разработке алгоритма функционирования САУ использован математический аппарат цифровой (дискретной) обработки аналоговых величин, который сводится к следующему.

Среднее квадратичное значение напряжения за половину периода вычисляется согласно формуле:

$$U = \sqrt{(2/T) \int_0^{T/2} u^2 dt}, \quad (1)$$

где u – мгновенное значение измеряемого напряжения; T – период изменения стабилизируемого напряжения, при частоте 50 Гц равный 0,02 с.

Для цифровой обработки аналоговой величины осуществляется дискретизация непрерывной временной функции напряжения распределительной электросети, т.е. интеграл в (1) заменяется суммой:

$$U = \sqrt{(2/T) \sum_{n=0}^k u_n^2 \Delta t}, \quad (2)$$

где u_n – значение n -ой выборки измеряемого напряжения стабилизируемой электросети, которое подается на вход АЦП А1; n – текущий номер выборки, т.е. измерения напряжения; k – количество выборок в течение половины периода.

Примем, что преобразование аналоговой величины в цифровую форму осуществляется через равные промежутки времени $\Delta t = \text{const}$, тогда (2) записывается в виде:

$$U = \sqrt{(1/k) \sum_{n=0}^k u_n^2}. \quad (3)$$

Значение количества выборок k принято из соображения укладки его в один байт ($k \sim 210$) и обеспечения достаточной точности. В этом случае промежуток между двумя выборками определяется как

$$\Delta t = T/2k \approx 48 \text{ мкс}. \quad (4)$$

Использованный АЦП преобразует мгновенное значение переменного напряжения, поступающего на его вход, в цифровой двоичный код, снимаемый с выхода за 1,5 мкс. Изменение напряжения на входе за это время много меньше веса младшего двоичного разряда АЦП (для данного уровня и частоты входного напряжения), поэтому можно утверждать, что АЦП работает в режиме преобразования постоянного напряжения.

На восходящем участке функции $u^2(t)$ преобразование напряжения в цифровой код осуществляется АЦП $A1$ с недостатком, а на нисходящем – с избытком. Однако при достаточно большом числе выборок за полпериода эти погрешности взаимно компенсируются вследствие симметрии зависимости $u^2(t)$.

Достоинством используемого аппарата преобразования аналоговой величины в дискретную является устойчивость по отношению к высокочастотным помехам.

Для оценки рассогласования между измеренным напряжением распределительной электросети и эталонным напряжением U_3 , заданным уставкой, и выработки соответствующего управляющего воздействия вычисляется на основе (3) среднее значение квадрата измеренного напряжения за полпериода по формуле:

$$U_{\text{cp}} = \left(\sum_{n=0}^k u_n^2 \right) / k. \quad (5)$$

Среднее квадратичное значение напряжения распределительной электросети за положительный полупериод составляет:

$$U_{\text{д}} = \sqrt{U_{\text{cp}}}. \quad (6)$$

Таким образом, необходимо согласно (5) осуществить программно накопление суммы квадратов двоичных кодов k выборок измеренного напряжения, а затем определить среднее значение этой суммы. Далее необходимо программно двоичный код уставки возвести в квадрат. Результат последнего действия соответствует квадрату эталонного напряжения U_3 , заданного уставкой. На

основе сопоставления вычисленных двоичных кодов величин U_{cp} и U_3^2 определяется знак рассогласования и вырабатывается соответствующее управляющее воздействие.

Вышеприведенный математический аппарат реализован в управляющей ассемблер-программе, которая состоит из основной программы и шести подпрограмм: 1) подпрограмма обработки прерываний от таймера; 2) подпрограмма вычисления квадратного корня; 3) подпрограмма сдвига вправо двухбайтового числа; 4) подпрограмма умножения двухбайтовых чисел; 5) подпрограмма деления многобайтовых чисел; 6) подпрограмма сдвига влево многобайтового числа. В Приложении представлены на Рис. П1 – структурная диаграмма основной ассемблер-программы и на Рис. П2 – структурная диаграмма подпрограммы обработки прерываний от таймера.

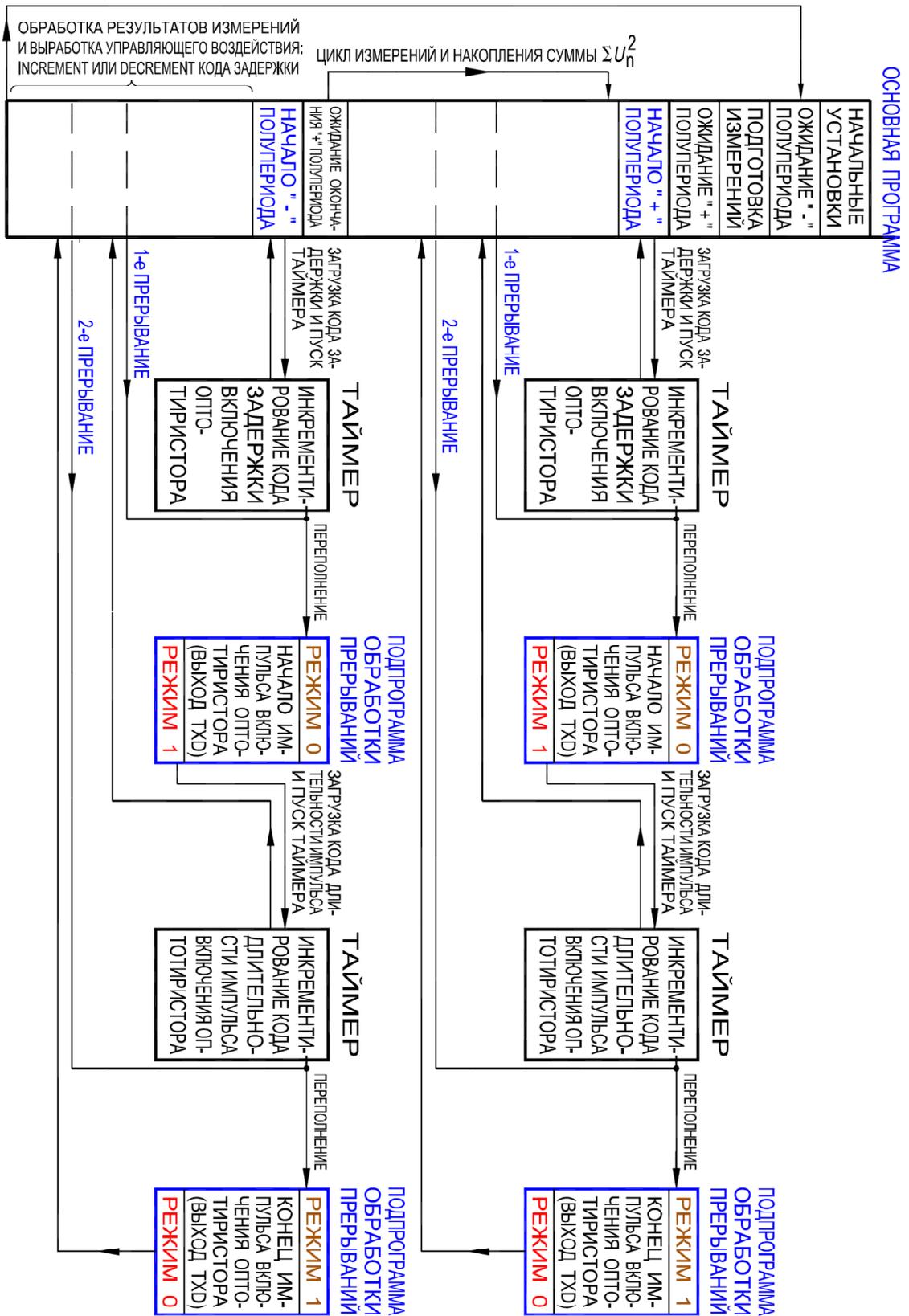
Подпрограмма обработки прерываний от таймера работает в двух режимах: режимы "0" или "1", которые определяются признаком, т.е. значением бита #08₁₆ в памяти данных. Если бит установлен в "0", то имеет место режим "0" подпрограммы, а если бит установлен в "1", то – режим "1". Режим "0" характеризуется тем, что в нем начинается импульс запуска оптодиристоров, длительность этого импульса установлена программно в 200 мкс, а в режиме "1" импульс запуска оптодиристоров прекращается. Исходный текст программ составлен в мнемосодах ассемблера микроЭВМ и посредством кросс-ассемблера оттранслирован в шестнадцатеричный код. Машинный код программ помещен в ППЗУ 573РФ2.

3. Алгоритм работы САУ

Система автоматического управления работает следующим образом: 1) переключатель S9 "Сброс-работа" устанавливается в положение "Сброс"; 2) на блок управления подается питание + 5 В, + 15 В и – 15 В;

3) силовой блок подключается к сети переменного тока; 4) на переключателях S1, S2, ..., S8 набирается двоичный код уставки; 5) микроЭВМ (D1) переходит из состояния сброса к работе по управляющей программе. В результате в электросети в месте расположения УР устанавливается в соответствии с ВАХ реактора заданное значение напряжения, отображаемое на вольтметре PV (Рис. 2).

Последовательность работы управляющей программы, а, следовательно, и всей системы управления, рассмотрим на основе блок-схемы взаимодействия основной программы с таймером и подпрограммой обработки прерываний, инициируемых по переполнению таймера (Рис. 4).



ис. 4. Блок-схема взаимодействия основной программы с таймером и подпрограммой обработки прерываний, происходящих при переполнении таймера

Управляющая программа составлена так, что в течение каждого положительного полупериода напряжения $U_{вх}$, подаваемого на вход АЦП $A1$, осуществляется цикл измерений, т.е. накопление суммы квадратов кодов мгновенных значений измеряемого напряжения (5) и подсчет количества циклов измерений, а в течение каждого отрицательного – осуществляется обработка результатов этих измерений (5 и 6), их анализ и коррекция текущего значения кода задержки включения оптодиодов.

В начале работы программы выполняются начальные установки адреса стека, номера банка памяти данных, подготовка прерывания от таймера T/CO , который входит в состав микроЭВМ $D1$. Затем программа анализирует состояние выхода компаратора $DA1$ (554СА3). Если на выходе компаратора логическая "1", то на входе АЦП $A1$ действует отрицательная полуволна напряжения $U_{вх}$ (Рис. 5,а,б). После подготовки в этом полупериоде цикла измерений, ожидается начало положительного полупериода.

4. Работа САУ в положительном полупериоде

1) В начале положительного полупериода производится загрузка таймера T/CO кодом задержки включения оптодиодов и пуск таймера. Код задержки включения оптодиодов устанавливается программно в заданном диапазоне от $38_{16} = 56_{10}$ до $EC_{16} = 236_{10}$, причем с увеличением кода сама задержка, т.е. угол открытия оптодиодов, уменьшается, т.к. сигнал (импульс) включения оптодиодов передается по переполнению таймера. Диапазон задержек включения составляет от 1 мс до 9 мс от начала полупериода изменения напряжения $U_{вх}$ на входе АЦП $A1$. Таймер, после своего включения, работает в режиме "0", согласно которому через каждые 48 мкс (при частоте кварцевого резонатора 8 МГц) к его содержимому добавляется 1. Таким образом, всему диапазону задержек соответствует примерно 180 единиц;

2) после запуска таймера согласно управляющей программе начинается накопление суммы квадратов двоичных кодов мгновенных значений измеряемого напряжения (5);

3) по истечении заданного в таймере времени задержки, происходит первое прерывание работы управляющей программы в положительном полупериоде и переход к подпрограмме обработки прерывания от таймера, которая вначале анализирует признак режима своей работы;

4) в режиме "0" работы подпрограммы обработки прерываний устанавливается в "0" выход "TXD – выход передатчика" микроЭВМ D1 (Рис. 5,з), что соответствует началу импульса тока через светодиод оптодиристора, т.е. включению последнего. В таймер загружается код длительности импульса запуска (~ 200 мкс), устанавливается в "1" признак режима работы подпрограммы и пускается таймер;

5) происходит возврат в основную программу (первое прерывание ее работы закончено), где продолжается накопление суммы квадратов двоичных кодов мгновенных значений измеряемого напряжения (5), (Рис. 5,в);

6) по истечении ~ 200 мкс, т.е. после переполнения таймера, происходит второе прерывание работы основной программы в течение положительного полупериода и передача управления подпрограмме обработки прерывания от таймера;

7) подпрограмма обработки прерываний останавливает таймер и анализирует бит режима, который установлен в "1". Находясь в режиме "1" подпрограмма устанавливает в "1" выход "TXD – выход передатчика" микроЭВМ D1 (Рис. 5,з), что приводит к окончанию импульса тока через светодиод оптодиристора. После установки бита режима работы подпрограммы в "0" осуществляется возврат в основную программу (завершено второе прерывание ее работы);

8) согласно работе основной программы продолжается накопление суммы квадратов двоичных кодов мгновенных значений измеряемого напряжения (5), и подсчет количества циклов, т.е. количества выборок мгновенных значений измеряемого напряжения в течение его положительного полупериода.

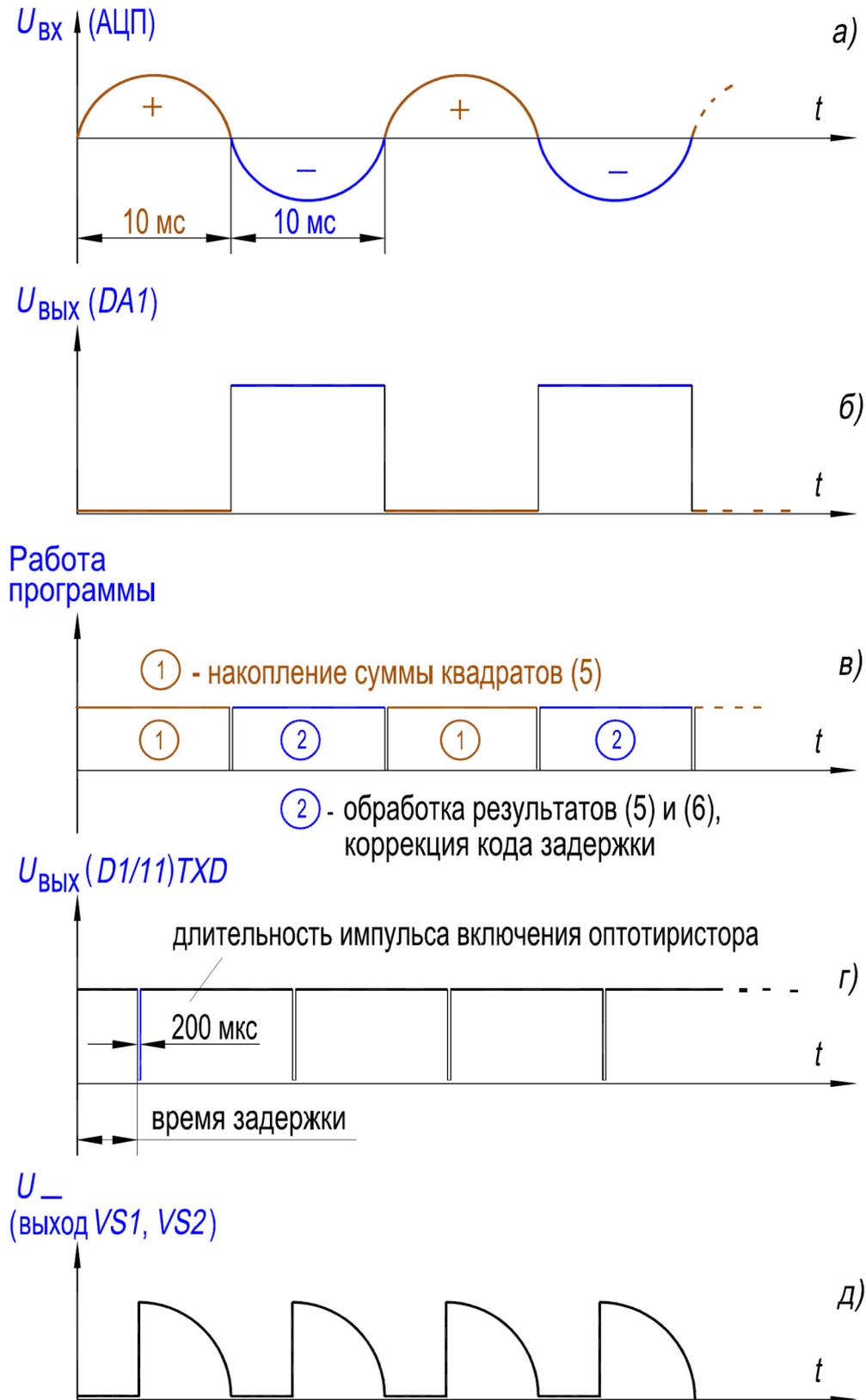


Рис. 5. Временная диаграмма работы САУ

5. Работа САУ в отрицательном полупериоде

1) В начале отрицательного полупериода также производится загрузка таймера T/CO кодом задержки включения оптотиристора и пуск таймера. Работа таймера и подпрограммы обработки прерываний от таймера происходит также, как и в положительный полупериод;

2) при работе основной программы в отрицательный полупериод изменения напряжения $U_{вх}$, подаваемого на вход АЦП $A1$, осуществляется, кроме обработки прерываний от таймера, следующее:

а) вычисляется двоичный код, соответствующий напряжению $U_{ср}$ (5);

б) вычисляется двоичный код, соответствующий напряжению U_d (6), который отображается на светодиодах $VD1, VD2, \dots, VD8$, расположенных на лицевой панели блока управления (Рис. 2 и Рис. 3,б)

в) вычисляется квадрат двоичного кода уставки, т.е. эталонного напряжения $U_э$;

г) на основе сравнения кодов соответствующих $U_{ср}$ и $U_э^2$ формируется управляющее воздействие, т.е. корректируется (декрементируется или инкрементируется) код задержки включения оптотиристоров.

Если $U_{ср} > U_э^2$, то для восстановления равенства между ними, необходимо увеличить ток подмагничивания, поэтому программно увеличивается значение текущего кода задержки включения оптотиристора на 1, а сама задержка, т.е. угол открытия оптотиристоров, при этом уменьшается.

Если $U_{ср} < U_э^2$, то для восстановления равенства между ними, необходимо уменьшить ток подмагничивания, поэтому программно уменьшается значение текущего кода задержки включения оптотиристора на 1, а сама задержка, т.е. угол открытия оптотиристоров, при этом увеличивается.

Если $U_{ср} \sim U_э^2$, то значение кода задержки и самой задержки колеблются возле некоторого среднего значения, обеспечивая выполнение равенства с точностью до единицы младшего разряда. При выполнении равенства $U_{ср} \sim U_э^2$ на светодиодах $VD1, VD2, \dots, VD8$ высвечивается двоичный код среднего квадратичного напряжения распределительной электросети U (6), который соответствует коду $U_э$, зафиксированному переключателями $S1, S2, \dots, S8$ (Рис. 2 и 3,б);

д) после каждой коррекции кода задержки его значение сравнивается с максимальным EC_{16} и минимальным 38_{16} значениями и при выходе кода задержки за эти пределы, ему присваивается

соответственно максимальное или минимальное значение, а коду, высвечиваемому на светодиодах, – значение FF_{16} или 01_{16} . Коды FF_{16} или 01_{16} индицируются на светодиодах $VD1$, $VD2$, ..., $VD8$ для указания на то, что система управления вышла из режима (зоны) стабилизации. На Рис. 5 приведена временная диаграмма работы САУ, а на Рис. 6 – характеристика стабилизации.

В диапазоне $U_{вх.мин} \leq U_{вх} \leq U_{вх.маж}$ имеет место стабилизация, т.е. САУ поддерживает равенство $U_{р.с} = U_{ст}$, т.к. в этой зоне, в соответствии с ВАХ реактора, изменение напряжения $U_{вх}$ на входе АЦП А1 полностью компенсируется соответствующим током подмагничивания $I_{\underline{}}$, протекающим по обмотке управления реактора. Этот ток регулируется системой за счет коррекции кода задержки включения оптотиристоров.

Процесс стабилизации возможен в допустимом "окне" задержек включения оптотиристоров, составляющем 1...9 мс.

Для того чтобы войти в зону стабилизации необходимо, например, изменить с помощью делителя $R14$ напряжение на входе АЦП А1 или же изменить код уставки с помощью переключателей $S1$, $S2$, ..., $S8$. При этом импульс запуска оптотиристоров перемещается в разрешенный диапазон задержек. Примерно через 1...2 секунды система входит в режим стабилизации, о чем свидетельствует высвечивание на индикаторах кода, равного коду уставки.

Максимально возможный код уставки определяется из выражения $[255/(2)^{1/2}] \cdot 0,9 \sim 160_{10} = 1010000_2$, где 0,9 – коэффициент запаса. При большем коде уставки амплитуда стабилизируемого напряжения на входе АЦП А1 становится больше напряжения насыщения АЦП, что приводит к большой погрешности.

6. Результаты экспериментальных исследований

Блок управления и силовой блок САУ изготовлены в соответствии с принципиальными электрическими схемами на Рис. 7, а, б.

Опытный образец совмещенного управляемого реактора изготовлен согласно электромагнитной схеме Рис. 8 [Zabudsky, 1994].

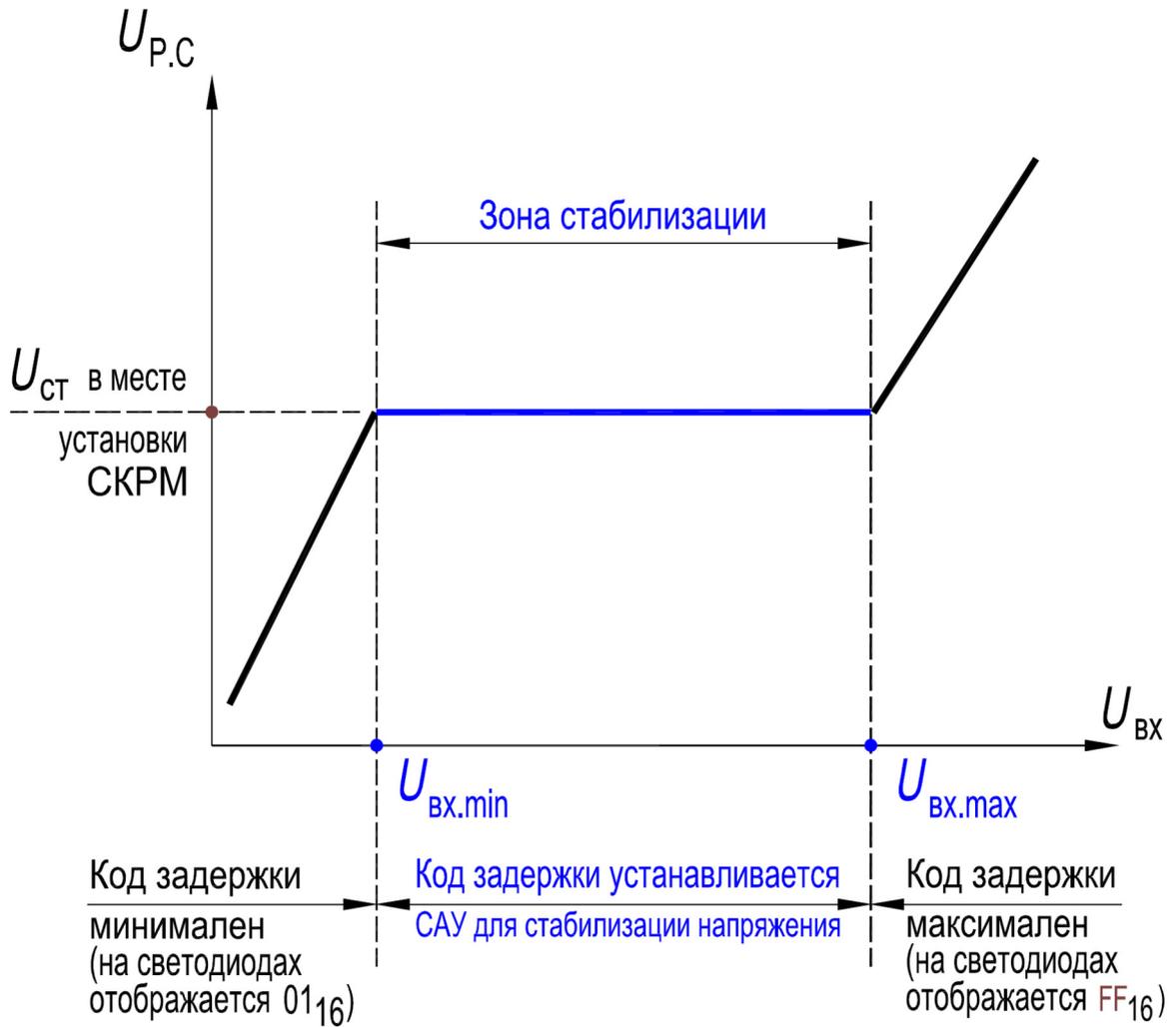


Рис. 6. Характеристика стабилизации САУ

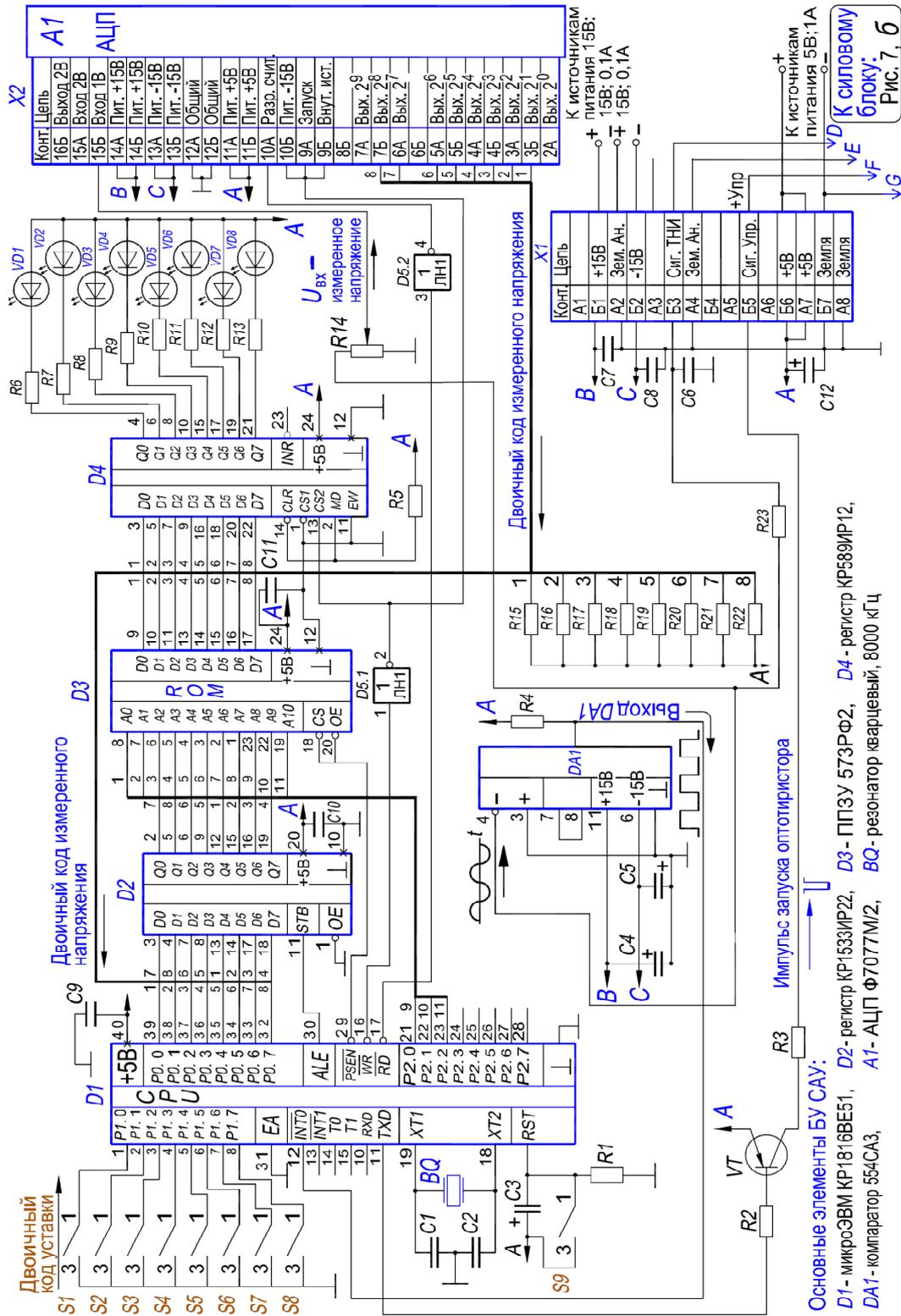


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема САУ: блок управления – (а); силовой блок – (б)

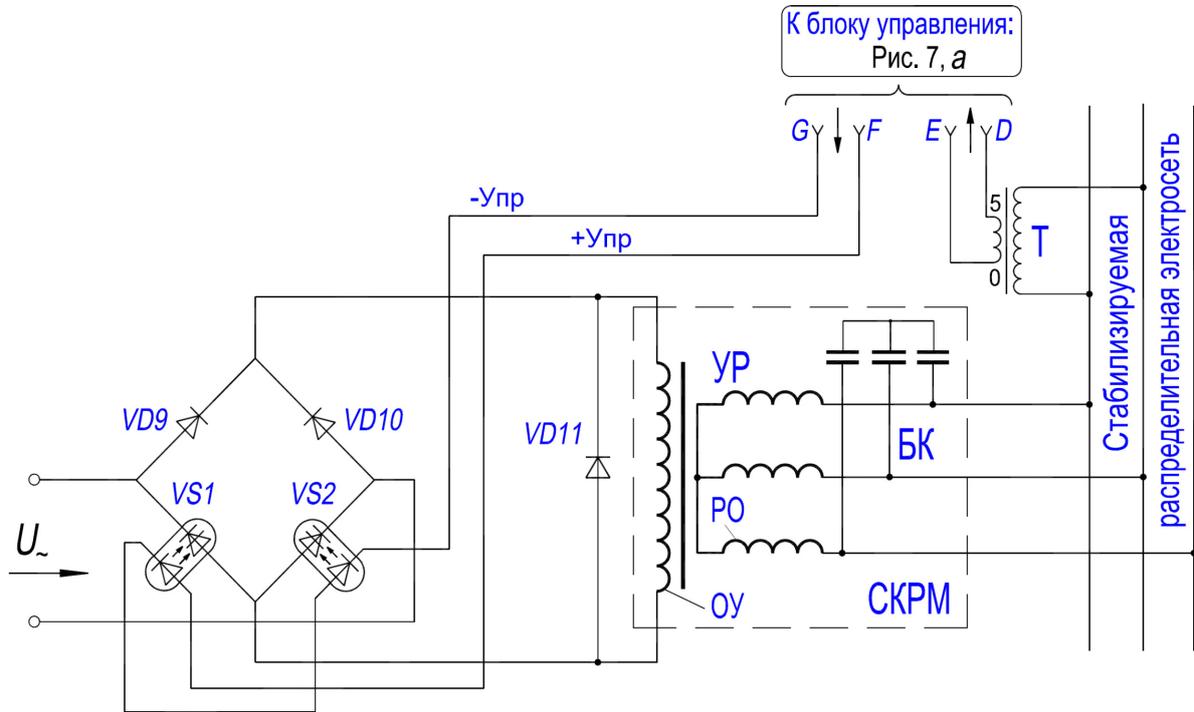


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема САУ: блок управления – (а); силовой блок – (б)

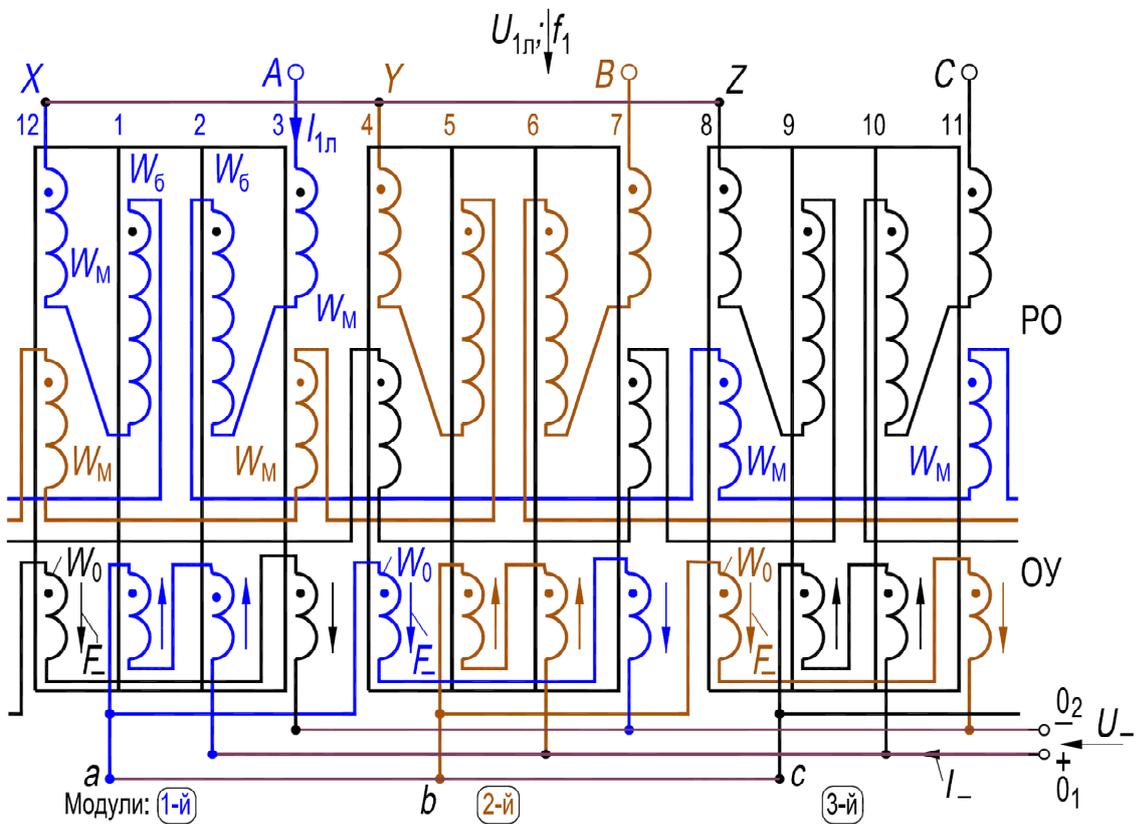


Рис. 8. Электромагнитная схема совмещенного УР

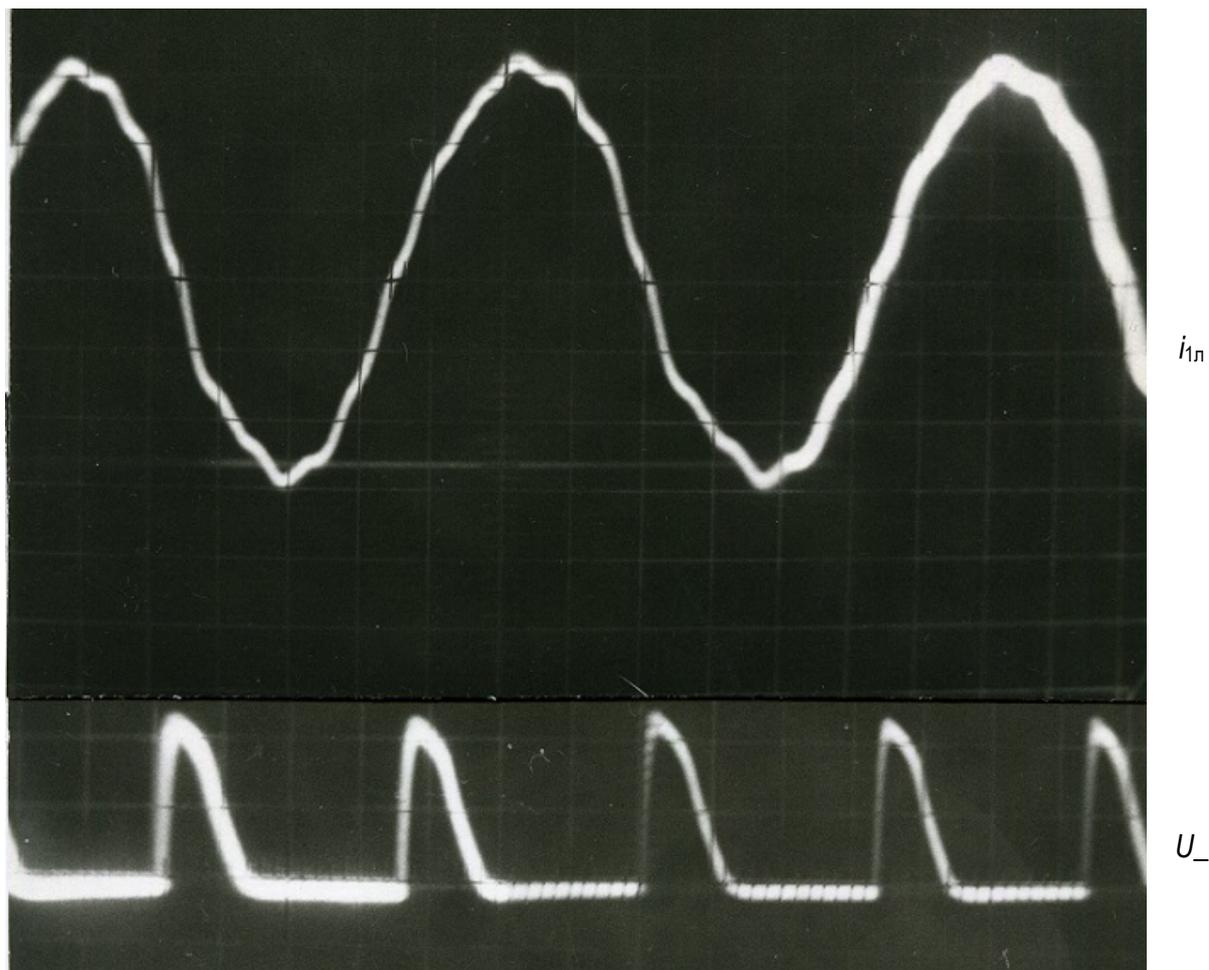
Активная часть реактора состоит из трех одинаковых модулей и характеризуется следующими основными данными: количество планарных магнитнонесвязанных сердечников – 3; количество стержней в одном сердечнике – 4; длина стержня – $10 \cdot 10^{-2}$ м; поперечное сечение стержня – $10 \cdot 10^{-4}$ м²; материал магнитопровода – сталь 3413, $0,35 \cdot 10^{-3}$ м; сочленение стержней и ярм – шихтованное внахлест; число витков в катушках трехфазной рабочей обмотки – $W_6 = 142$, $W_m = 82$; число витков в катушке обмотки управления – $W_0 = 197$; число эффективных витков в катушках обмоток – 2; диаметр провода – $1,32 \cdot 10^{-6}$ м².

Испытания проводились при отсутствии и наличии перемычки, соединяющей зажимы a, b, c обмотки управления ОУ (Рис. 8). При разомкнутых зажимах a, b, c обмотка содержит три параллельные ветви, а при замкнутых зажимах – шесть ветвей. Кроме того, в процессе исследования катушки обмотки соединялись встречно-последовательно, при этом в ОУ отсутствуют параллельные ветви. При разомкнутых зажимах a, b, c реализуется режим свободного намагничивания по 4 и 8-й гармоникам магнитного поля (СН_4_8), а при замкнутых – режим намагничивания по 2, 4, 8 и 10-й гармоникам магнитного поля (СН_2_4_8_10). При встречно-последовательном соединении катушек ОУ реализуется режим вынужденного намагничивания (ВН) по всем высшим гармоникам поля [Zabudsky, 2016].

Испытания проводились при отсутствии и наличии перемычки, соединяющей зажимы a, b, c обмотки управления ОУ (Рис. 8). При разомкнутых зажимах a, b, c обмотка содержит три параллельные ветви, а при замкнутых зажимах – шесть ветвей. Кроме того, в процессе исследования катушки обмотки соединялись встречно-последовательно, при этом в ОУ отсутствуют параллельные ветви. При разомкнутых зажимах a, b, c реализуется режим свободного намагничивания по 4 и 8-й гармоникам магнитного поля (СН_4_8), а при замкнутых – режим намагничивания по 2, 4, 8 и 10-й гармоникам магнитного поля (СН_2_4_8_10). При встречно-последовательном соединении катушек ОУ реализуется режим вынужденного намагничивания (ВН) по всем высшим гармоникам поля [Zabudsky, 2016].

На Рис. 9 представлены ВАХ реактора $U_{1л} = f(I_{1л}, I_-)$ для режимов ВН, СН_4_8 и СН_2_4_8_10. Как следует из экспериментальных зависимостей при $U_{1л} = 380$ В и токе подмагничивания $I_- = 6$ А диапазон регулирования реактора в режиме СН_2_4_8_10 ~ на 35 % больше, чем в режиме ВН и ~ на 21 % больше, чем в режиме СН_4_8. Режим СН_2_4_8_10 выгодно отличается не только увеличенным диапазоном регулирования тока $I_{1л}$, но и улучшенной формой кривой его, а также сниженными магнитными потерями.

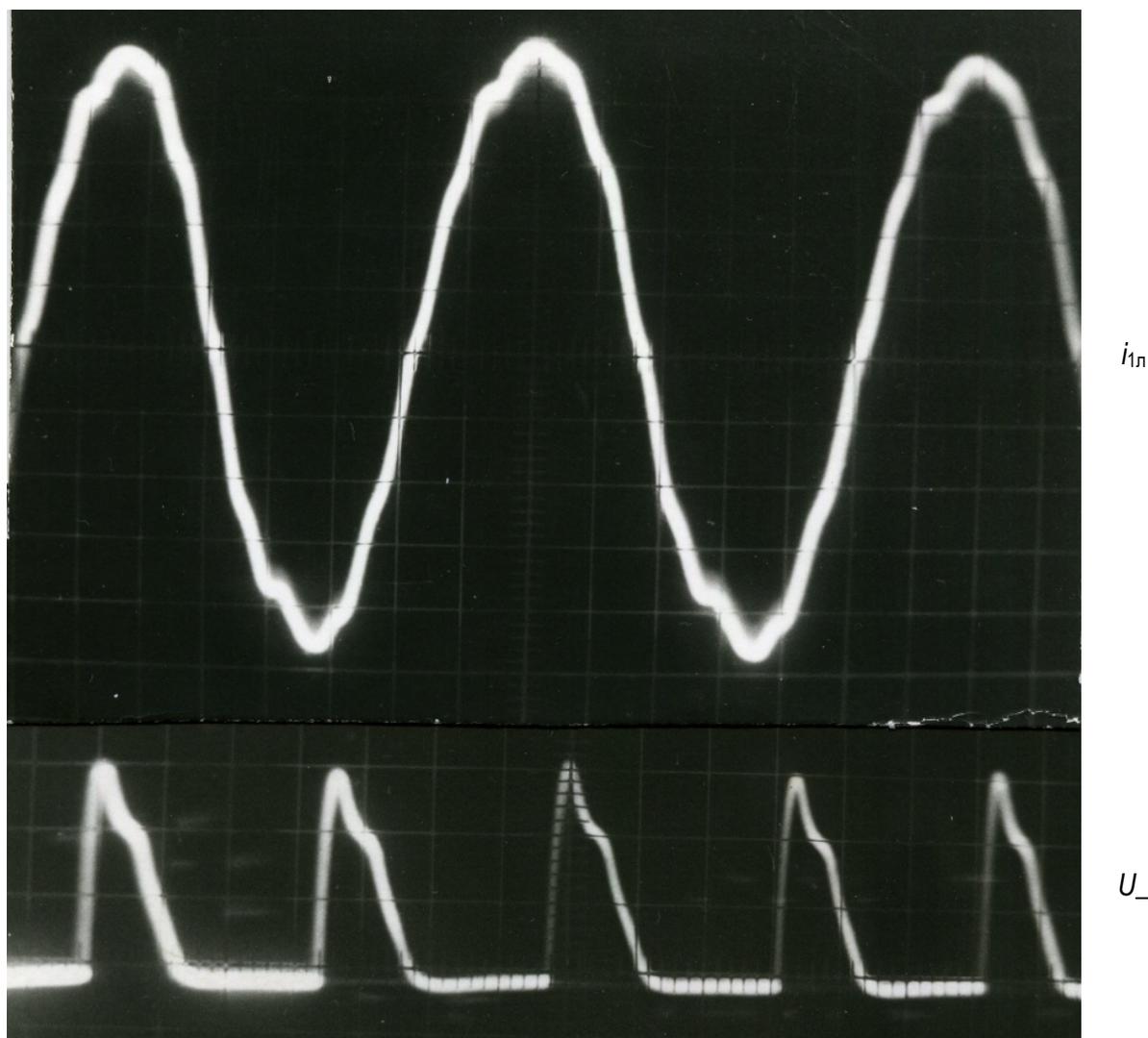
На Рис. 10,а показаны осциллограммы тока $I_{1л}$, протекающего в рабочей обмотке РО реактора, и, выпрямленного напряжения U_{-} , подаваемого на обмотку управления ОУ при значении стабилизируемого напряжения $U_{1л} = 220$ В. При этом ток в РО составлял 4 А, ток подмагничивания в ОУ – 8,3 А, а угол открытия оптотиристоров – $\sim 120^\circ$.



а)

Рис. 10 (а). Осциллограммы тока $i_{1л}$, протекающего в РО, и выпрямленного напряжения U_{-} , питающего ОУ реактора, соответствующие углу открытия оптотиристоров 120°

На Рис. 10,б показаны осциллограммы этих же величин, но при токе в РО 5,9 А, токе подмагничивания 12,2 А и при неизменном значении (220 В) стабилизируемого напряжения, но при меньшем значении угла открытия оптотиристоров – $\sim 111^\circ$. Испытания показали устойчивость стабилизации напряжения.



б)

Рис. 10. Осциллограммы тока $i_{л}$, протекающего в РО, и выпрямленного напряжения U_{-} , питающего ОУ реактора, соответствующие углу открытия оптотиристоров: 111°

Выводы

Разработана микропроцессорная САУ, которая совместно со статическим компенсатором реактивной мощности предназначена для поддержания напряжения в электроэнергетической системе в месте его установки на заданном уровне. Одновременно со стабилизацией напряжения снижаются потери мощности в электроэнергетической системе, и улучшается режим работы электропотребителей.

Эффективность программно-аппаратного комплекса определяется устойчивостью стабилизации напряжения в точке установки СКРМ, быстротой отзывчивости его, универсальностью САУ и др.

САУ может быть использована при соответствующей коррекции для управления режимами дальних высоковольтных ЛЭП с реализацией регулирования по отклонению от передаваемой мощности, а также для автоматического управления другими объектами электроэнергетики и электромеханики.

Библиография

- [Zabudsky, 2003] Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы. – Москва: Энергоатомиздат, 2003. – 436 с.
- [Stashin, 1990] Сташин В.В., Урусов А.В., Мологонцева О.Ф. Проектирование цифровых устройств на однокристальных микроконтроллерах. М: Энергоатомиздат. 1990. – 236 с.
- [Aleksandrov, 1993] Александров Г.Н. Система передач из бассейна Амазонки в промышленно развитые районы Бразилии // Изв. РАН. Энергетика и транспорт. 1993. №5 С.63–72.
- [Zabudsky, 1994] Забудский Е.И., Амброзевич А.С. Микропроцессорная система управления совмещенным реактором-трансформатором. Тезисы докладов научно-техн. конференции "Создание комплексов электротехнического оборудования, высоковольтной, преобразовательной, сильноточной и полупроводниковой техники". Москва, ВЭИ, 1994. С.284--287.
- [Zabudsky, 1994] Three-phase mathed reactors transformers for electric power engineering // 9th International Power System Conference // Proceedings, volum 2, St. Petersburg, 4–7 July 1994. p.618–629.
- [Zabudsky, 2016] Забудский Е.И. Режимы намагничивания управляемых электромагнитных реакторов // Proceedings of the XVIth International Conference «Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components». ICEEE-2016 Abstracts. – Moscow: «Знак». 19-24 September 2016. С.171–172.

Приложение

Структурные диаграммы ассемблер-программ.

Рис. П1, лист 1. Структурная диаграмма основной программы

Рис. П1, лист 2. Структурная диаграмма основной программы

Рис. П.1, лист 3. Структурная диаграмма основной программы

Рис. П2. Структурная диаграмма подпрограммы обработки прерываний, инициируемых при переполнении таймера

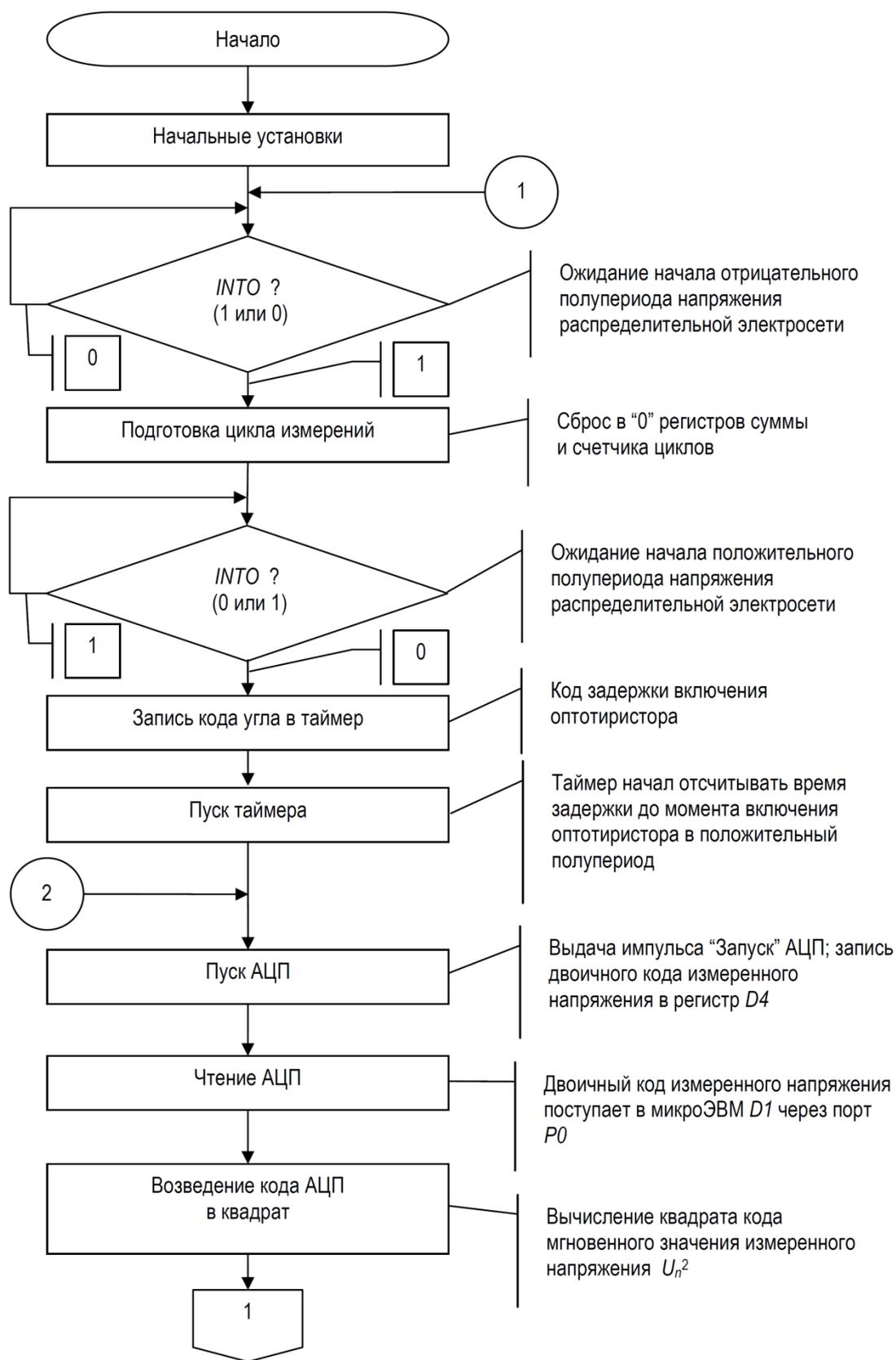


Рис. П1, лист 1. Структурная диаграмма основной программы

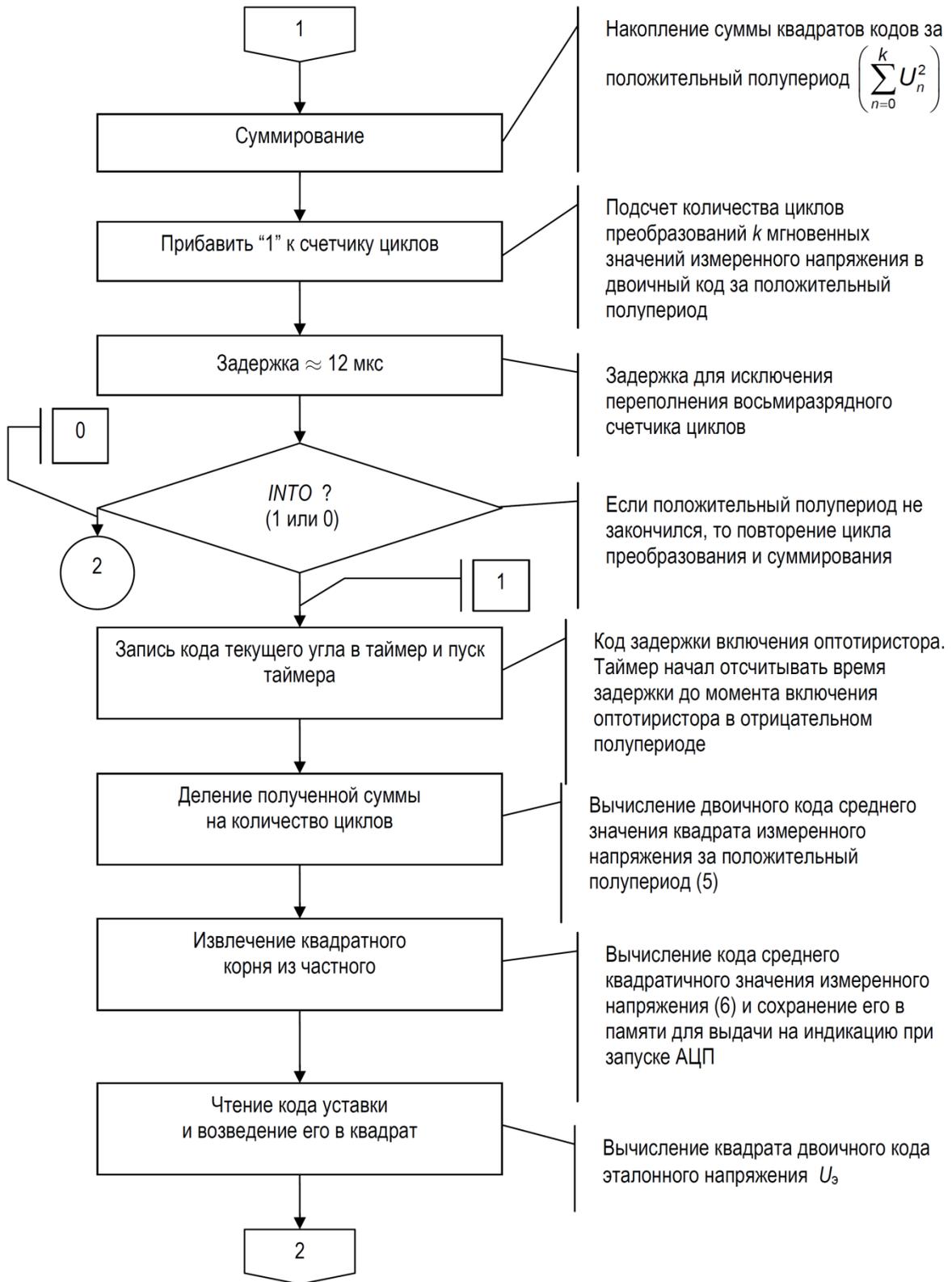


Рис. П1, лист 2. Структурная диаграмма основной программы

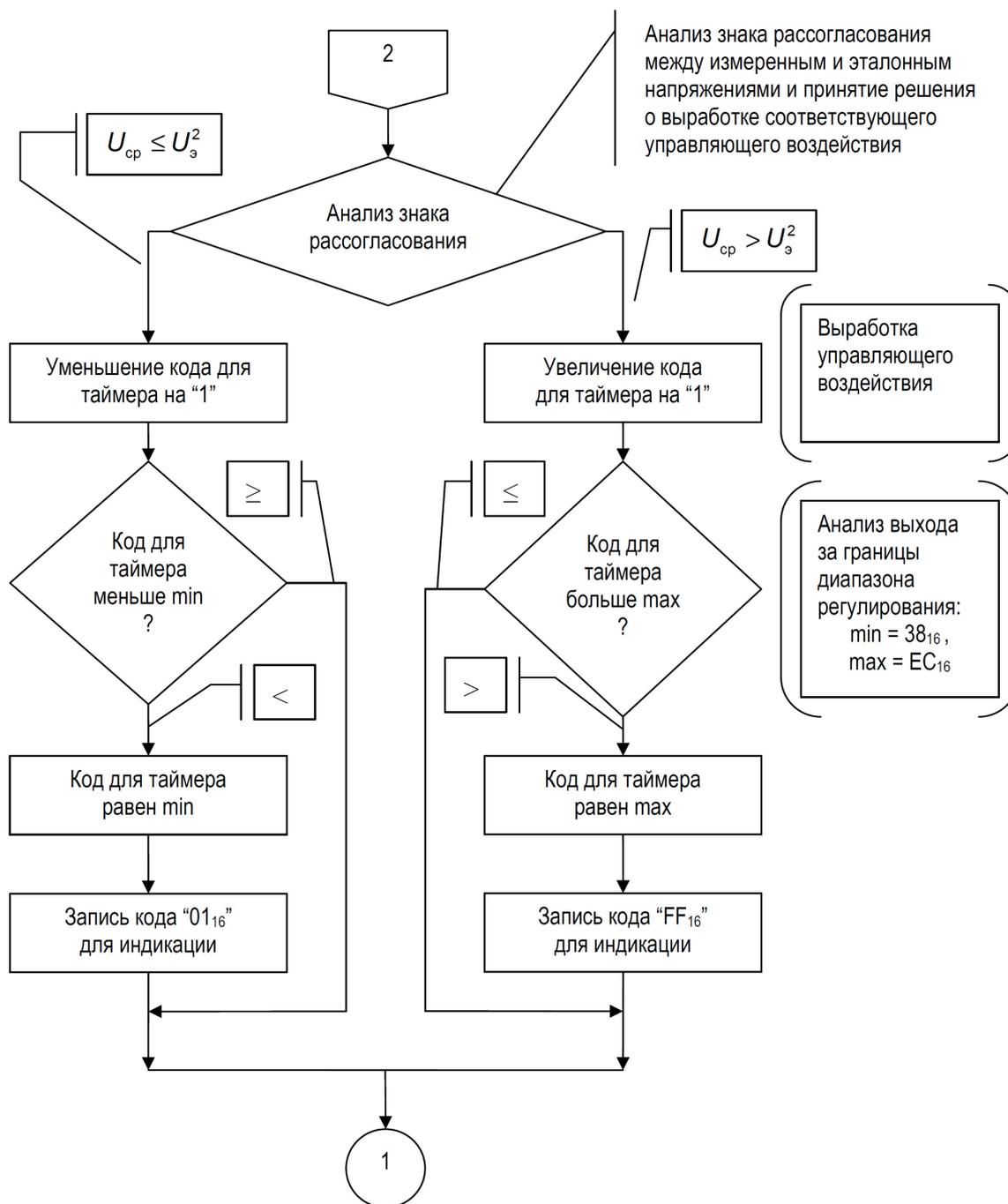


Рис. П.1, лист 3. Структурная диаграмма основной программы

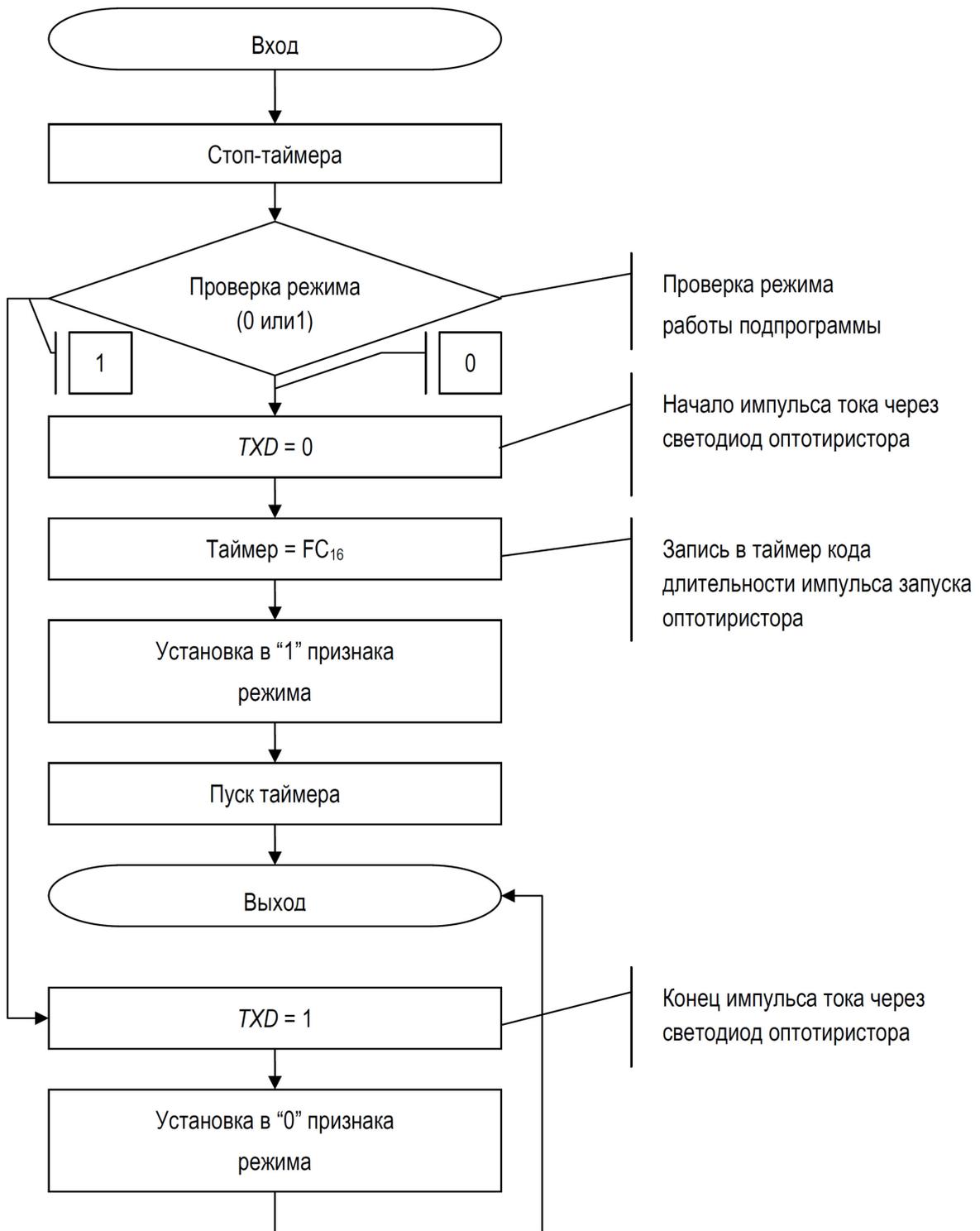


Рис. П2. Структурная диаграмма подпрограммы обработки прерываний, инициируемых при переполнении таймера

Информация об авторе



Евгений Забудский – профессор, доктор техн. наук; Российский университет дружбы народов, департамент Механики и мехатроники Инженерной академии; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; e-mail: zabudskiy_ei@pfur.ru

Направление научной работы: Регулируемые электромагнитные устройства для управления режимами электроэнергетических систем; компьютерные и информационные технологии в образовании; web-сайт <http://zabudsky.ru>

Voltage Regulation of Distributed System Based on Single-Chip Microcomputer

Evgeny Zabudsky

Abstract: Significant growth of power plants unit capacity, large extent of power grids, presence of weak interconnections and uneven load schedule increase are the development features of power industry, that necessitate an improvement of energy facilities automatic control systems (ACS). Operating experience of electric power facilities microprocessor automatic control systems showed their advantages in comparison with the devices made from discrete components, for both service functions and reliability. A microprocessor control system in a combination with a static VAR compensator has been designed to regulate and stabilize voltage in an electric power system at a predetermined level. The ACS usage also leads to a reduce of power losses in the stabilized electric power system and an improvement in electrical load operations.

Keywords: single-chip microcomputer, automatic control system, controlled reactor, distribution electric network