

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет
информационных технологий
и электроники
(наименование)

Кафедра
«Нано- и микроэлектроника»
(наименование)

Направление подготовки

11.04.04. «Электроника и
наноэлектроника»
(код и наименование)

Магистерская программа

Нано- и микроэлектроника
(наименование)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему

Комплекс автоматизированного управления процессом
напыления при создании элементов микроэлектроники

Студент

23ПДм1
номер группы

21.05.25
подпись, дата

Кежаев Данила Сергеевич
ФИО полностью

Научный руководитель

К.Т.Н., доцент, ПГУ
должность, наименование организации

21.05.25
подпись, дата

Ю.В. Аношкин
инициалы, фамилия

Рецензент

Директор-главный
конструктор ООО НПК «Крона»
должность, наименование организации

22.05.2025
подпись, дата

В.А. Ханбеков
инициалы, фамилия

Нормоконтролер ст. преподаватель
должность

10.06.25
подпись, дата

Т.Н. Рыжова
инициалы, фамилия

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 9.06.25 № 10)

Заведующий кафедрой НиМЭ

профессор, ПГУ
должность, наименование организации

18.06.25
подпись, дата

И.А. Пронин
инициалы, фамилия

Работа защищена с оценкой удовл. (протокол ГЭК от 18.06.25 № 8)

Секретарь ГЭК

доцент, ПГУ
должность, наименование организации

18.06.25
подпись, дата

А.А. Вольсков
инициалы, фамилия

2025

год выпуска

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация: «Комплекс автоматизированного управления процессом напыления при создании элементов микроэлектроники»

Цель работы: разработка схемы и моделирование работы автоматическим управлением вакуумного напыления на основе установки УВН-71П-3.

Количество листов пояснительной записки 115, рисунков 24, таблиц 6, слайдов презентации 16, используемых источников 9, приложений 4.

Ключевые слова: вакуум, материалы электронной техники, установка, автоматическая система, схемы, моделирование, измерения, микропроцессор, температура, напыление, программа.

Были изучены существующие технологии, что позволило собрать необходимые исходные данные для управления технологическим процессом. Были созданы проекты схемы, который учитывают все ключевые аспекты работы вакуумной системы, включая обеспечение высокого вакуума и контроль технологических параметров. Проведено моделирование, которое позволило не только визуализировать процесс, но и определить слабые моменты, которые влияют на эффективность работы системы.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Методы получения элементов микроэлектроники.....	6
1.1 Методы получения резистивных структур.....	6
1.2 Термические методы напыления пленок в вакууме	7
1.3 Напыление материалов электроники в вакууме	10
1.4 Импульсное формирование пленочных элементов микроэлектроники.....	14
1.5 Метод ионного напыления пленок.....	17
2 Проектирование автоматизированной системы создания и управления вакуумом	20
2.1 Подготовка исходных данных для проектирования автоматизированной системой откачки установки УВН-71П-3	20
2.2 Разработка и проектирование схемы управления процессом создания вакуума на установке УВН-71П-3.....	22
2.3 Вывод логических выражений.....	28
2.4 Разработка автоматизированной схемы управления создания вакуума на основе автомата Миля.....	34
2.5 Моделирование работы автоматизированной системы создания вакуума.....	36
2.6 Разработка измерительного блока технологических параметров при создании вакуума	38
3 Проектирование автоматической системы процесса напыления пленок	42
3.1 Микропроцессорное управление установками для напыления пленок	42
3.2 Микроконтроллеры серии 8051	46

3.3 Пирометры промышленного назначения	53
3.4 Моделирование работы пирометров	57
3.5 Разработка и моделирование схемы измерения параметров температуры.....	59
3.6 Разработка автоматической системы напыления пленочных элементов электроники.....	64
3.7 Моделирование работы автоматической системы напыления.....	67
4 Безопасная эксплуатация установок термического вакуумного напыления	74
4.1 Начало работы вакуумной установки	74
4.2 Завершение работы вакуумной установки	76
4.3 Загрузка и выгрузка партии образцов	76
Заключение	77
Список использованных источников	78
Приложение А Задание на выпускную квалификационную работу магистра	79
Приложение Б Листинг программ микроконтроллеров 5081.....	83
Приложение В Заявление и протокол проверки магистерской диссертации на оригинальность	95
Приложение Г Презентация	99

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие электронной промышленности, а также применяемое оборудование для создания компонентов микроэлектроники требует высокотехнологических решений необходимых, для быстрого и надежного формирования готовых изделий. Одним из возможных быстро развивающихся направлений в микроэлектронике является формирования тонких пленок из различных электротехнических материалов. Такие изделия получили широкое применение в авиации, космонавтике и оборонно-промышленном комплексе.

Для надежной работы изделий микроэлектроники и обеспечения заданных параметров необходимо обеспечивать чистую и безгазовую среду, автоматизировать процессы напыления материала и их успешное формирование. При этом необходимо обеспечить достаточную точность и выход годных изделий. Поэтому обеспечения высокого вакуума, контроль технологических параметров напыления электротехнического материала всегда являлось актуальным аспектом для качества формирования изделий микроэлектроники.

Цель работы: разработать схему и выполнить моделирование работы автоматическим управлением вакуумного напыления на основе установки УВН-71П-3.

Задачи:

- рассмотреть имеющиеся методы формирования элементов микроэлектроники и подготовить исходные данные для управления технологическим процессом при формировании элементов микроэлектроники;
- разработать схему и выполнить моделирование работы управления вакуумной системы;
- разработать схему и выполнить моделирование работы автоматической системы напыления.

1 Методы получения элементов микроэлектроники

1.1 Методы получения резистивных структур

Классификация вакуумных методов получения резистивных структур:

1) осаждение из молекулярного потока вещества:

а) методы термовакuumного осаждения:

1) резистивный нагрев:

1.1) прямой;

1.2) косвенный;

2) индуктивный нагрев:

2.1) нагрев пушкой;

2.2) нагрев 3-х электронной пушкой;

3) электронно-лучевой нагрев;

4) лазерный нагрев;

5) метод «вспышки»;

б) методы ионного распыления:

1) плазменные методы:

1.1) катодное распыление;

1.2) ВЧ – распыление;

1.3) магнетронное распыление;

1.4) катодное распыление со смещением;

2) ионно-плазменное распыление;

3) ионно-лучевое распылен.

2) осаждение из ионного потока вещества:

а) импульсные методы осаждения в вакууме:

1) электрический взрыв;

2) импульсно электронно-лучевой нагрев;

3) импульсно-лазерный нагрев;

б) ионное осаждение из непрерывных потоков вещества:

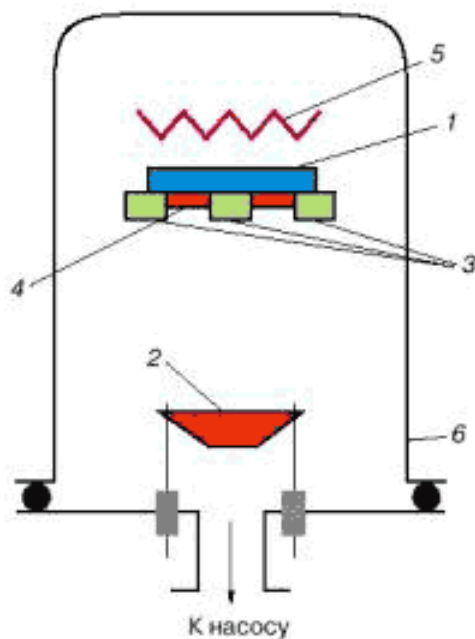
1) термоионное осаждение:

- 1.1) плазменные методы;
- 1.2) ионно-кластерное осаждение;
- 1.3) автоэмиссионный метод;
- 2) вакуумно-дуговое осаждение;
- 3) ионно-лучевое осаждение.

Рассмотрим некоторые методы получения резистивных пленок подробнее.

1.2 Термические методы напыления пленок в вакууме

Рассматриваемый метод основан на физическом процессе термического испарения металлических веществ или их сплавов в условиях глубокого вакуума с последующей конденсацией атомарных паров на предварительно подготовленную подложку. Качество получаемых тонкопленочных покрытий и их механические характеристики в определяющей степени зависят от степени чистоты и обработки поверхности подложки, которая перед началом технологического процесса подвергается тщательной механической полировке и многоступенчатой очистке от любых видов загрязнений. Для существенного улучшения адгезионных свойств формируемого покрытия и минимизации внутренних структурных напряжений в процессе осаждения применяется контролируемый нагрев подложки в широком температурном диапазоне от 100 до 3000 °С при помощи специальных нагревательных элементов различной конструкции. В качестве подложек могут использоваться разнообразные материалы с соответствующими физико-химическими свойствами, включая оптическое стекло, кварцевые пластины, слюдяные подложки, различные немагнитные металлы и сплавы, а в отдельных специальных случаях - монокристаллические сколы хлорида натрия (NaCl), обладающие уникальными поверхностными характеристиками. Простейшая схема установки для получения тонких пленок методом термического испарения металлов и сплавов в вакууме показана на рисунке 1.1.



- 1 – подложка; 2 – лодочка с испаряемым сплавом; 3 – маска;
4 – пленка; 5 – нагреватель; 6 – корпус вакуумной камеры

Рисунок 1.1 – Схема испарительной части вакуумной установки для получения пленок

Исходный напыляемый материал помещается в специальный испарительный элемент, который в большинстве случаев представляет собой лодочку из тугоплавкого металла (чаще всего вольфрама), где под действием пропускаемого электрического тока высокой плотности достигается температура, достаточная для плавления и последующего испарения материала. Образующиеся в процессе интенсивного нагрева металлические пары формируют направленный атомарный или молекулярный поток, который осаждается на расположенной напротив поверхности подложки, постепенно формируя тонкую пленку с заданными свойствами. Применение специальных формирующих масок с отверстиями различной геометрии (например, круглой, квадратной или сложной формы) позволяет создавать на подложке локальные участки напыления с точно контролируемыми размерами и конфигурацией, что существенно расширяет технологические возможности метода.

Весь процесс напыления осуществляется в специальной вакуумной камере, где создается и поддерживается высокий вакуум на уровне 10^{-5} мм. рт. ст., что является необходимым условием для обеспечения прямолинейного движения испаренных частиц без их столкновения с молекулами остаточных газов. Такие условия позволяют обеспечить эффективный перенос подавляющего большинства атомов испаряемого вещества от источника к подложке и их последующий фазовый переход из газообразного состояния в конденсированное с минимальными потерями и отклонениями.

Толщина формируемых пленочных покрытий является важнейшим технологическим параметром и может регулироваться в широких пределах за счет изменения скорости процесса конденсации и его продолжительности. На процесс формирования пленки и ее конечные свойства существенное влияние оказывает температура подложки, которая может варьироваться в чрезвычайно широком диапазоне от 200 до 5000 °С в зависимости от требуемых характеристик покрытия. Изменение температурного режима приводит к реализации различных механизмов конденсации, что в свою очередь определяет микроструктурные особенности, механические и магнитные свойства получаемых пленок, включая такие важные параметры как магнитная проницаемость, коэрцитивная сила и поведение в различных по величине внешних магнитных полях.

Современные исследования с использованием электронной микроскопии высокого разрешения позволили детально изучить и описать сложный многостадийный механизм формирования пленочных покрытий. Установлено, что процесс конденсации начинается с образования на поверхности подложки отдельных нанок капель жидкой фазы, которые в процессе дальнейшего осаждения претерпевают фазовый переход, кристаллизуясь в виде изолированных зародышей преимущественно сферической формы. По мере продолжения процесса напыления происходит постепенный рост этих зародышей, их последующее слияние и окончательное формирование сплошного однородного покрытия с заданными структурными и функциональными характе-

ристиками. Данная технология благодаря своей универсальности и широким возможностям управления параметрами процесса находит разнообразное применение в производстве тонкопленочных структур для электроники, оптики, приборостроения и других высокотехнологичных отраслей промышленности [1].

1.3 Напыление материалов электроники в вакууме

Все вещества в зависимости от температуры нагрева могут находиться в одном из трех фазовых (агрегатных) состояний: твердом, жидком или газообразном (парообразном). Испарение, т. е. переход вещества в парообразное состояние, происходит, когда с повышением температуры средняя колебательная энергия его частиц возрастает настолько, что становится выше энергии связи с другими частицами, и они покидают поверхность (испаряются) и распространяются в свободном пространстве.

Условной, практически установленной температурой испарения считается температура, при которой давление насыщенного пара вещества составляет приблизительно 1,3 Па.

Температуры плавления и испарения наиболее важных элементов приведены в таблицы 1.1. Из этой таблицы видно, что условная температура испарения большинства элементов выше их температуры плавления, т. е. испарение, происходит из жидкого состояния. Некоторые вещества имеют условную температуру испарения ниже температуры плавления, т. е. они достаточно интенсивно испаряются из твердого состояния. Процесс перехода вещества из твердого состояния в парообразное, минуя жидкую фазу, называют сублимацией (или возгонкой). Скорость испарения, т. е. количество вещества (в граммах), покидающее 1 см² свободной поверхности в 1 с при условной температуре T_y рассчитывают по формуле

$$v_n = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{M/T_y}, \quad (1.1)$$

где M – молекулярная масса, г/моль.

По этой формуле можно определить, например, какова скорость испарения алюминия, имеющего $M = 27$ и $T = 1423$ °C:

$$v_{\text{н}} = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{27/1423} \approx 9 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \right), \quad (1.2)$$

Таблица 1.1 – Температуры плавления и испарения элементов

Элемент	Атомная масса	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{у}}, ^\circ\text{C}$	Рекомендуемые материалы испарителя	
				проволоки, ленты	Тигля
1	2	3	4	5	6
Ag	107,9	961	1047	Mo, Ta	Mo, C
Al	27	660	1150	W	C, BN
Au	197	1063	1465	W, Mo	Mo, C
Cr*	52	1800	1205	W, Ta	—
Cu	63,2	1083	1273	W, Mo, Ta	Mo, C, Al_2O_3
Ge	72,6	959	1251	W, Mo, Ta	W, C, Al_2O_3
Mg*	24,3	651	443	W, Mo, Ta, Ni	FeC
Mn	54,9	1244	980	W, Mo, Ta	Al_2O_3
Mo**	95,9	2622	2533	—	—
Ni	58,7	1455	1510	W	Al_2O_3 , ZrO_2
Pt	195	1774	2090	W	ZrO_2
Si	28	1415	1342	—	BeO, ZrO_2
Ta**	181	2996	3070	—	—
Ti*	47,9	1725	1546	W, Ta	—
W**	183,9	3382	3309	—	—
* Испаряется из твердого состояния (сублимируется),					
** Рекомендуется испарение электронно-лучевым нагревом или распыление ионной бомбардировкой.					

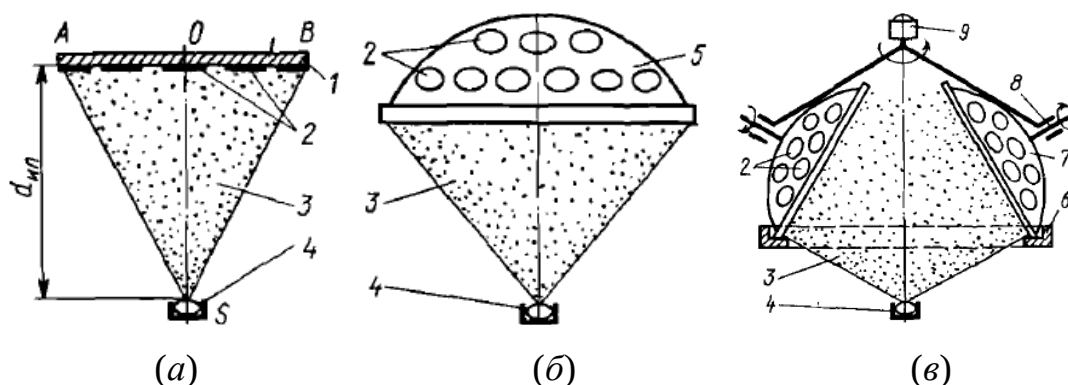
При типичных рабочих температурах скорость испарения большинства элементов составляет около 10^{-5} г/(см²·с). Для эффективного формирования пленочных покрытий и экономии часто дорогостоящих материалов необходимо обеспечить направленное движение испаряемых частиц к подложке, что требует создания глубокого вакуума. В таких условиях исключаются

столкновения атомов напыляемого вещества с молекулами остаточных газов, предотвращая рассеивание потока.

Молекулярный поток, представляющий собой прямолинейное движение частиц без столкновений, лучше характеризуется не величиной давления, а средней длиной свободного пробега молекул. Для его формирования в пространстве между испарителем и подложкой необходимо поддерживать давление в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-5} Па, что обеспечивает беспрепятственное движение частиц.

Одной из ключевых проблем при напылении является неравномерность распределения толщины пленки по поверхности подложки. В идеальном случае при равномерном потоке частиц толщина была бы одинаковой по всей площади. Однако значительная разница в размерах испарителя (фактически точечного источника) и подложкодержателя делает это невозможным. Как видно из рисунка 1.2а, скорость осаждения в центре подложки (точка *O*) существенно выше, чем на периферии (точки *A* и *B*), что приводит к вариациям толщины до $\pm 20\%$.

Простейшим способом уменьшения неравномерности является увеличение расстояния между испарителем и подложкой. Однако этот подход имеет существенные ограничения: снижается скорость конденсации, что ухудшает качество пленки, а также накладываются конструктивные ограничения, связанные с размерами вакуумной камеры. Таким образом, поиск оптимальных параметров процесса напыления требует тщательного баланса между равномерностью покрытия и скоростью его формирования.



1, 5, 7 – плоский, сферический и планетарный подложкодержатели,
 2 – подложки, 3 – потокоосаждаемых частиц, 4 – точечный источник
 потока осаждаемых частиц, 6 – кольцо, 8 – ось подложкодержателя,
 9 – приводная вращающаяся ось
 а – плоский подложкодержатель; б – сферический подложкодержатель;
 в – вращающийся подложкодержатель

Рисунок 1.2 – Схемы осаждения пленок из точечного источника

Применение специальных технических решений позволяет существенно улучшить равномерность распределения толщины пленки, снижая ее вариативность до $\pm 10\%$. Когда такие показатели не удовлетворяют технологическим требованиям, используют более совершенную систему двойного вращения - планетарную карусель (рисунок 1.2в). Эта конструкция включает приводную ось вращения 9, оснащенную тремя подложкодержателями 7. Каждый держатель совершает вращение вокруг собственной оси 8, одновременно перемещаясь по кольцевой направляющей 6, что создает сложное планетарное движение подложек. Несмотря на высокую стоимость такого оборудования, оно обеспечивает выдающуюся точность нанесения покрытий с отклонением толщины всего $\pm(от 3 до 4)\%$.

Для количественной оценки равномерности покрытия проводят прецизионные измерения толщины пленки d_n в пяти контрольных точках: центральной зоне и четырех равноудаленных точках по краям пластины, расположенных на взаимно перпендикулярных диаметрах. Используя микроскоп

МИИ-4, фиксируют максимальное ($d_{п_max}$) и минимальное ($d_{п_min}$) значения толщины, на основании которых рассчитывают процентное отклонение от среднего значения по стандартной формуле. Такой подход позволяет объективно оценить качество напыления и при необходимости скорректировать технологические параметры процесса:

$$B = \pm \frac{d_{п_max} - d_{п_min}}{2 \cdot (d_{п_max} + d_{п_min})} \cdot 100\%. \quad (1.3)$$

Рассмотрим пример расчета неравномерности толщины пленки. Получены замеры в пяти точках (нм): 1260, 1255, 1290, 1280, 1265. Из этого ряда выберем $d_{п_max} = 1290$ нм и $d_{п_min} = 1255$ нм и вычислим неравномерность по формуле (1.3):

$$B = \pm \frac{1290 - 1255}{2 \cdot (1290 + 1255)} \cdot 100\% = \pm 2,7\%. \quad (1.4)$$

Процесс испарения и качество нанесенных пленок в значительной мере определяются типом и конструкцией испарителей, которые могут иметь резистивный или электронно-лучевой нагрев. Выбор типа испарителя зависит от вида испаряемого материала, его агрегатного состояния и температуры в процессе испарения, а также других факторов [2].

1.4 Импульсное формирование пленочных элементов микроэлектроники

Нанесение пленок методом термического испарения в вакууме состоит из трех связанных между собой процессов: испарения образца конденсированного тела (мишени), транспортировки пара от мишени до поверхности конденсации (подложки), зарождения конденсированной фазы на подложке и роста пленки при обмене энергией с подложкой [3].

Импульсное нанесение пленок снимает температурные ограничения при испарении, повышает на несколько порядков мгновенную скорость оса-

ждения (до 10^{-1} м/с и более) и характеризуется не стационарностью происходящих процессов [3].

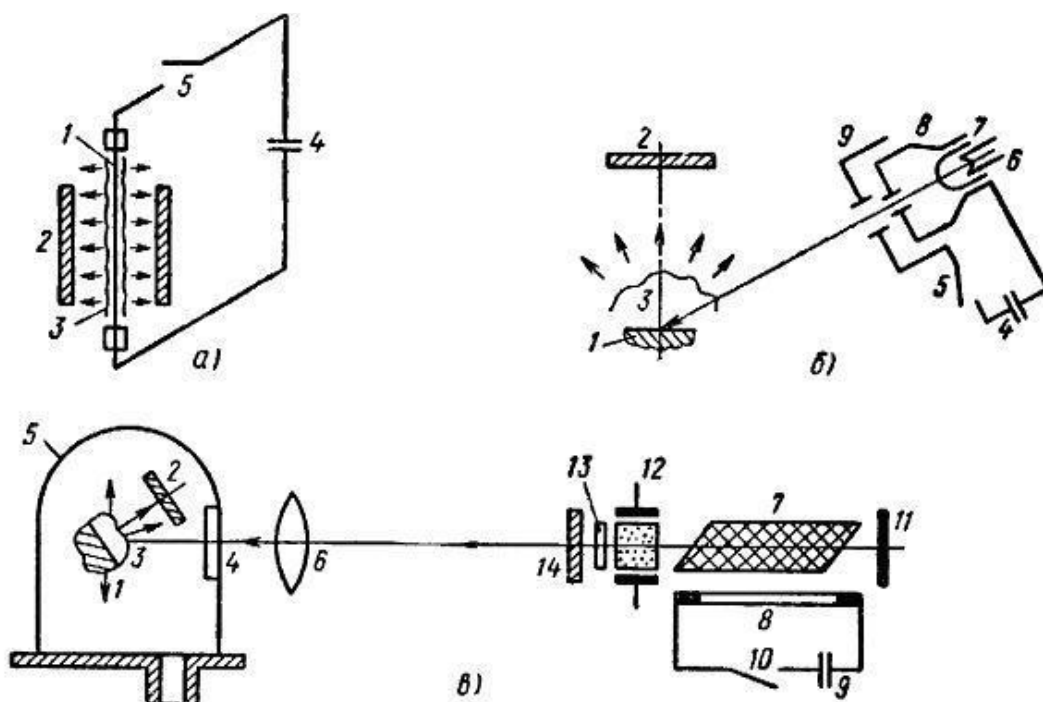
Электрический взрыв проводников возникает в тонком образце конденсированного материала при интенсивном выделении джоулева тепла. Электрические проводники (проволочки, фольга, пленки, нанесенные на диэлектрические подложки) распыляются при разряде высоковольтной и малоиндуктивной (с высоким значением скорости нарастания тока) конденсаторной батареи (рисунок 1.3а). Диаметр проволочек или толщина плоского образца составляет 0,01 – 0,1 мм, а интенсивность источника тепла достигает $10^5 - 10^7$ МВт/г [3].

Взрывы делятся на медленные, быстрые и взрывную абляцию в зависимости от соотношения между временем испарения проволочки τ_e и постоянными времени τ_s и τ_h . (τ_s – постоянная неустойчивости, т. е. характеристическое время, требующееся для того, чтобы нестабильность, например волнистость проволочки, возросла вдвое; τ_h – электротермическая постоянная времени, т. е. время, необходимое для проникновения температуры, равной точке кипения, на глубину порядка радиуса проволочки).

При медленном взрыве $\tau_e \gg \tau_s$ физические искажения проволочки оказывают значительное влияние на характер его протекания. Быстрому взрыву соответствует $\tau_l \ll \tau_s$. Под взрывной абляцией понимается ситуация, когда процесс развития взрыва управляется скин-эффектом и испарение происходит лишь в тонком поверхностном слое, а центр остается непрогретым [3].

При быстром взрыве в вакууме в течение $10^{-8} - 10^{-7}$ с взрываемый образец превращается в пар с плотностью, близкой к плотности твердого тела, и температурой $1 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5$ К (энергия 10 – 35 эВ).

Наиболее характерными чертами нанесения пленок при электровзрывном испарении является исключительно высокая скорость роста пленки ($10^7 - 10^8$ нм/с) и высокая энергия конденсирующейся плазмы (эквивалентная температура $T \approx 10^5 - 10^6$ К). Скорость потока плазмы около 10^5 см/с, а плотность потока приблизительно 10^{23} см⁻²·с⁻¹.



1 – взрываемый образец, 2 – подложка, 3 – поток продуктов взрыва,
4 – конденсаторная батарея, 5 – управляемый разрядник

а) – электрический взрыв;

1 – мишень, 2 – подложка, 3 – поток пара, 4 – конденсатор или
специальный генератор импульсного тока, 5 – управляемый разрядник,
6 – накал катода электронной пушки, 7 – катод, 8 – фокусирующий
электрод, 9 – анод,

б) – испарение мощным сходящимся электронным лучом;

1 – мишень, 2 – подложка, 3 – поток пара, 4 – прозрачное окно,
5 – вакуумная камера, 6 – фокусирующая линза, 7 – активное вещество,
8 – лампа накачки, 9 – конденсатор, 10 – управляемый разрядник,
11 – непрозрачное зеркало, 12 – ячейка Керра, 13 – поляризатор,
14 – полупрозрачное зеркало

в) – лазерное испарение

Рисунок 1.3 – Различные способы импульсного нанесения пленок

Высокая интенсивность потока пара характеризуется также тем, что на 10^8 атомов пара, бомбардирующих подложку, находящуюся на расстоянии $L = 7$ см от взрываемого образца, приходится всего одна молекула остаточного газа (давление около $133 \cdot 10^{-5}$ Па). Тем самым электровзрывное испарение позволяет получать исключительно чистые пленки.

Высокая энергия конденсирующихся частиц приводит к сильному нагреву поверхности подложки и самого конденсата в процессе роста пленки. Различают три вида кристаллизации: при температуре более высокой, чем начальная температура подложки, но меньше температуры плавления; при температуре плавления; с интенсивным реиспарением [3].

1.5 Метод ионного напыления пленок

Метод ионно-кластерного осаждения использует явление образования кластеров (многоатомных агрегатов) при истечении в вакуум со сверхзвуковой скоростью потока пара из квазизамкнутого тигля через одно или несколько отверстий (сопел) малого диаметра. Если температура пара в тигле T_T , то после выхода его из сопла в результате адиабатического расширения температуры понижается до T_B и может быть определена из уравнения:

$$\frac{T_B}{T_T} = \left(\frac{P_B}{P_T} \right)^{\frac{(\nu-1)}{\nu}}, \quad (1.5)$$

где P_T и P_B – давление пара в тигле и в вакуумной камере вблизи сопла;

ν – отношение удельной теплоемкости пара при постоянном давлении C_p к его удельной теплоемкости при постоянном объеме C_v :

$$\nu = \frac{C_p}{C_v} = 1 + \frac{2}{n_c}, \quad (1.6)$$

где n_c – число степеней свободы молекулы пара.

Образование кластеров протекает наиболее эффективно, если $P_T / P_B > 10^4$, что обеспечивается выбором температуры тигля и диаметра отверстия сопла, которое обычно не превышает 1 – 30 % внутреннего диаметра тигля и составляет 0,1 – 1,0 мм. Число атомов в кластере $N_a = 10^2 – 10^3$. Энергия кластеров:

$$W = k \cdot T_T \cdot N_a, \quad (1.7)$$

где k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К.

Для повышения энергии кластеров их ионизируют и ускоряют в электрическом поле. Ионизация потока кластеров осуществляется электронным ударом. Сечения ионизации кластера $\sigma_{кл}$ является функцией его размера, и при энергии электронов 50 – 500 эВ $\sigma_{кл}$ в первом приближении равно геометрическому сечению кластера, что позволяет получить степень ионизации потока кластеров 1 – 50 %.

Ионно-кластерным методом получают пленки металлов, полупроводников, диэлектриков простого и сложного состава. При этом в качестве рабочих материалов используются легкосублимирующиеся вещества (серебро, золото, медь, свинец, кремний и др.). При ионно-кластерном методе осаждения возможно легирование материала пленок в процессе их получения. Такой метод высокопроизводителен, причем скорость осаждения можно регулировать в широких пределах (от сотых долей до десятков микрометров в минуту) даже при испарении материалов из односоплового тигля.

Конденсация кластеров на подложке сопровождается частичным или полным распадом их на составляющие атомы, которые могут мигрировать по поверхности подложки. Значительная величина среднего пути миграции атомов (10 – 50 мкм) стимулирует процессы зародышеобразования, рост островков, их коалесценцию и т. д., что позволяет получать поли- и монокристаллические пленки при более низких температурах подложки по сравнению с термовакуумным методом.

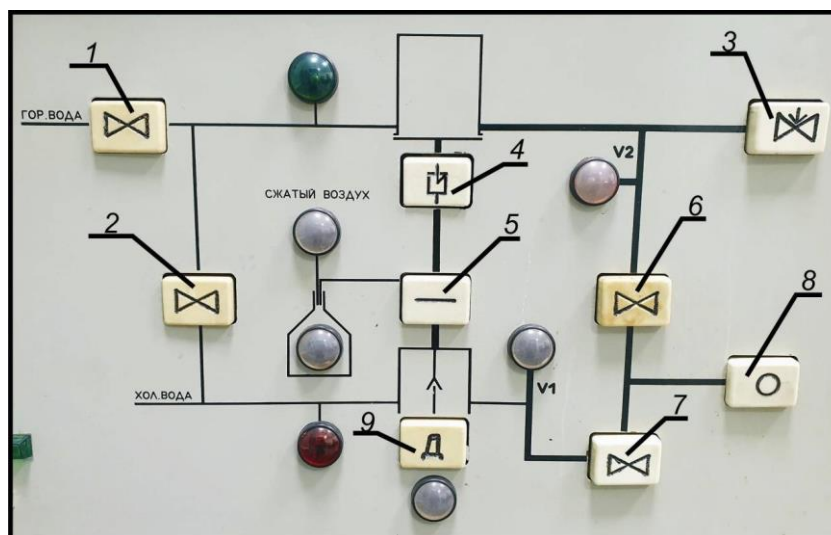
В результате миграции атомов снижается удельное сопротивление металлических пленок, уменьшаются внутренние напряжения. Плотность материала пленки растет с увеличением энергии кластеров, что обусловлено непрерывным удалением ионной бомбардировкой слабосвязанных с поверхностью подложки атомов рабочего материала, а также повышенной миграцией по подложке сконденсированных частиц. С увеличением энергии ионизированных частиц растет число имплантированных в подложку ионов, интенсифицируется травление ее поверхности, что способствует повышению адгезии пленки к подложке [1].

Рассмотрены наиболее распространенные термические методы получения компонентов электронной техники. Для всех рассмотренных методов необходимо обеспечить высокий уровень вакуума для исключения различных загрязнений при формировании электронных компонентов и обеспечить надежность работы электронных приборов и микросхем. Из вышесказанного следует, что автоматизированная система создания и управления вакуумом должна обеспечить надежную работу термических установок в процессе создания компонентов электронной техники.

2 Проектирование автоматизированной системы создания и управления вакуумом

2.1 Подготовка исходных данных для проектирования автоматизированной системой откачки установки УВН-71П-3

Панель управления установкой, с помощью которой управляет оператор процессом создания вакуума, представлена на рисунке 2.1. Оператор при выполнении своей работы выполняет определенный алгоритм действий, по созданию вакуума руководствуясь показаниями различных приборов. В частности, оператор контролирует уровень вакуума в колпаке и диффузионном насосе с помощью датчиков на основе вакуумных ламп.



1 – клапан подачи горячей воды в колпак; 2 – клапан подачи холодной воды в диффузионный насос/колпак; 3 – клапан напуска воздуха; 4 – клапан откачки воздуха из камеры; 5 – вкл./выкл. азотной ловушки; 6 – клапан откачки воздуха из колпака форвакуумным насосом; 7 – клапан откачки воздуха из диффузионного насоса форвакуумным насосом; 8 - вкл./выкл. форвакуумного насоса; 9 - вкл./выкл. диффузионного насоса

Рисунок 2.1 – Панель управления создания вакуума установки УВН 71 ПЗ

Следовательно, исходя из вышесказанного, необходимо определить входные и выходные сигналы, которые будут управлять процессом создания

вакуума в автоматическом режиме. Обозначим входные сигналы через X , а выходные сигналы – Q . В таблице 2.1 представлены входные и выходные сигналы с соответствующим описанием.

Таблица 2.1 – Входные и выходные сигналы для автоматического управления процессом создания вакуума

Сигналы	Описание сигналов	Поз. на рисунке 2.1
1	2	3
Входные сигналы		
X_1	сигнал на пуск процесса, (вкл - 1 / выкл - 0)	—
X_2	датчик температуры диффузионного насоса больше установленного, (°C)	—
X_3	датчик низкого вакуума камеры больше установленного, (мм рт ст)	—
X_4	датчик высокого вакуума камеры больше установленного, (мм рт ст)	—
X_5	датчик высокого вакуума диффузионного насоса больше установленного, (мм рт ст)	—
X_6	установка начального состояния, (вкл - 1 / выкл - 0)	—
Выходные сигналы		
Q_1	клапан горячей воды камеры (вкл - 1 / выкл - 0)	1
Q_2	клапан холодной воды камеры (вкл - 1 / выкл - 0)	2
Q_3	клапан напуска воздух в камеру (вкл - 1 / выкл - 0)	3
Q_4	клапан высоковакуумного затвора (вкл - 1 / выкл - 0)	4
Q_5	азотная ловушка (вкл - 1 / выкл - 0)	5
Q_6	клапан камера - форвакуумный насос (вкл - 1 / выкл - 0)	6
Q_7	клапан диффузионный насос - форвакуумный насос (вкл - 1 / выкл - 0)	7

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
Q8	форвакуумный насос (вкл - 1 / выкл - 0)	8
Q9	нагрев диффузионного насоса (вкл - 1 / выкл - 0)	9

Для управления входными сигналами X необходимо предусмотреть схему измерения параметров в процессе создания вакуума. В качестве датчиков вакуума необходимо применять ионизационный датчики, которые позволяют измерять вакуум в диапазоне от 5×10^{-10} до 5×10^{-2} мм. рт. ст. Также автоматизированная система создания вакуума должна иметь возможность переключения с автоматического режима на ручной и обратно.

2.2 Разработка и проектирование схемы управления процессом создания вакуума на установке УВН-71П-3

Функционирование цифрового автомата основано на взаимодействии комбинационных схем с элементами памяти. Когда на управляющие входы поступает набор сигналов от X_1 до X_n , характеризующих текущее состояние запоминающих элементов в диапазоне от Y_1 до Y_n , логическая схема преобразует их в управляющие последовательности для триггерных ячеек. Уникальные комбинации состояний этих триггеров образуют внутренние состояния автомата, традиционно обозначаемые символом a . Параллельно другая комбинационная схема генерирует выходные сигналы с Q_1 по Q_n , которые могут использоваться для управления внешними устройствами или активации процессов в сопряженных схемах.

Классификация цифровых автоматов основывается на зависимости выходных сигналов от различных параметров системы. В устройствах типа Мура выходные воздействия определяются исключительно внутренним состоянием автомата, тогда как в автоматах Мили они дополнительно зависят от текущих входных сигналов от X_1 до X_n . Это принципиальное различие в архитектуре определяет сферу применения и функциональные

возможности каждого типа устройств в цифровых системах обработки информации.

Проектирование автоматизированной системы создания вакуума будет основана на цифровом автомате Миля, который обеспечивает заданные выходные сигналы, как от входных сигналов (X), так и от внутреннего состояния автомата (a).

Рассмотрим процесс создания вакуума оператором установки УВН-71П-3. Для получения пленок методом термического испарения в вакууме на установке УВН-71П-3 выполняются следующие действия:

- 1) подготовка подколпачного пространства. Очистка внутренних поверхностей колпака и используемого внутреннего оборудования. Выбор и установка необходимого испарителя для данного технологического процесса, размещение подложек на подложкодержателе с соответствующими масками для создания микрoeлектронных приборов, опускание и герметизация колпака;
- 2) создание необходимого вакуума в соответствии с технологическими картами по контрольным приборам (датчикам вакуума);
- 3) включение и контроль нагрева подложек и испарителя для формирования микрoeлектронных изделий, с последующим напылением исходного материала;
- 4) охлаждения подколпачного пространства, с последующей разгерметизацией;
- 5) извлечение подложек с пленкой для последующей передачи их на следующую технологическую операцию.

Таким образом, исходя из вышесказанного можно, сделать вывод, что на процесс создания вакуума затрачивается наибольшее время. Поэтому рассмотрим этот этап более подробно.

Оператор установки УВН-71П-3 подает питание электрической сети, включает горячую и холодную воду, включает компрессор сжатым воздухом для азотной ловушки и устанавливает требуемые значения входных

сигналов $X1 \dots X6$, значения которых будут рассмотрены ниже в следующих подразделах данной пояснительной записки, после чего приступает к процессу откачки воздуха из-под колпака, начальное состояние a_0 выходных сигналов в двоичной системе будет иметь вид:

$$\overline{Q1} \quad \overline{Q2} \quad \overline{Q3} \quad \overline{Q4} \quad \overline{Q5} \quad \overline{Q6} \quad \overline{Q7} \quad \overline{Q8} \quad \overline{Q9}. \quad (2.1)$$

В первую очередь открывает клапан подачи горячей воды (поз. 1 рисунок 2.1) на колпак, это необходимо для процесса дегазации, т.е. удаление загрязнения со стенок колпака.

На следующем этапе оператор установки включает форвакуумный насос (поз. 8 рисунок 2.1) и открывает клапан между колпаком и форвакуумным насосом (поз. 6 рисунок 2.1), а также включает азотную ловушку (поз. 5 рисунок 2.1), в двоичной системе выходные сигналы будут соответствовать состоянию a_1 и коду:

$$Q1 \quad \overline{Q2} \quad \overline{Q3} \quad \overline{Q4} \quad Q5 \quad Q6 \quad \overline{Q7} \quad Q8 \quad \overline{Q9}. \quad (2.2)$$

На этом этапе идет откачка воздуха из-под колпака до заданного значения низкого вакуума, который контролируется датчиком низкого вакуума и управляет сигналом $X3$. После того как значение низкого вакуума достигнет значения больше установленного оператором, на входной сигнал подается команда для перехода к следующему этапу.

Следующий этап автоматизированной системы включает нагрев диффузионного насоса и идет продолжение откачки вакуума. На этом этапе система будет находиться в состоянии a_2 , в двоичном коде выходные сигналы будут иметь вид:

$$Q1 \quad \overline{Q2} \quad \overline{Q3} \quad \overline{Q4} \quad Q5 \quad Q6 \quad \overline{Q7} \quad Q8 \quad Q9. \quad (2.3)$$

Здесь процесс создания вакуума продолжается с параллельным нагревом диффузионного насоса до заданной температуры, управление осуществля-

ется входным сигналом X_2 . При достижении температуры нагрева масла диффузионного насоса больше заданного значения система управления переходит в состояние a_3 . Этому состоянию выходные сигналы соответствуют коду:

$$\overline{Q1} \quad Q2 \quad \overline{Q3} \quad \overline{Q4} \quad Q5 \quad \overline{Q6} \quad Q7 \quad Q8 \quad Q9. \quad (2.4)$$

На данном этапе клапан между колпаком и форвакуумным насосом закрывается (поз. 6 рисунок 2.1), клапан между диффузионным насосом и форвакуумным насосом открывается (поз. 7 рисунок 2.1) и происходит процесс откачки воздуха из диффузионного насоса. При этом клапан горячей воды закрывается (поз. 1 рисунок 2.1), а клапан холодной воды подается на колпак (поз. 2 рисунок 2.1), для его охлаждения. Откачка из диффузионного насоса контролируется по уровню создания высокого вакуума и управляется входным сигналом X_5 . По достижению уровня высокого вакуума в диффузионном насосе, автоматизированная система переходит в следующее состояние.

Состояние системы a_4 закрывает клапан между диффузионным и форвакуумным насосами (поз. 7 рисунок 2.1) и открывает клапан между колпаком и форвакуумным насосом (поз. 6 рисунок 2.1). В данном состоянии ведется контроль высокого вакуума в колпаке и диффузионном насосе. Контроль осуществляет входной сигнал X_4 , этому состоянию соответствует код выходных сигналов:

$$\overline{Q1} \quad Q2 \quad \overline{Q3} \quad \overline{Q4} \quad Q5 \quad Q6 \quad \overline{Q7} \quad Q8 \quad Q9. \quad (2.5)$$

При достижении высокого вакуума в колпаке и диффузионном насосе входной сигнал X_4 переводит систему в новое состояние a_5 .

Состояние автоматизированной системы a_5 закрывает клапан между колпаком и форвакуумным насосом (поз. 6 рисунок 2.1) и открывает кла-

пан между диффузионным и форвакуумным насосом (поз. 7 рисунок 2.1).

Выходные сигналы:

$$\overline{Q1} \quad Q2 \quad \overline{Q3} \quad \overline{Q4} \quad Q5 \quad \overline{Q6} \quad Q7 \quad Q8 \quad Q9. \quad (2.6)$$

Т.к. уровень вакуума в колпаке и диффузионным насосом примерно равны, то система переходит в состояние a_6 и при этом открывается высоковакуумный затвор и осуществляется процесс создания вакуума в соответствии с технологическими картами по производству микроселектронных изделий. По достижению заданного вакуума подается сигнал на разрешения проведения дальнейшего нагрева подложки и испарителя с последующим напылением. Двоичный код выходных сигналов для данного состояния имеет следующий вид:

$$\overline{Q1} \quad Q2 \quad \overline{Q3} \quad Q4 \quad Q5 \quad \overline{Q6} \quad Q7 \quad Q8 \quad Q9. \quad (2.7)$$

После напыления материала на подложку приходит команда о завершении напыления, это контролируется входным сигналом $X1$ и система переходит в состояние a_7 . Высоковакуумный клапан закрывается (поз. 4 рисунок 2.1) и нагрев диффузионного насоса отключается (поз. 9 рисунок 2.1). При достижении температуры диффузионного насоса меньше установленного значения открывается клапан напуска воздуха в колпак (поз. 3 рисунок 2.1), а остальные системы выключаются, что соответствует коду выходных сигналов:

$$\overline{Q1} \quad \overline{Q2} \quad Q3 \quad \overline{Q4} \quad \overline{Q5} \quad \overline{Q6} \quad \overline{Q7} \quad \overline{Q8} \quad \overline{Q9}, \quad (2.8)$$

и на завершающем этапе автоматизированная система переходит в исходное состояние соответствующее выражению (2.1).

Таким образом, выполняется полный цикл создания высокого вакуума на установке УВН-71П-3. На рисунке 2.2 представлена блок-схема полного алгоритма создание вакуума.

Алгоритм является фактически формализованным представлением задачи по построению цифрового автомата Миля, где определены группы выходных сигналов (от Q1 до Q9) для инициализации устройства схемы (например, операционного устройства процессора в зависимости от поступления тех или иных входных сигналов (от X1 до X6)). Задавать цифровой автомат удобно с помощью векторного графа. Графом называется непустое конечное множество вершин вместе с множеством ветвей, соединяющих пары различных вершин (рисунок 2.3).

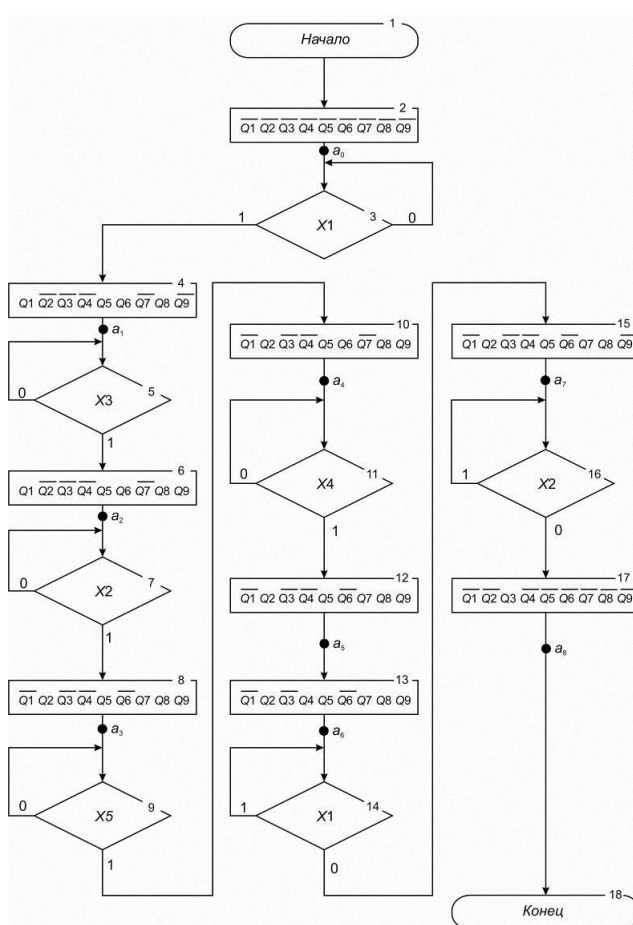


Рисунок 2.2 – Алгоритм автоматизированного процесса управления создания вакуума на установке УВН 71 ПЗ

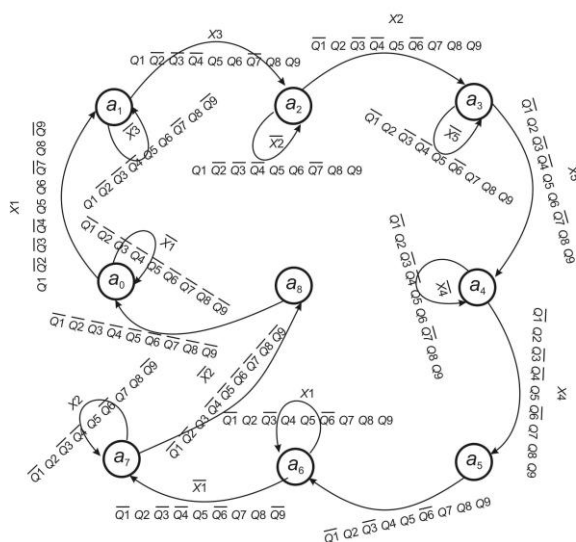


Рисунок 2.3 – Граф перехода автомата в соответствии с алгоритмом

Граф обычно представляется в наглядной форме, при этом вершины изображаются кругами, которые помечаются с целью идентификации, а ветви изображаются линиями, соединяющими соответствующие узлы. Если каждой ветви также приписано направление, то такой граф называется ориентированным. Если направления не указаны, то граф называется неориентированным. Данные представления полезны ввиду их наглядности. Вершины обычно соответствуют объектам некоторого вида (в цифровом автомате – внутренним состояниям), а ветви – физическим или логическим связям между ними. Таким образом, графы можно использовать для математического моделирования самых разнообразных систем.

2.3 Вывод логических выражений

Для подготовки логических выражений, в соответствии с заданным алгоритмом, необходимо построить таблицу состояний и определить двоичный код для каждого состояния. Каждому состоянию автомата соответствует определенный код выходных сигналов в зависимости от входных. В таблице 2.2 представлены состояния автомата и соответствующий ему двоичный код в соответствии с алгоритмом (рисунок 2.3).

Таблица 2.2 – Состояние автомата и соответствующий двоичный код

Состояние автомата	Состояние элементов памяти			
	Y1	Y2	Y3	Y4
1	2	3	4	5
a_0	0	0	0	0
a_1	0	0	0	1
a_2	0	0	1	0
a_3	0	0	1	1
a_4	0	1	0	0
a_5	0	1	0	1
a_6	0	1	1	0
a_7	0	1	1	1
a_8	1	0	0	0

Для дальнейших расчетов потребуются таблицы переходов триггеров. Число триггеров для построения регистра состояний равно разрядности кодовой комбинации состояния a (таблица 2.2). Что бы реализовать алгоритм (рисунок 2.3) нам понадобится четыре триггера. Проектирование автоматизированной системы создания вакуума в рабочей камере установки УВН-71П-3 применим D – триггеры, таблица переходов которые представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Таблица переходов D – триггеров

Переход	D
1	2
$0 \rightarrow 0$	0
$0 \rightarrow 1$	1
$1 \rightarrow 0$	0
$1 \rightarrow 1$	1

Интегральным D -триггером называется триггер с одним сигнальным и одним тактовым входом. Такие триггеры носят другое название – триггер задержки. Название произошло от английского слова *delay* (задержка). D -триггеры предназначены для выполнения следующих основных операций:

- запоминание информации;
- задержка логических сигналов;
- счет поступающих импульсов.

D-триггеры являются синхронными триггерами и классифицируются по количеству тактов работы одноктактный двухтактный (2-х ступенчатый). После построения графа (рисунок 2.4), составление таблицы состояний (таблица 2.2), а так же таблице переходов *D*-триггера (таблица 2.3) необходимо заполнить таблицу функционирования комбинационного узла автомата (таблица 2.4). Если число переменных *X* небольшое, и автомат имеет 2-3 состояния, то в этом случае можно воспользоваться методом Вейча (Карно). Это удобно, если число клеток в карте Карно будет до 25, т.е. 32. В других случаях этот метод становится слишком громоздким. Предлагаемая таблица позволяет записать функции для любого числа переменных. Затем их следует внимательно проанализировать с целью возможного упрощения (минимизации). В данном случае оказывается достаточным к некоторым выражениям применить закон склеивания и взаимного поглощения.

После заполнения таблицы 2.4 необходимо составить и записать логические выражения. У автомата Миля выходные сигналы и сигналы управления памятью являются функцией исходного состояния и внешних условий. Ниже представлены логические выражения выходных сигналов:

$$Q1 = a_0 \cdot X1 + a_1 + a_2 \cdot \overline{X2}; \quad (2.9)$$

$$Q2 = a_2 \cdot X2 + a_3 \cdot \overline{X5} + a_3 \cdot X5 + a_4 \cdot \overline{X4} + a_5 + a_6 \cdot X1 + a_6 \cdot \overline{X1} + a_7 \cdot \overline{X2}; \quad (2.10)$$

$$Q3 = a_7 \cdot X2; \quad (2.11)$$

$$Q4 = a_5 + a_6 \cdot X1; \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned}
Q5 = & a_0 \cdot X1 + a_1 \cdot \overline{X3} + a_1 \cdot X3 + \\
& + a_2 \cdot \overline{X2} + a_2 \cdot X2 + a_2 \cdot \overline{X5} + a_3 \cdot X5 + \\
& + a_4 \cdot \overline{X4} + a_4 \cdot X4 + a_5 + a_6 \cdot X1 + a_6 \cdot \overline{X1} + a_7 \cdot \overline{X2}
\end{aligned} \quad ; \quad (2.13)$$

$$Q6 = a_0 \cdot X1 + a_1 \cdot \overline{X3} + a_1 \cdot X3 + a_2 \cdot \overline{X2} + a_3 \cdot X5 + a_4 \cdot \overline{X4}, \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned}
Q7 = & a_2 \cdot X2 + a_3 \cdot \overline{X5} + a_4 \cdot X4 + a_5 + \\
& + a_6 \cdot X1 + a_6 \cdot \overline{X1} + a_7 \cdot \overline{X2}
\end{aligned} \quad ; \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned}
Q8 = & a_0 \cdot X1 + a_1 \cdot \overline{X3} + a_1 \cdot X3 + \\
& + a_2 \cdot \overline{X2} + a_2 \cdot X2 + a_3 \cdot \overline{X5} + a_3 \cdot X5 + \\
& + a_4 \cdot \overline{X4} + a_4 \cdot X4 + a_5 + a_6 \cdot X1 + a_6 \cdot \overline{X1} + a_7 \cdot \overline{X2}
\end{aligned} \quad ; \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned}
Q9 = & a_1 \cdot X3 + a_2 \cdot \overline{X2} + a_2 \cdot X2 + a_3 \cdot \overline{X5} + \\
& + a_4 \cdot \overline{X4} + a_4 \cdot X4 + a_5 + a_6 \cdot X1
\end{aligned} \quad ; \quad (2.17)$$

и сигналов управления памятью:

$$\begin{aligned}
D1 = & a_0 \cdot X1 + a_1 \cdot \overline{X3} + a_2 \cdot X2 + a_3 \cdot \overline{X5} + \\
& + a_4 \cdot X4 + a_6 \cdot \overline{X1} + a_7 \cdot \overline{X2}
\end{aligned} \quad ; \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned}
D2 = & a_1 \cdot X3 + a_2 \cdot \overline{X2} + a_2 \cdot X2 + a_3 \cdot \overline{X5} + \\
& + a_5 + a_6 \cdot X1 + a_6 \cdot \overline{X1} + a_7 \cdot \overline{X2}
\end{aligned} \quad ; \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned}
D3 = & a_3 \cdot X5 + a_4 \cdot \overline{X4} + a_4 \cdot X4 + \\
& + a_5 + a_6 \cdot X1 + a_6 \cdot \overline{X1} + a_7 \cdot \overline{X2}
\end{aligned} \quad ; \quad (2.20)$$

$$D4 = a_7 \cdot X2. \quad (2.21)$$

Таблица 2.4 – Функционирования комбинационного автомата

Состояние автомата										Условие перехода					Сигналы управления триггерами				Выходные сигналы									
Исходное					Новое																							
a	Y4	Y3	Y2	Y1	a	Y4	Y3	Y2	Y1	X5	X4	X3	X2	X1	D4	D3	D2	D1	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
a_8	1	0	0	0	a_0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
a_0	0	0	0	0	a_0	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
a_0	0	0	0	0	a_1	0	0	0	1	-	-	-	-	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	
a_1	0	0	0	1	a_1	0	0	0	1	-	-	0	-	-	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	
a_1	0	0	0	1	a_2	0	0	1	0	-	-	1	-	-	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	
a_2	0	0	1	0	a_2	0	0	1	0	-	-	-	0	-	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	
a_2	0	0	1	0	a_3	0	0	1	1	-	-	-	1	-	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
a_3	0	0	1	1	a_3	0	0	1	1	0	-	-	-	-	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
a_3	0	0	1	1	a_4	0	1	0	0	1	-	-	-	-	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	
a_4	0	1	0	0	a_4	0	1	0	0	-	0	-	-	-	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	
a_4	0	1	0	0	a_5	0	1	0	1	-	1	-	-	-	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
a_5	0	1	0	1	a_6	0	1	1	0	-	-	-	-	-	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	
a_6	0	1	1	0	a_6	0	1	1	0	-	-	-	-	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	
a_6	0	1	1	0	a_7	0	1	1	1	-	-	-	-	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
a_7	0	1	1	1	a_7	0	1	1	1	-	-	-	1	-	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
a_7	0	1	1	1	a_8	1	0	0	0	-	-	-	0	-	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	

На следующем этапе выполним упрощения этих логических выражений по закону склеивания и взаимного поглощения. В результате получим окончательные логические выражения, которые позволят управлять автоматом Миля в соответствии с заданным алгоритмом. Для выходных сигналов получим следующие выражения:

$$Q1 = a_0 \cdot X1 + a_1 + a_2 \cdot \overline{X2}; \quad (2.22)$$

$$Q2 = a_2 \cdot X2 + a_3 + a_4 \cdot \overline{X4} + a_5 + a_6 + a_7 \cdot \overline{X2}; \quad (2.23)$$

$$Q3 = a_7 \cdot X2; \quad (2.24)$$

$$Q4 = a_5 + a_6 \cdot X1; \quad (2.25)$$

$$Q5 = a_0 \cdot X1 + a_1 + a_2 + a_2 \cdot \overline{X5} + a_3 \cdot X5 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 \cdot \overline{X2}; \quad (2.26)$$

$$Q6 = a_0 \cdot X1 + a_1 + a_2 \cdot \overline{X2} + a_3 \cdot X5 + a_4 \cdot \overline{X4}; \quad (2.27)$$

$$Q7 = a_2 \cdot X2 + a_3 \cdot \overline{X5} + a_4 \cdot X4 + a_5 + a_6 + a_7 \cdot \overline{X2}; \quad (2.28)$$

$$Q8 = a_0 \cdot X1 + a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 \cdot \overline{X2}; \quad (2.29)$$

$$Q9 = a_1 \cdot X3 + a_2 + a_3 \cdot \overline{X5} + a_4 + a_5 + a_6 \cdot X1. \quad (2.30)$$

Для сигналов управления памятью, в частности *D*-триггеров будем иметь следующие выражения:

$$D1 = a_0 \cdot X1 + a_1 \cdot \overline{X3} + a_2 \cdot X2 + a_3 \cdot \overline{X5} + a_4 \cdot X4 + a_6 \cdot \overline{X1} + a_7 \cdot \overline{X2}; \quad (2.31)$$

$$D2 = a_1 \cdot X3 + a_2 + a_3 \cdot \overline{X5} + a_5 + a_6 + a_7 \cdot \overline{X2}; \quad (2.32)$$

$$D3 = a_3 \cdot X5 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 \cdot \overline{X2}; \quad (2.33)$$

$$D4 = a_7 \cdot X2. \quad (2.34)$$

Таким образом, в результате анализа исходного алгоритма, графа и выполненных всех необходимых расчетов, получили логические выражения в соответствии, с которыми реализуем схемы цифрового автомата Миля.

2.4 Разработка автоматизированной схемы управления создания вакуума на основе автомата Миля

Разработку схемы управления создания вакуума для установки УВН-71П-3 будем реализовывать на Разработку схемы управления создания вакуума для установки УВН-71П-3 будем реализовывать на основе *k*-МОП микросхем 4000В – CMOS с питанием от 3 до 18 В, 90 нс.

k-МОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник; англ. CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor) – набор полупроводниковых технологий построения интегральных микросхем и соответствующая ей схемотехника микросхем. Подавляющее большинство современных цифровых микросхем – *k*-МОП.

В более общем случае название – *k*-МДП (со структурой металл-диэлектрик-полупроводник). В технологии *k*-МОП используются полевые транзисторы с изолированным затвором с каналами разной проводимости. Отличительной особенностью схем *k*-МОП по сравнению с биполярными технологиями (ТТЛ, ЭСЛ и др.) является очень малое энергопотребление в статическом режиме (в большинстве случаев можно считать, что энергия потребляется только во время переключения логических состояний). Отличительной особенностью структуры *k*-МОП по сравнению с другими МОП-структурами (*n*-МОП, *p*-МОП) является наличие как *n*-, так и *p*-канальных полевых транзисторов, локализованных в одном месте кристалла. Вследствие меньшего расстояния между элементами *k*-МОП-схемы обладают большим быстродействием и меньшим энергопотреблением, однако при этом характеризуются более сложным технологическим процессом изготовления и меньшей плотностью упаковки на поверхности кристалла [4].

Схема электрическая принципиальная автоматизированной системы создания вакуума для установки УВН-71П-3 представлена на рисунке 2.4.

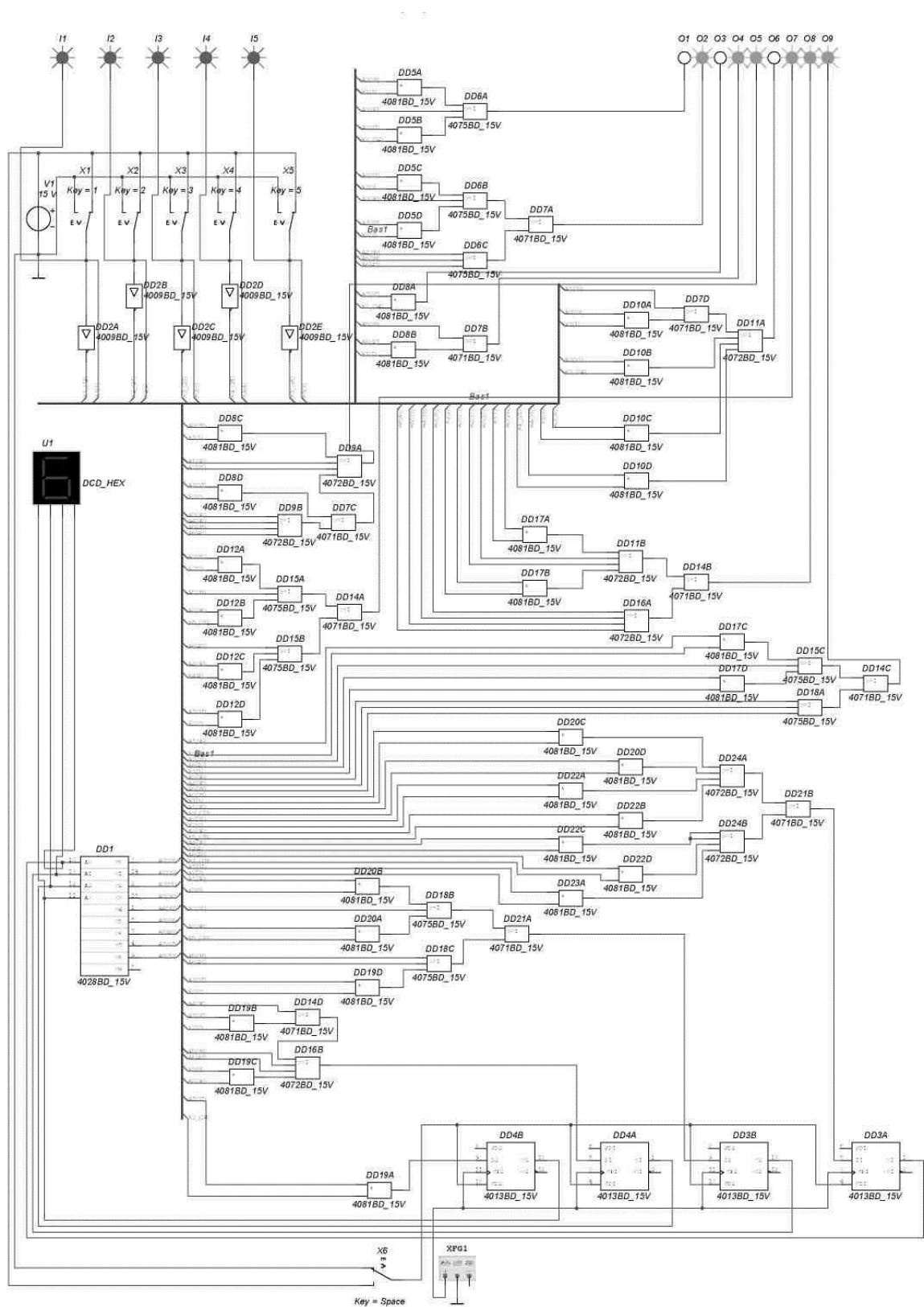


Рисунок 2.4 – Схема автоматизированной система создания
и управления вакуумом

Полученная схема автоматизированной системы создания и управления вакуумом может быть внедрена в общую систему вакуумной установки УВН-71П-3 при минимальных экономических затратах.

2.5 Моделирование работы автоматизированной системы создания вакуума

Моделирование работы автоматизированной системы создания вакуума реализовано в программе *MultiSim 12.0* фирмы *National Instruments* (рисунок 2.4) в виде автомата Миля. На начальном этапе все системы, которые реализуют технологический процесс создания вакуума, отключены. Этому соответствует состояние a_0 , где выходные индикаторы $O1..O9$, которые соответствуют выходным сигналам $Q1...Q9$ не горят.

В соответствие с алгоритмом, представленном на рисунке 2.2 приходит на вход $I1$ сигнал «1» моделируемой схемы. В данный момент автомат Миля переходит в состояние a_1 . В этом состоянии моделируются следующие технологические процессы: включение подачи горячей воды на колпак $O1$, включение азотной ловушки $O5$, включение форвакуумного насоса $O8$, открытие клапана между колпаком и форвакуумным насосом $O6$ для откачки воздуха. Далее по датчику низкого вакуума колпака контролируется уровень вакуума. По достижению уровня низкого вакуума заданного оператором установки, приходит сигнал «1» на вход $I3$ моделируемой схемы. Автомат переходит с состояние a_2 .

В состояние a_2 моделируются следующий технологический процесс: включается нагревание масла в диффузионном насосе. Контроль температуры масла диффузионного насоса осуществляется по резистивному датчику температуры. Значение температуры устанавливается оператором установки. Это значение постоянное для конкретного вида диффузионного насоса и может регулироваться при необходимости. При достижении установленной температуры масла диффузионного насоса $I2$ автомат Миля переходит к следующему состоянию a_3 .

В состояние a_3 моделируются следующие технологические процессы: подача горячей воды на колпак (для дегазации подколпачного загрязнения) отключается $O1$, подача холодной воды на колпак включается $O2$, клапан между колпаком и форвакуумным насосом закрывается $O6$ и открывается клапан откачки воздуха из диффузионного насоса форвакуумным насосом $O7$. Контроль уровня вакуума в диффузионном насосе осуществляется ионизационным датчиком давления высокого вакуума, который устанавливается в трубопровод между диффузионным и форвакуумным насосом. При достижении установленного вакуума в диффузионном насосе, на вход $I5$ и автомат Миля переходит к состоянию a_4 .

В состояние a_4 моделируются следующие технологические процессы протекающие на установке УВН-71П-3: клапан между диффузионным насосом и форвакуумным насосом закрывается $O7$, а клапан между колпаком и форвакуумным насосом открывается $O6$ и происходит откачка воздуха из под колпака до установленного значения вакуума, которое должно примерно составлять уровню вакуума диффузионного насоса. Значение уровня вакуума в колпаке выставляется оператором установки вакуумного напыления. При достижении вакуума в колпаке примерно равное значению вакуума в диффузионном насосе. Здесь поступает сигнал «1» на вход $I4$ и автомат Миля переходит к состоянию a_5 .

В состояние a_5 моделируются следующие технологические процессы: клапан между колпаком и форвакуумным насосом закрывается $O6$, а клапан между диффузионным насосом и форвакуумным насосом открывается $O7$, и происходит откачка воздуха из диффузионного насоса. Автомат Миля переходит к состоянию a_6 .

В этом состоянии a_6 моделируются открытия высоковакуумной заслонки $O4$ между колпаком и диффузионным насосом установки УВН-71П-3 и выполняется откачка воздуха для создания необходимого технологического вакуума для проведения технологической операции напыления.

После процесса напыления приходит сигнал «0» на вход I_1 , данная команда предназначена для завершения процесса напыления и автомат Миля переходит в состояние a_7 . Здесь моделируются следующие технологические процессы: закрытие высоковакуумной заслонки O_4 и отключение нагрева масла диффузионного насоса O_9 . При достижении температуры масла диффузионного насоса меньше установленного значения, поступает сигнал «0» на вход I_2 . Автомат Миля переходит в состояние a_8 . В этом состоянии выключаются все технологические процессы, и напускается воздух в колпак, т.е. колпак напуска воздуха открыт O_3 .

Таким образом, схема автоматизированной системы создания вакуума выполняет полный спектр технологических процессов подготовки условий вакуума для напыления.

2.6 Разработка измерительного блока технологических параметров при создании вакуума

Измерительный блок должен представлять систему позволяющую подключать все необходимые датчики. Измерения с датчиковой аппаратуры должны преобразовываться в управляющие сигналы, которые необходимы для управления процессом создания вакуума.

Ввиду того, что для установки термического испарения в вакууме УВН-71П-3 необходима модернизация измерительной системы. Возникла необходимость замены вакуумных ламп на вакуумные ионизационные датчики. В колпаке необходимо контролировать уровень вакуума на всем протяжении технологического процесса, поэтому нам потребуется два датчика: датчик низкого вакуума и датчик высокого вакуума. Уровень вакуума в диффузионном насосе нам достаточно одного ионизационного датчика высокого вакуума, а также требуется датчик температуры диффузионного масла. Контроль температуры масла позволит обеспечить безопасную и надежную работу диффузионного насоса. В таблице 2.5 представлены наименования и некоторые характеристики применяемых датчиков.

Таблица 2.5 – Характеристики датчиков применяемых в автоматизированной системе создания вакуума

№ п/п	Наименование	Тип	Диапазон измеряемой величины	Диапазон измеряемой величины	Напряжение питания	Масса
1	2	3	4	5	6	7
1	Датчик низкого вакуума	<i>Thyracont VSP63MA4</i>	от 750 до $8 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст.	от 0,5 до 8,5 В	от +15 до 30 В	120 г.
2	Датчик высокого вакуума	<i>AIGX – S – DN16CF</i>	от $5 \cdot 10^{-10}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст.	от 0,7 до 8,7 В	от +14,5 до 30 В	300 г.
3	Датчик температуры	<i>PT1000</i>	от – 50 до 150 °С	от 800 до 1600 Ом	–	100 г

Исходя из представленных характеристик, для измерительной схемы необходимо обеспечить рабочее напряжение около ± 15 В. Для преобразования выходных сигналов датчика и использования их в дальнейшем в схеме автоматизированной системы создания вакуума воспользуемся схемами на операционных усилителях (ОУ). Подключение датчиков в измерительной схеме представлена на рисунке 2.5.

Компаратор – это устройство, предназначенное для сравнения каких-либо величин (от лат. *comparare* – «сравнивать»).

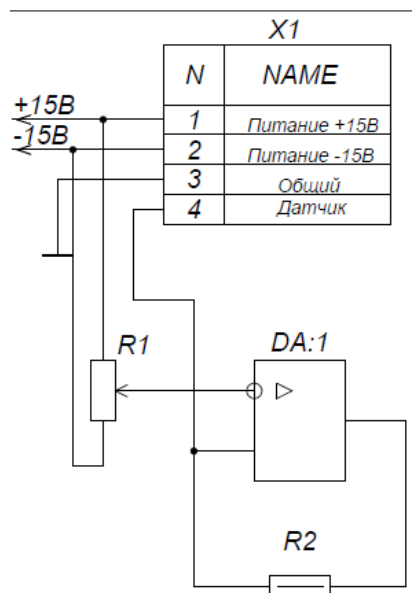


Рисунок 2.5 – Подключение датчика по схеме компаратора

Является операционным усилителем с большим коэффициентом умножения. Имеет входы: прямой и инверсный. При необходимости опорный сигнал может быть подключен к любому из них.

На один из входов подается постоянный сигнал, который называется опорным. Он используется как образец для сравнения. Ко второму поступает испытуемый сигнал. На выходе стоит транзистор, меняющий свое состояние в зависимости от условий:

- напряжение прямого входа выше инверсного – транзистор открыт.
- напряжение инверсного входа выше прямого – закрыт.

Соответственно, выходное напряжение меняется скачком от минимума до максимума, или наоборот [5].

Измерительная схема представлена на рисунке 2.6.

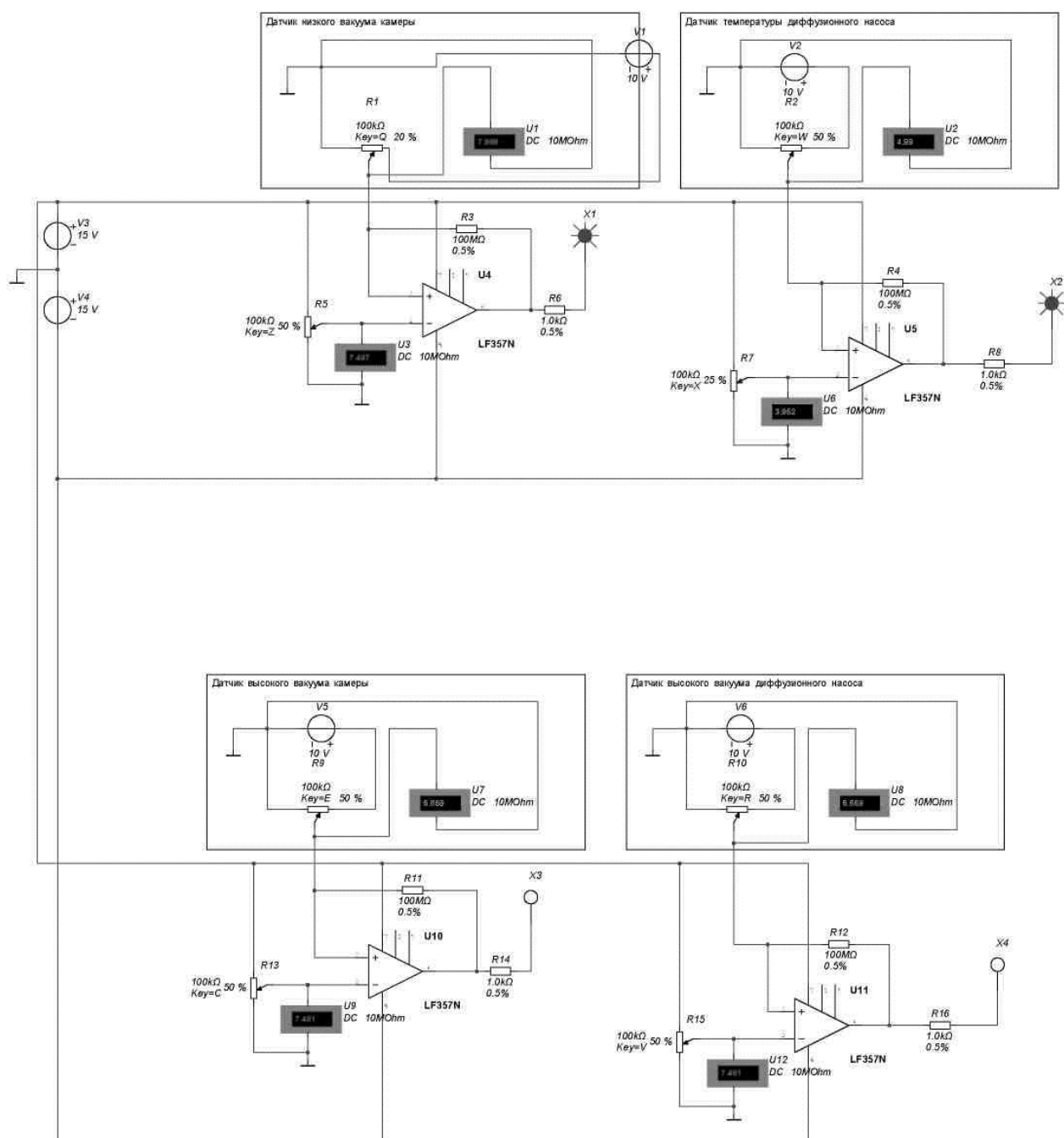


Рисунок 2.6 – Измерительная схема технологических параметров

Полученная модель измерительной схемы с учетом подбора некоторых электрических параметров позволяет с высокой точностью моделировать реальные измерительные сигналы, которые применяются в установке УВН-71П-3, а подстроечные резисторы обеспечивают высокую настройку аналоговых сигналов.

3 Проектирование автоматической системы процесса напыления пленок

3.1 Микропроцессорное управление установками для напыления пленок

Современные установки для формирования тонкопленочных покрытий представляют собой сложные технологические комплексы, требующие прецизионного управления многочисленными подсистемами. Высокие требования к точности технологических параметров при осаждении пленочных структур делают критически важным исключение любых случайных отклонений от заданных режимов. Практика показывает, что при ручном управлении подобными установками существенная доля технологического брака и потерь материала обусловлена человеческим фактором.

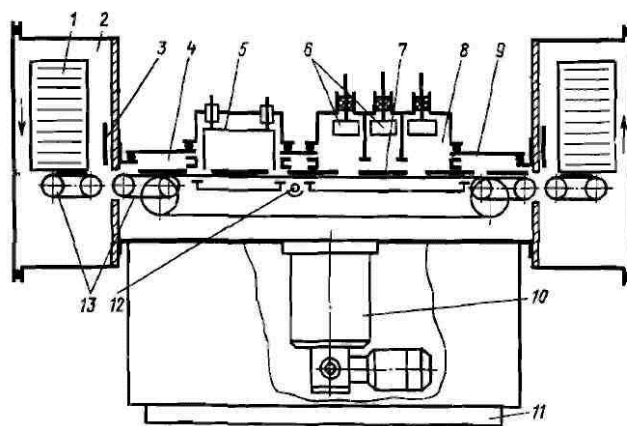
Современные подходы к автоматизации управления установками вакуумного напыления, базирующиеся на микропроцессорной технике, позволяют существенно повысить стабильность технологических процессов. Микропроцессорные системы управления (МСУ) обеспечивают комплексное решение следующих задач: поддержание оптимальных технологических параметров, влияющих на электрофизические характеристики формируемых пленок; управление всеми стадиями обработки подложек; реализацию вспомогательных операций; обеспечение безопасности персонала и оборудования; непрерывный мониторинг состояния технологической системы. Качество выполнения этих функций определяется архитектурными особенностями системы управления, используемым аппаратным обеспечением и характером взаимодействия между компонентами системы.

В состав типовой МСУ входят следующие основные компоненты: программируемые логические контроллеры различного уровня сложности; датчиковый комплекс с нормирующими преобразователями сигналов; силовые преобразовательные устройства; интерфейсные модули операторского управления. Современные системы управления могут быть реализованы по

централизованной или распределенной архитектуре. Централизованные системы характеризуются концентрацией всех функций управления в едином вычислительном узле, что обеспечивает возможность управления несколькими технологическими установками, но создает сложности при масштабировании системы. Распределенные архитектуры предполагают наличие автономных контроллеров для отдельных технологических модулей, что упрощает конструкцию каждого компонента системы и повышает ее надежность.

Современные микропроцессорные системы управления обеспечивают интуитивно понятное взаимодействие оператора с технологическим оборудованием через специализированные интерфейсы. Стандартный набор средств отображения информации включает мнемосхемы с световой индикацией состояния оборудования и алфавитно-цифровые дисплеи для отображения технологических параметров. В последние годы широкое распространение получили графические цветные дисплеи, позволяющие визуализировать технологический процесс и оперативно идентифицировать критические отклонения параметров.

Типичным примером реализации микропроцессорной системы управления является блок БУ-3 «Орион-3», широко применяемый в микроэлектронной промышленности. Данное устройство выпускается в нескольких модификациях, различающихся количеством обслуживаемых каналов контроля и управления. В качестве конкретного примера можно рассмотреть систему управления установкой УВНМЭ-100/125-003, где блок «Орион-3» в комплексе с контроллером «Логикон» и релейными модулями обеспечивает точное управление температурными режимами обработки подложек с возможностью программной стабилизации параметров нагрева.



1 – кассета, 2 – входной шлюз, 3 – затвор, 4 – рабочая камера,
 5 – ВЧ-источник, 6 – магнетрон, 7 – подложка, 8 – камера, нанесения
 пленки, 9 – крышка, 10 – криогенный насос, 11 – каркас,
 12 – нагреватель, 13 – конвейер

Рисунок 3.1 – Установка непрерывного действия

В целях предотвращения термических повреждений элементов рабочей камеры реализована многоуровневая система защиты. При отсутствии циркуляции охлаждающей жидкости специальный датчик формирует сигнал, инициирующий аварийную блокировку системы. Текущие параметры работы нагревательных элементов, включая значения рабочих токов и возможные нештатные ситуации, непрерывно отображаются на операторском дисплее в режиме реального времени.

Блок управления «Орион-3» осуществляет прецизионный контроль мощности магнетронных источников на основе анализа сигналов от датчиков тока и напряжения. Параллельно система обеспечивает стабилизацию давления рабочего газа (аргона) в процессе формирования пленочных покрытий. Для оценки остаточного ресурса мишени применяется алгоритм расчета накопленной энергии на катоде, с визуализацией результата в процентном выражении на дисплейной панели.

Мониторинг состояния пневматической системы, ответственной за работу клапанных приводов вакуумной системы, осуществляется посредством анализа сигналов датчиков давления. Функции управления шлюзовыми ме-

ханизмами распределены между релейными блоками и контроллером «Логикон», в то время как блок «Орион-3» выполняет диагностику их работы и формирует управляющие команды на основании данных позиционных датчиков. Система ведет точный учет обрабатываемых подложек, используя информацию от датчиков, установленных в приемной зоне конвейерной линии.

Контроллер «Логикон» управляет транспортировочными механизмами шлюзовой камеры. При превышении временного интервала в 100 с на выполнение операции загрузки система генерирует аварийное сообщение. Механизм кассетной подачи активируется по сигналу датчика присутствия подложки, с последующим позиционированием для приема следующего изделия. Блок «Орион-3» осуществляет временной контроль технологического цикла, сравнивая фактическое время обработки с расчетными параметрами, что позволяет автоматически определять завершение производственной партии.

Скоростные параметры конвейерной линии регулируются блоком «Орион-3» с обеспечением стабилизации заданного режима движения и индикацией текущих значений на дисплее. Вакуумная система находится под управлением комплекса, включающего контроллер «Логикон» и релейные модули, с одновременным отображением параметров давления в различных технологических зонах.

В режиме настройки оператору доступно задание ключевых параметров процесса:

- геометрические параметры конвейерного перемещения;
- скоростные характеристики транспортировки;
- тепловые режимы нагревательных элементов;
- параметры газовой среды в рабочей камере;
- энергетические характеристики магнетронного источника;
- контроль ресурсных показателей мишени.

Диагностический модуль системы осуществляет непрерывный мониторинг состояния оборудования, формируя информационные сообщения о различных нештатных ситуациях, включая отсутствие сжатого воздуха, положение затворных механизмов и состояние загрузочных кассет.

3.2 Микроконтроллеры серии 8051

Рассмотрим ключевые функциональные узлы микроконтроллера 8051/8052 и их принцип работы (см. рисунок 3.2). Также кратко опишем системные инструкции микроконтроллеров этой серии [7].

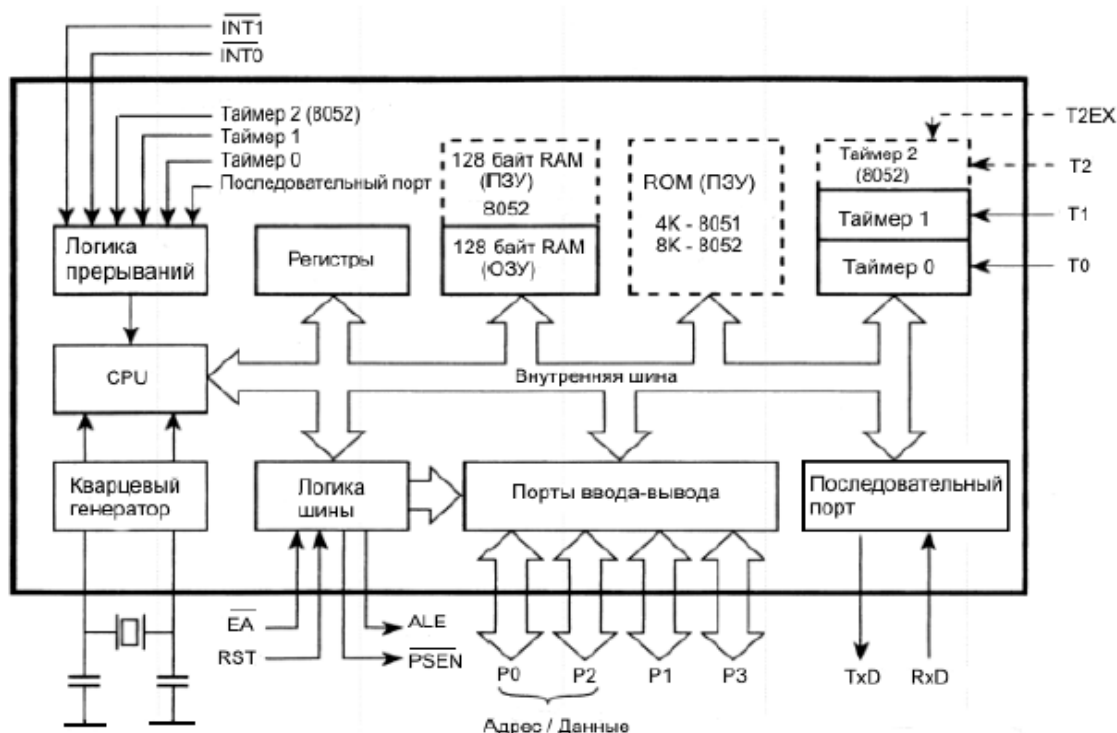


Рисунок 3.2 – Микроконтроллера серии 8051

В микроконтроллере 8051 все вычисления выполняются в арифметико-логическом устройстве, которое является частью базового модуля микропроцессора (МП). Обмен данными, хранящимися в оперативной памяти микроконтроллера, а также выполнение команд чтения осуществляется по внутренней шине 8051. Через эту же шину осуществляется обмен данными с пор-

тами ввода/вывода ($P0 - P3$), последовательными портами и таймерами. Контроллер внутренней шины генерирует сигналы (EA , ALE , $PSEN$, RD/WR), необходимые для работы с внешней памятью, а также сигнал сброса RST .

Микроконтроллер 8051 предназначен для работы в системах реального времени, которые могут генерировать сигналы, требующие немедленной реакции. Для обработки таких событий используется аппаратная логика прерываний, позволяющая реагировать на сигналы от внешних источников, таймеров и последовательных портов.

Скорость работы систем на базе 8051 колеблется от единиц до десятков мегагерц, в зависимости от тактовой частоты кристалла. В архитектуру классического микроконтроллера 8051 были внесены изменения, такие как добавление третьего таймера и расширение внутренней памяти, что привело к созданию более популярных устройств 8052.

Микроконтроллер 8051 представлен в виде однокристалльного устройства с внешними выводами, как показано на рисунке 3.3. Входные и выходные сигналы микроконтроллера 8051 имеют следующие назначения:

- $XTAL$ и $XTAL2$ – входы для подключения кварцевого резонатора, обеспечивающего генерацию тактовой частоты;
- $PSEN$ – сигнал для обращения к внешней памяти программ;
- ALE – выходной сигнал для фиксации адреса при обращении к внешней памяти;
- EA – сигнал, блокирующий доступ к внутренней памяти;
- RST – общий сброс;
- $P0 - P3$ – выводы портов ввода/вывода;
- Vss и Vcc – выводы для подачи питания.

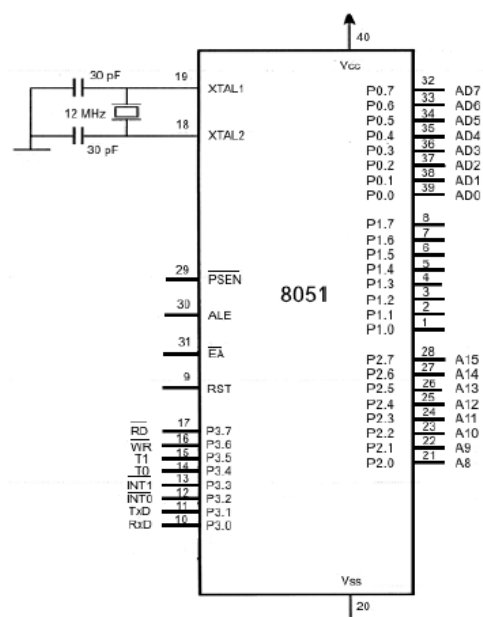


Рисунок 3.3 – Микроконтроллер серии 8051

Порты *P0*, *P2* и *P3* могут выполнять дополнительные функции в зависимости от аппаратной конфигурации. Например, порт *P0* используется для передачи младших 8 бит 16-разрядного адреса при обращении к внешней памяти, а порт *P2* – для старших 8 бит.

Выводы порта *P3* имеют следующие альтернативные назначения:

- P3.0* – вход для приема данных в последовательный порт;
- P3.1* – выход для передачи данных с последовательного порта;
- P3.2* – вход внешнего прерывания *INT0*;
- P3.3* – вход внешнего прерывания *INT1*;
- P3.4* – вход управления таймером 0;
- P3.5* – вход управления таймером 1;
- P3.6* – выход сигнала записи в память;
- P3.7* – выход сигнала чтения из памяти.

Для использования альтернативных функций порта *P3* необходимо соответствующим образом настроить программное обеспечение системы 8051.

Микроконтроллеры серии 8051 имеют *CISC*-архитектуру и стандартный набор инструкций. Система инструкций 8051 включает 111 базовых команд размером от одного до трех байт, большинство из которых являются одно- или двухбайтовыми. Большинство инструкций выполняются за один или два машинных цикла, что соответствует времени выполнения от 1 до 2 мкс при тактовой частоте 12 МГц, за исключением инструкций умножения и деления, для которых требуется четыре машинных цикла.

Команды микроконтроллера 8051 используют различные методы адресации: прямую, непосредственную, косвенную и неявную. Операндами команд могут выступать отдельные биты, комбинации из четырех бит (тетрады), байты или двухбайтовые слова.

Набор инструкций 8051 включает команды для выполнения специфических функций управления, таких как манипуляции с отдельными битами. Одной из особенностей системы является возможность обращения к отдельным битам в памяти данных и специальных функциональных регистрах.

По выполняемым функциям команды микроконтроллера 8051 можно классифицировать на несколько групп:

- пересылка данных;
- арифметические операции;
- логические операции;
- операции над битами;
- передача управления.

Рассмотрим эти группы команд более подробно, но перед этим условимся при описании мнемоники команд использовать следующие обозначения:

- Rn ($n = 0...7$) – регистр общего назначения в выбранном банке регистров;

- $@Ri$ ($i = 0, 1$) – регистр общего назначения в выбранном банке регистров, используемый для формирования косвенного адреса;
- *addr* – адрес байта;
- *src* – адрес байта-источника;
- *dst* – адрес байта-приемника;
- *addr11* – 11-разрядный абсолютный адрес перехода;
- *addr16* – 16-разрядный абсолютный адрес перехода;
- *label* – относительный адрес перехода;
- *#direct8* – непосредственный операнд размером 1 байт;
- *#direct16* – непосредственный операнд размером 2 байта;
- *bit* – адрес прямо адресуемого бита;
- $\sim bit$ – инверсия прямо адресуемого бита;
- *A* – регистр-аккумулятор;
- *PC* – регистр-счетчик команд;
- *DPTR* – 16-разрядный регистр-указатель данных;
- $()$ – содержимое ячейки памяти или регистра.

Команды пересылки данных микроконтроллера 8051 включают 28 команд, краткое описание которых приведено в таблице 3.1.

Команда *MOV* в микроконтроллерах 8051 используется для переноса данных из второго операнда в первый. Однако стоит отметить, что эта команда не может работать с данными, хранящимися во внешней памяти. Для работы с внешней памятью данных используется команда *MOVX*, которая позволяет считывать и записывать байты из внешней памяти. В то время как команда *MOVC* предназначена для работы с константами, хранящимися в памяти программ, и позволяет считывать байты из этой памяти.

Команда *XCH* (обмен) позволяет обменивать данные между аккумулятором и ячейкой памяти, а команда *XCHD* осуществляет обмен данных между младшими тетрадами (битами от 0 до 3) аккумулятора и ячейкой памяти.

Таблица 3.1 – Команды пересылки данных

Мнемоника	Описание
<i>MOV A, Rn</i>	$(A) \leftarrow (Rn)$
<i>MOVA, addr</i>	$(A) \leftarrow (addr)$
<i>MOV A, @Ri</i>	$(A) \leftarrow ((Ri))$
<i>MOV A, #direct8</i>	$(A) \leftarrow \#direct8$
<i>MOV Rn, A</i>	$(Rn) \leftarrow (A)$
<i>MOV Rn, addr</i>	$(Rn) \leftarrow (addr)$
<i>MOV Rn, #direct8</i>	$(Rn) \leftarrow \#direct8$
<i>MOV addr, A</i>	$(addr) \leftarrow (A)$
<i>MOV addr, Rn</i>	$(addr) \leftarrow (Rn)$
<i>MOV dst, src</i>	$(dst) \leftarrow (src)$
<i>MOV addr, @Ri</i>	$(addr) \leftarrow ((Ri))$
<i>MOV addr, #direct8</i>	$(addr) \leftarrow \#direct8$
<i>MOV @Ri, A</i>	$((Ri)) \leftarrow (A)$
<i>MOV @Ri, addr</i>	$((Ri)) \leftarrow (addr)$
<i>MOV @Ri, #direct8</i>	$((Ri)) \leftarrow \#direct8$
<i>MOV DPTR, #direct16</i>	$(DPTR) \leftarrow \#direct16$
<i>MOVC A, @A+DPTR</i>	$(A) \leftarrow ((A) + (DPTR))$
<i>MOVC A, @A+PC</i>	$(PC) \leftarrow (PC+1), (A) \leftarrow ((A)+(PC))$
<i>MOVX A, @Ri</i>	$(A) \leftarrow ((Ri))$
<i>MOVX A, @DPTR</i>	$(A) \leftarrow ((DPTR))$
<i>MOVX @Ri, A</i>	$((Ri)) \leftarrow (A)$

Продолжение таблицы 3.1

<i>MOVX @DPTR, A</i>	$((DPTR)) \leftarrow (A)$
<i>PUSH addr</i>	$(SP) \leftarrow (SP) + 1, ((SP)) \leftarrow (addr)$
<i>POPaddr</i>	$(addr) \leftarrow ((SP)), (SP) \leftarrow (SP) - 1$
<i>XCH A, Rn</i>	$(A) \leftrightarrow (Rn)$
<i>XCH A, addr</i>	$(A) \leftrightarrow (addr)$
<i>XCH A, @Ri</i>	$(A) \leftrightarrow ((@Ri))$
<i>XCHD A, @Ri</i>	$(A0 - 3) \leftrightarrow ((@Ri0 - 3))$
<i>MOV A, Rn</i>	$(A) \leftarrow (Rn)$

Для работы со стеком используются команды *PUSH* и *POP*. Команда *PUSH* записывает данные в стек, а команда *POP* считывает данные из стека. Размер стека ограничен только размером встроенной памяти данных. При инициализации микроконтроллера после сигнала сброса или подачи питания указатель стека *SP* инициализируется значением 07h, что означает, что первый элемент стека будет помещен в ячейку памяти по адресу 08h.

Важно отметить, что в группе команд передачи данных отсутствуют команды для работы с регистрами специальных функций, таких как таймеры и порты ввода-вывода. Доступ к таким регистрам осуществляется либо напрямую по адресу, либо с помощью мнемоник, записанных в специальном файле.

Регистры-аккумуляторы имеют два названия в зависимости от способа адресации: *A* – при неявной адресации (например, *MOV A, R0*) и *ACC* – при прямой адресации.

В рамках проекта по автоматическому напылению пленок для установки УВН-71П-3 будет использоваться микроконтроллер серии 8051, так как он соответствует всем необходимым характеристикам для реализации данной системой напыления. Это позволит эффективно обрабатывать данные и контролировать процесс напыления пленочных элементов электроники.

3.3 Пирометры промышленного назначения

Компактные цифровые пирометры компании *DIAS* специально разработаны для промышленного применения и предлагают широкий спектр возможностей для бесконтактного измерения температуры различных поверхностей.

Модели *DS 40N / DG 40N*:

- температурный диапазон: от 250 °C;
 - типы поверхностей: металлы, керамика, графит;
 - измерительная точка: настраивается от 1,2 мм;
 - время отклика: всего 10 мс (t_{95});
 - корпус: прочный, из нержавеющей стали, подходит для жестких условий.
- интерфейс: *USB* на задней панели для настройки параметров излучения, температурного диапазона, хранения данных и времени отклика. Важно отметить, что в этом режиме текущий выход (4...20 мА) и световказатель не работают без дополнительного питания.

Модели *DSF 40N / DGF 40N*:

- температурный диапазон: от 250 °C;
- типы поверхностей: металлы, керамика, графит;
- измерительная точка: минимальный размер всего 0,7 мм;
- время отклика: 10 мс (t_{95});
- интерфейс: аналогичный предыдущим моделям, с *USB* для настройки, но также требует дополнительного питания для работы текущего выхода и световказателя;
- указатель: встроенный светодиодный или лазерный для точного фокусирования на объекте.

Модели *PYROSPOT DT 40L / DT 40G / DT 40F*:

- температурный диапазон: от -40 до 2500 °C;
- спектральный диапазон *DT 40L*: $8 \dots 14$ мкм (для не металлических или покрытых металлическими поверхностями);
- спектральный диапазон *DT 40G*: $5,14$ мкм (для стеклянных поверхностей);
- спектральный диапазон *DT 40F*: $3,9$ мкм (для измерения температуры через пламя);
- измерительная точка: настраивается от $1,6$ мм;
- время отклика: 60 мс (t_{95}), что позволяет использовать прибор для быстрых измерений;
- корпус: также из нержавеющей стали, устойчивый к жестким условиям.
- интерфейс: гальванически изолированный *USB* для настройки коэффициента излучения, дополнительного температурного диапазона и времени отклика.

Все модели пирометров *DIAS* функционируют на 2-проводной технологии, где оба провода одновременно используются для питания устройства и передачи данных. Измеряемое ИК-излучение преобразуется в стандартный линейный сигнал $4 \dots 20$ мА, что упрощает интеграцию в различные измерительные и контролирующие системы. Устройства также оснащены светодиодным или лазерным целеуказателем для более точных измерений.

На основании описанных данных выше выбираем следующие пирометры для дистанционного измерения температуры (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Пирометр для дистанционного измерения температуры модели *DIAS*

Для измерения температуры подложки применим пирометр типа *PYROSPOT DT 40L*, технические характеристики которого представлены ниже:

- измерительный диапазон температуры составляет от 0 до 1000 °C
- дополнительный диапазон регулируется в рамках температуры с минимальным шагом 50 °C;
- диапазон спектра составляет от 8 до 14 мкм;
- масштабирование 50 : 1;
- оптика составляет 100, 300, 800, 2000;
- коэффициент излучения от 0,200 до 1,000, настраивается через *USB* интерфейс;
- время отклика t_{95} 60 мс (мин.), настраивается до 100 с через *USB*;
- погрешность измерений 1 % от полученного значения в °C или 1 K;
- воспроизводимость 0,5 % от полученное значения в °C или 0,5 K;
- тепловая чувствительность менее 0,1 K;

– зависимость от внешних температурных помех) менее $0,3 \text{ K}/\Delta T_u = 10 \text{ K}$;

– выходной сигнал от 4 до 20 мА, переключаемый, линейный, максимальная нагрузка 600 Ом при напряжении 24 В.

Для измерения температуры испарения исходной загрузки применим пирометр типа *PYROSPOT DT 40G*, технические характеристики которого представлены ниже:

– измерительный диапазон температуры составляет от 500 до 2500 °С

– дополнительный диапазон регулируется в рамках температурного диапазона, минимальный шаг 50 °С;

– диапазон спектра 5 мкм;

– масштабирование 50 : 1;

– оптика 100, 300, 800;

– коэффициент излучения от 0,200 до 1,000, настраивается через USB интерфейс;

– время отклика t_{95} 60 мс (мин.), настраивается до 100 с через *USB*;

– погрешность измерений 1 % от полученного значения в °С или 1 К;

– воспроизводимость 0,5 % от полученного значения в °С или 0,5 К;

– тепловая чувствительность менее 0,1 К;

– зависимость от внешних температурных помех) менее $0,3 \text{ K}/\Delta T_u = 10 \text{ K}$;

– выходной сигнал от 4 до 20 мА, переключаемый, линейный, максимальная нагрузка 600 Ом при напряжении 24 В.

3.4 Моделирование работы пирометров

Пирометр – прибор для бесконтактного измерения температуры твердых тел. Принцип действия основан на измерении мощности теплового излучения объекта преимущественно в диапазонах инфракрасного излучения и видимого света [8].

Для комплексного моделирования работы вакуумной установки, и в частности процессом автоматического напыления разработаем схему для моделирования измерения значения температуры подложки. Т. к. согласно техническим характеристикам, диапазон измеряемого сигнала варьируется от 4 до 20 мА, максимальная нагрузка 600 Ом и напряжения питания 24 В, то по закону Ома рассчитаем необходимый диапазон измеряемого напряжения для дальнейшего преобразования его в аналого-цифровом преобразователе.

$$U_{min} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 600 \text{ Ом} = 2,4 \text{ (В)}, \quad (3.1)$$

$$U_{max} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 600 \text{ Ом} = 12 \text{ (В)}. \quad (3.2)$$

На рисунке 3.5 представлена электрическая схема обеспечивающая изменение напряжения в диапазоне от 2,4 В до 12 В.

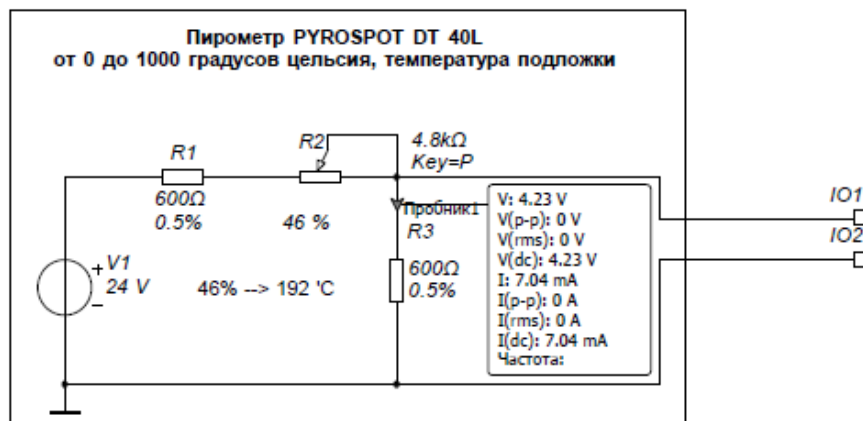


Рисунок 3.5 – Модель пирометра *PYROSPOT DT 40L*

Для преобразования данного напряжения в двоичный код воспользуемся восьмибитным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) для управления процессом напыления. Ввиду того, что пирометр *DT 40L* осуществляет измерения температуры в диапазоне от 0 до 1000 °C, а восьмибитный преобразователь составляет 255. Рассчитаем коэффициент преобразования по следующей последовательности градус – напряжение – код. Вычислим коэффициент преобразования градусов в напряжение:

$$k_1 = \frac{U_{max} - U_{min}}{T_{max} - T_{min}} = \frac{12B - 2,4B}{1000^{\circ}C - 0^{\circ}C} = 9,6 \cdot 10^{-3}. \quad (3.3)$$

Вычислим следующий коэффициент преобразования напряжения в код:

$$k_2 = \frac{255 - 0}{U_{max} - U_{min}} = \frac{255}{12B - 2,4B} = 26,563. \quad (3.4)$$

Вычислим общий коэффициент прямого и обратного преобразования, которой будет применяться в процессе разработки автоматической системы напыления:

$$k_{прпод} = k_1 \cdot k_2 = 9,600 \cdot 10^{-3} \cdot 26,563 = 0,255, \quad (3.5)$$

$$k_{обрпод} = \frac{1}{k_{пр}} = \frac{1}{0,255} = 3,922 \approx 4. \quad (3.6)$$

По аналогии с предыдущим примером рассчитаем коэффициент преобразования для пирометра *DT 40G*. Согласно техническим характеристикам диапазон измерения температуры составляет от 500 до 2500 °C. Вычислим все необходимые коэффициенты преобразования:

$$k_3 = \frac{U_{max} - U_{min}}{T_{max} - T_{min}} = \frac{12B - 2,4B}{2500^{\circ}C - 500^{\circ}C} = 4,8 \cdot 10^{-3}, \quad (3.7)$$

$$k_4 = \frac{255 - 0}{U_{max} - U_{min}} = \frac{255}{12B - 2,4B} = 26,563, \quad (3.8)$$

$$k_{пр исп} = k_3 \cdot k_4 = 4,800 \cdot 10^{-3} \cdot 26,563 = 0,128, \quad (3.5)$$

$$k_{обр исп} = \frac{1}{k_{пр}} = \frac{1}{0,128} = 7,843 \approx 8. \quad (3.6)$$

На рисунке 3.6 представлена схема модели пирометра *DT 40G*.

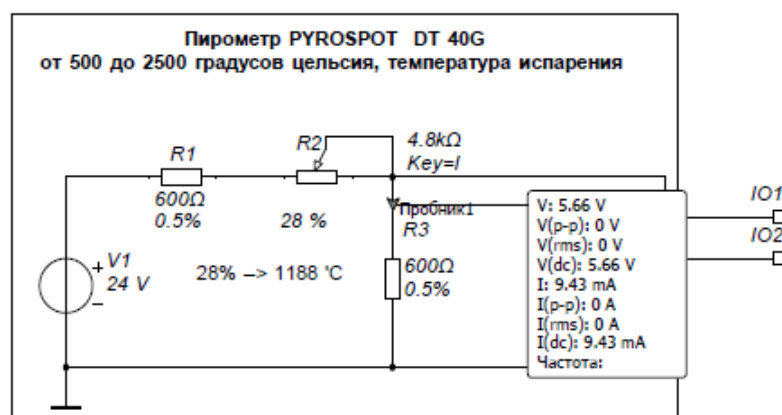


Рисунок 3.6 – Модель пирометра *PYROSPOT DT 40G*

Таким образом, полученные расчетным методом коэффициенты будут применяться в комплексном процессе автоматического напыления пленок методом термического испарения в вакууме на установке УВН-71П-3.

3.5 Разработка и моделирование схемы измерения параметров температуры

Автоматическое напыление пленок методом термического испарения осуществляется в следующем порядке:

- после откачки воздуха из подколпачного пространства создается высокий вакуум, который устанавливает оператор;
- после достижения необходимого вакуума осуществляется нагрев подложки для лучшей адсорбции напыляемой пленки электротехнического материала;
- следующим этапом осуществляется нагрев испарителя, в котором находится испаряемое вещество для осуществления конденсации на подложку;

- при достижении установленных температур подложки и испарителя соответственно, открывается заслонка на указанное количество времени для гарантированного обеспечения заданной толщины пленки;
- после окончания установленного времени заслонка закрывается, и охлаждается подложка с пленкой в вакууме;
- после охлаждения подложки осуществляется напуск воздуха по специальному клапану;
- далее извлекается подложка для продолжения и (или) завершения технологического процесса формирования элементов микроэлектроники.

Разработаем измерительную систему автоматического напыления пленок из материалов электроники. На рисунке 3.7 представлена измерительная схема для автоматического напыления пленок.

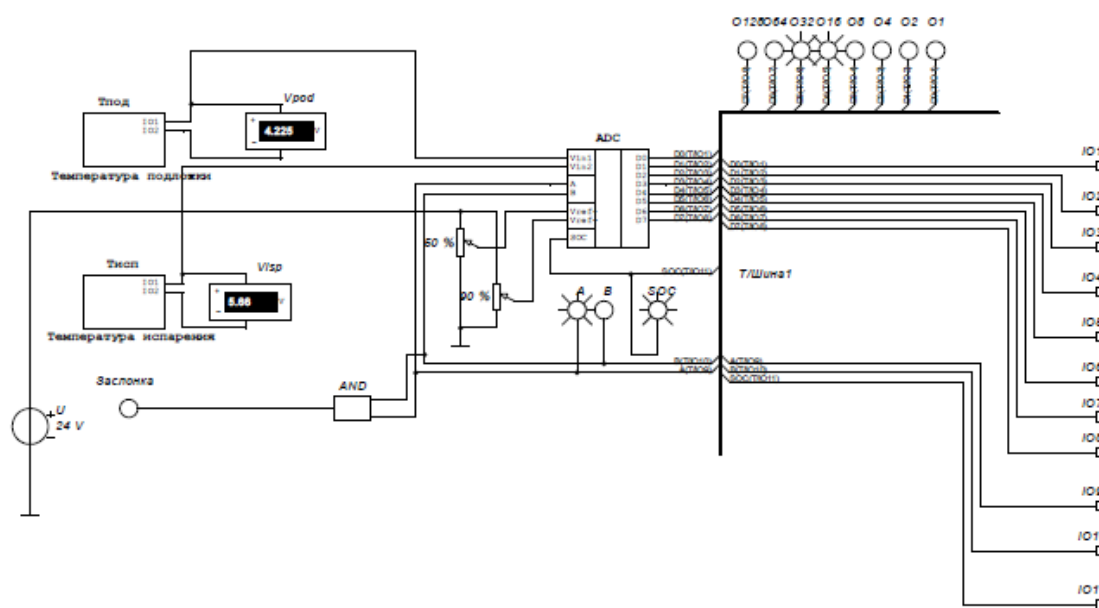


Рисунок 3.7 – Измерительная схема температуры подложки
для установки УВН-71 ПЗ

Данная схема представляет собой два блока, которые моделируют работу пирометров, $T_{\text{под}}$ относится к контролю температуры подложки, а $T_{\text{исп}}$ – температура испарителя. Эти блоки настраиваются в соответствии с описанием, обеспечивая контроль температур подложки и испарителя [9]. Также эта система обеспечивает контроль над управлением заслонки в установке УВН-71П-3 для задания установленной толщины пленки по временному интервалу. Полученные аналоговые сигналы с пирометров преобразуются в восьмибитный код с помощью АЦП и передаются на систему контроля автоматическим напылением пленок. АЦП представляет собой многоканальный преобразователь, который в зависимости от выбора адреса подключает тот или иной аналоговый канал к восьмибитному цифровому выводу. В качестве такого АЦП может быть применена схема аналого-цифрового преобразователя типа *ADC0808* или его аналог.

Измерение температур осуществляется следующим образом: если входа A и B подать нули ($A = B = 0$), то ничего не происходит и заслонка находится в положении «ЗАКРЫТО».

Если на вход A подать единицу ($A = 1$), а на вход B подать ноль ($B = 0$), то произойдет коммутация пирометра, который измеряет температуру подложки, с АЦП. При этом микроконтроллер начинает подавать на вход *SOC* единицу ($SOC = 1$), что означает для АЦП выполнить преобразования аналогового сигнала в цифровой и передать данные в микроконтроллер (рисунок 3.7). Полученный код немедленно передается в микропроцессор для дальнейшего преобразования.

Если на вход A подать ноль ($A = 0$), а на вход B подать единицу ($B = 1$), то осуществляется коммутация пирометра, который измеряет температуру испарения, с АЦП. Следующим этапом микроконтроллер подает единицу на вход *SOC* ($SOC = 1$), что означает преобразовать аналоговый сигнал в цифровой код и дальнейшая передача в микроконтроллер (рисунок 3.8).

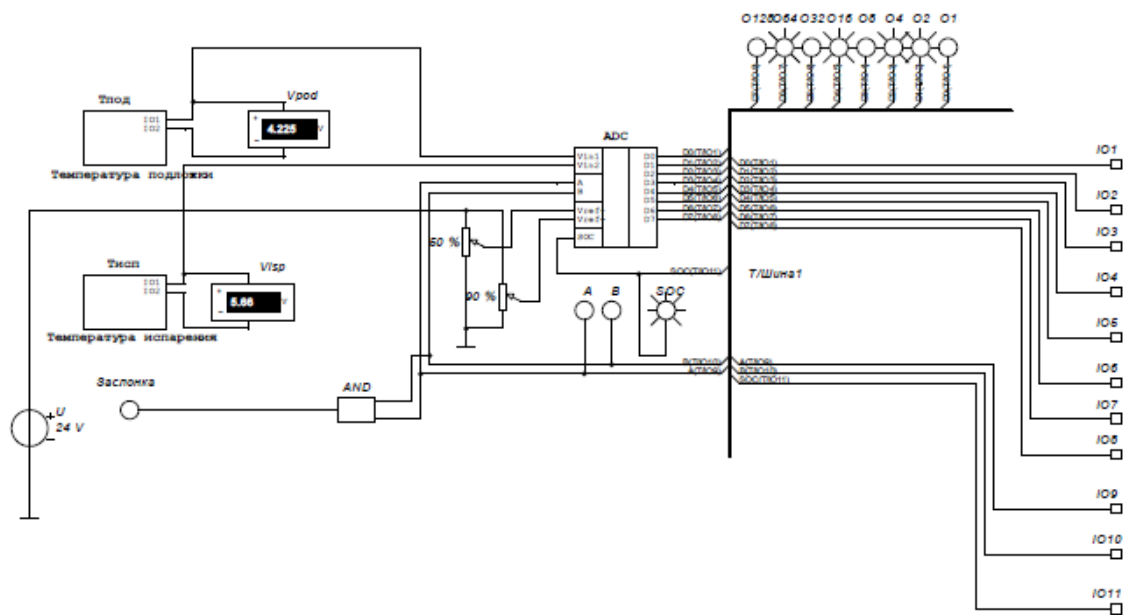


Рисунок 3.8 – Измерительная схема температуры испарения материала для установки УВН-71 ПЗ

Если на входы A и B подать единицы ($A = B = 1$), то подается сигнал на открытие заслонки положение «ОТКРЫТО» (рисунок 3.9) и осуществляется напыление испаряемого материала до завершения времени напыления, после чего снова на входы подаются нули.

3.6 Разработка автоматической системы напыления пленочных элементов электроники

Автоматическую систему напыления пленочных элементов для установки УВН-71П-3 реализуем на микропроцессоре 8051. Как было описано выше, время выполнения команд на данном микропроцессоре составляет от 1 до 2 мкс при частоте 12 МГц. Микропроцессор 8051 работает с двумя типами памяти: программной и данными. Память данных может быть реализована как сочетание статического ОЗУ, встроенного в кристалл (резидентного или on-chip), и внешних микросхем памяти. Для простых аппаратно-программных конфигураций, использующих 8051, зачастую достаточно резидентной памяти самого микроконтроллера [7].

Объем программной памяти может достигать максимума в 64 Кб, что связано с использованием 16-разрядной адресной шины. Однако в большинстве случаев объем программной памяти, встроенной в кристалл 8051, ограничен 4, 8 или 16 Кб. В программной памяти могут храниться не только команды, но и константы, управляющие слова инициализации, таблицы перекодировки входных и выходных переменных и другие данные. Доступ к содержимому программной памяти осуществляется через 16-битовую адресную шину [7].

Таким образом, микропроцессор 8051 с учетом своих характеристик подходит для реализации задуманной автоматической системы напыления пленок в качестве компонент микроэлектроники.

На рисунке 3.10 представлена схема автоматической системы напыления.

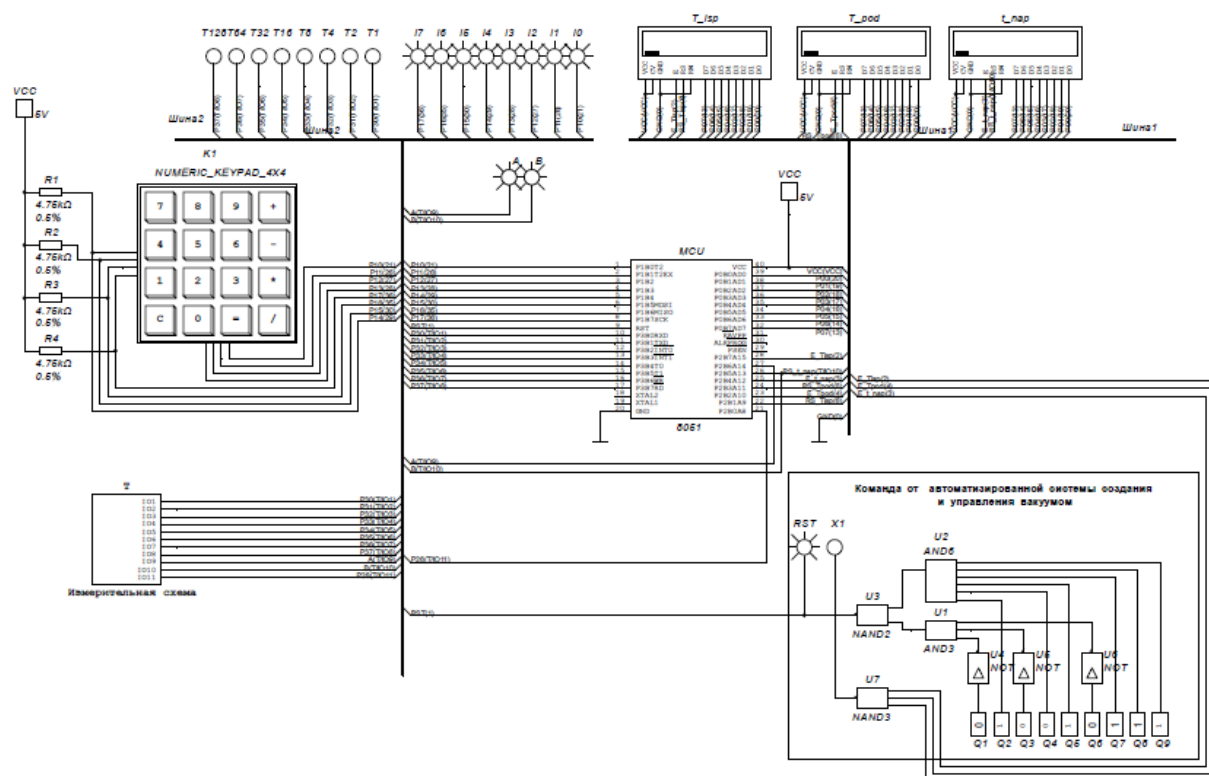


Рисунок 3.10 – Схема автоматической системы напыления
для установки УВН-71 ПЗ

Рассмотрим схему более подробно. Восемь индикаторов ($T_{128} - T_1$) представляю собой двоичное слово (8 бит информации) предназначенные для контроля данных полученных с измерительной схемы T в двоичной система счисления.

Следующие индикаторы $I_7 - I_0$ предназначены для контроля ввода информации для установки параметров напыления с клавиатуры K_1 рисунок 3.10. Вводимая информация в микропроцессор MCU передается в виде двоичного слова (8 бит) и обрабатывается в соответствии с программой представленной в приложении В.

Клавиатура K_1 (рисунок 3.10) позволяет вводить установочные параметры для процесса напыления, а именно: температуру нагрева испарителя электротехнического материала в градусах Цельсия ($T_{исп}$), температуру нагрева подложки на которой будет конденсироваться электротехнический

материал в градусах Цельсия ($T_{\text{под}}$) и время напыления электротехнического материала в секундах ($t_{\text{нап}}$). Рассмотрим предназначения клавиш на клавиатуре K1:

- клавиши «0» – «9» – выполняют свое прямое предназначение для ввода установочных параметров;
- клавиша «C» – сброс ранее введенного значения;
- клавиша «=» – предназначена для ввода данных в микропроцессор;
- клавиша «+» – предназначена для установки температуры испарения исходной загрузки, °C;
- клавиша «-» – предназначена для установки температуры нагрева подложки, °C;
- клавиша «*» – предназначена установления времени напыления исходного материала на подложку, с;
- клавиша «/» – предназначена запуска автоматического процесса напыления.

Микропроцессор (*MCU*) является главным элементом схемы. Он осуществляет полный контроль процесса напыления пленочных элементов микроэлектроники на установке УВН-71П-3. Программа работы *MCU* представлена в приложении В. Программа микропроцессора разработана на языке программирования СИ, с использованием библиотеки 8051.h.

Жидкокристаллические (ЖК) монохромные дисплеи T_{isp} , T_{pod} , t_{nap} на схеме рисунка 3.10 предназначены для визуализации ввода установочных параметров и соответствующего контроля этих параметров в процессе напыления на установке УВН-71П-3. ЖК-дисплей T_{isp} отображает информацию о температуре испарения исходной загрузки. ЖК-дисплей T_{pod} предназначен для отображения информации о температуре подложки.

ЖК-дисплей t_{nap} предназначен для визуализации информации о времени напыления.

Измерительная схема (T) осуществляет измерения температур испарения исходной загрузки и подложки, а также управления заслонкой для напыления на установке УВН-71П-3, более подробная схема представлена на рисунке 3.7.

Блок команд от автоматизированной системы создания и управления вакуумом предназначен для контроля команды «СТАРТ» на выполнения процесса напыления. Система автоматического напыления ожидает команду о готовности вакуума в подколпачном пространстве установки УВН-71П-3. Когда вакуум еще не готов, то на микропроцессор приходит команда сброс, что подтверждается индикатором RST на рисунке 3.10. Микропроцессор находится в состоянии сброса и ни чего не происходит. После прихода сигнала сброс отключен, $RST = 0$, MCU начинает свою работу по автоматическому напылению пенкок.

Индикаторы A и B (рисунок 3.10) предназначены для управления измерительной схемой T .

3.7 Моделирование работы автоматической системы напыления

Пока вакуум в подколпачном пространстве установки УВН-71П-3 не достиг установленного значения, автоматическая система не работает (рисунок 3.10). После того, как вакуум достиг установленного оператором значения, автоматизированная система создания и управления вакуумом переходит в состояние a_6 (рисунок 2.4). На выходе в соответствии с алгоритмом работы автоматизированной системы создания и управления вакуумом (рисунок 2.2) будем иметь двоичный код:

$$\overline{Q1}Q2\overline{Q3}Q4Q5\overline{Q6}Q7Q8Q9 = 010110111, \quad (3.7)$$

который подается на блок команд, и на вход сброса микропроцессора подается ноль, $RST = 0$ (рисунок 3.11).

он может нажать клавишу «С» – очистить предыдущий ввод и повторить его заново, подтвердив правильность нажатием клавиши ввод.

Нажатие кнопки клавиатуры «—» оператор сообщает *MCU* свои намерения ввести параметр температуры нагрева подложки. Аналогичным образом, как для температуры испарения исходной загрузки, оператор подтверждает правильность ввода с помощью клавиши «=», в противном случае он может очистить ввод клавишей «С».

Нажатие клавиши «*» оператор сообщает *MCU*, что будет осуществлен ввод времени напыления материала на подложку. Также как и в предыдущих случаях оператор подтверждает правильность введенных данных нажатием клавиши ввод.

На рисунке 3.12 представлен ввод данных для процесса автоматического напыления электротехнического материала. Здесь видно, что оператор ввел следующую информацию: температура испарения исходной загрузки составляет $T_{\text{исп}} = 1212\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура нагрева подложки составляет $T_{\text{под}} = 210\text{ }^{\circ}\text{C}$ и время напыления электротехнического материала $t_{\text{нап}} = 15\text{ с}$. При этом, как видно из рисунка 3.12 заслонка закрыта, что подтверждается индикаторами *A* и *B* равные 0 и 0 соответственно.

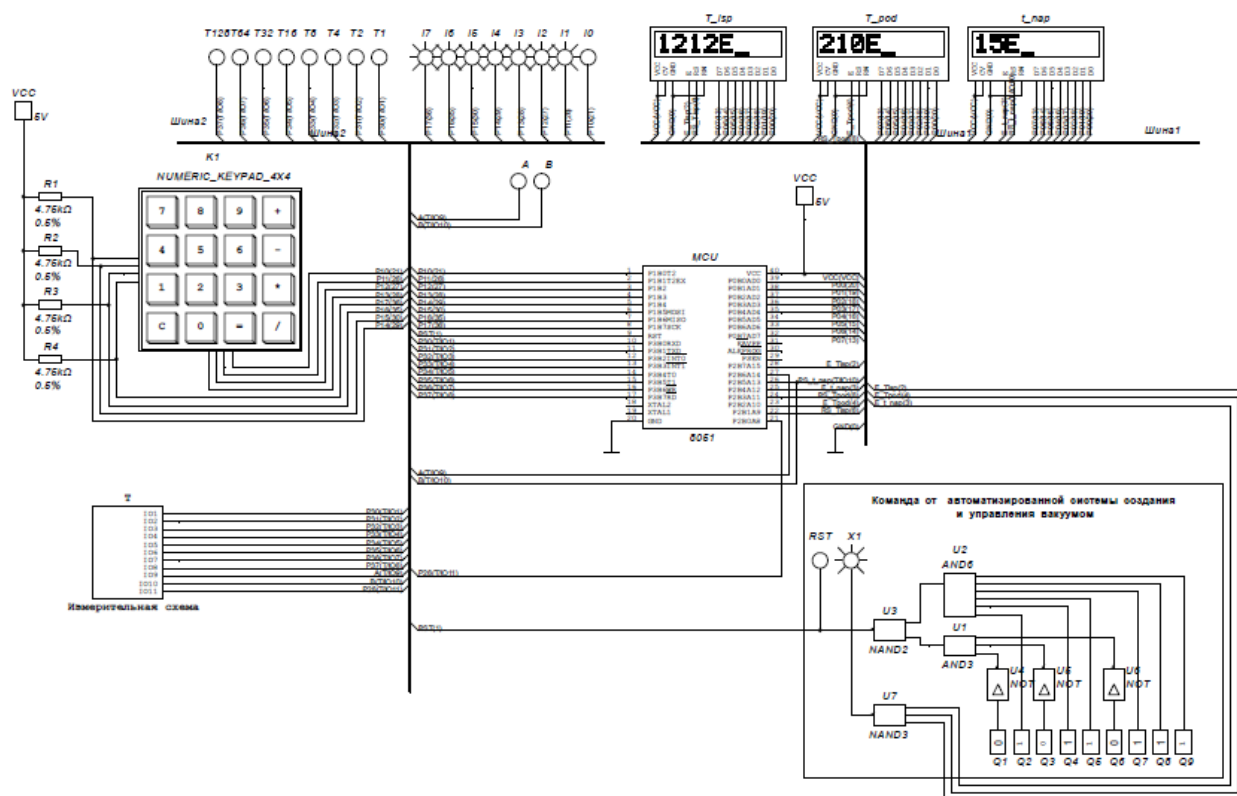


Рисунок 3.12 – Схема автоматической системы напыления, ввод параметров для напыления

Символ *E* на ЖК-дисплеях показывает, что данные переданы микропроцессору. Ввод параметров для напыления можно осуществлять в любой последовательности, т. к. *MCU* ожидает от оператора команду «СТАРТ» нажатием клавиши «/» для начала процесса автоматического напыления. На рисунке 3.12 видно, что при вводе параметров напыления оператором установки УВН-71П-3 символы на ЖК-дисплеях располагаются с левой стороны экрана.

После нажатия клавиши «/» оператор запускает процесс нагрева исходной загрузки и подложки соответственно. На рисунке 3.13 представлен процесс нагрева.

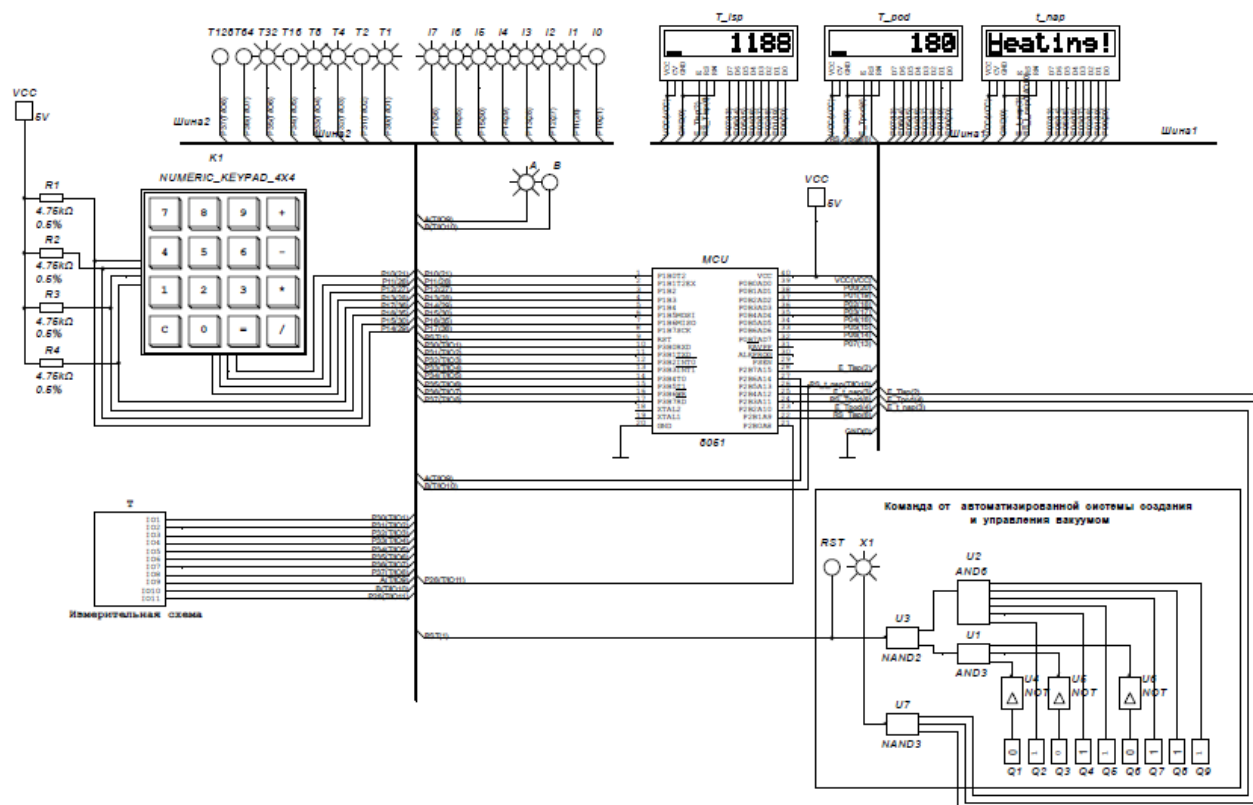


Рисунок 3.13 – Схема автоматической системы напыления, процесс технологического нагрева исходной загрузки и подложки соответственно

Как видно из рисунка 3.13 на ЖК-дисплеях отражается фактическая температура технологических параметров нагрева, а дисплей $t_{пар}$, сигнализирует оператору установки, что идет нагрев. Фактическая температура нагрева испарителя исходной загрузки для данного примера составляет 1188 °С, а температура подложки составляет 180 °С. Пока фактические температуры не достигли установленных значений, *MCU* поочередно опрашивает сигналы измеряемые промышленными пирометрами, которые установлены в подколпачном пространстве установки УВН-71П-3 через АЦП. На ЖК-дисплеях видно, что символы отображаются с правой стороны экрана, а это означает, что осуществляется фактическое измерение соответствующих технологических температур.

При достижении фактических технологических температур испарения исходной загрузки и подложки установленных значений начинается напыления материала (рисунок 3.14).

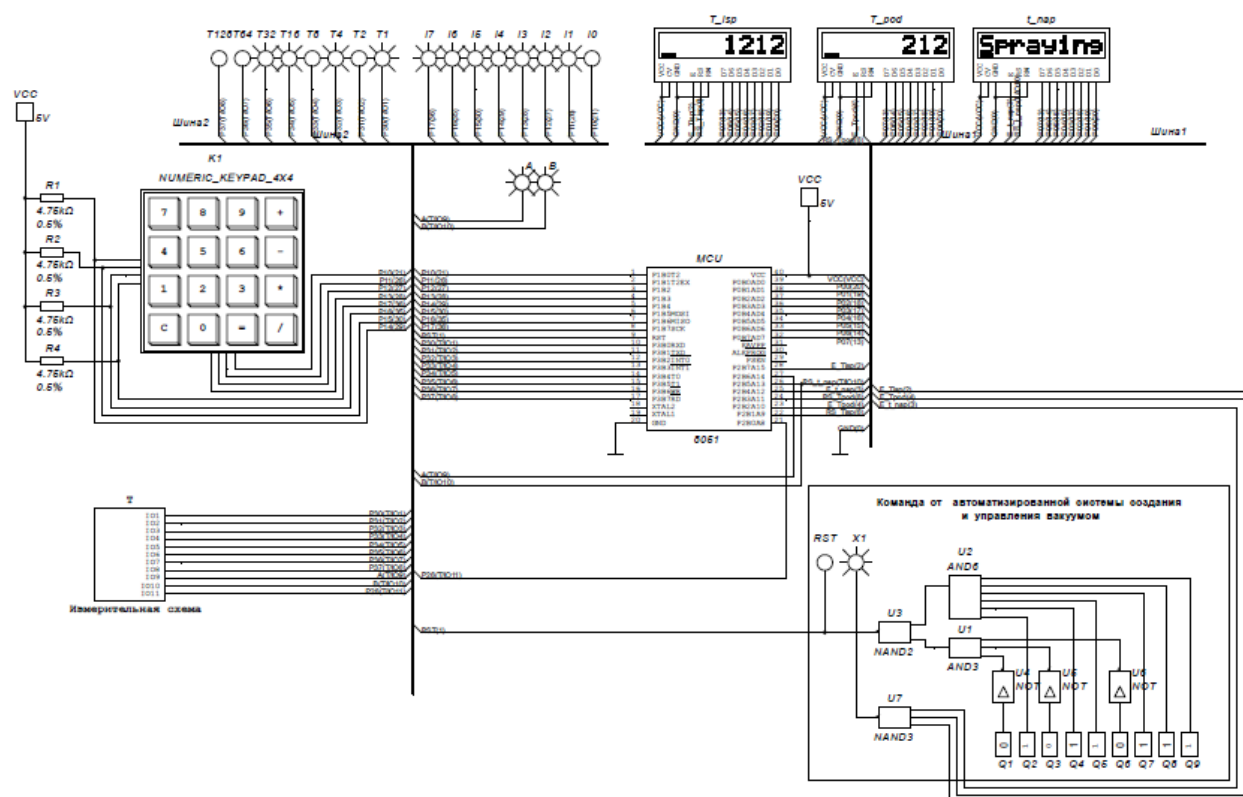


Рисунок 3.14 – Схема автоматической системы напыления, напыление электротехнического материала

Из рисунка 3.14 видно, что технологические температуры достигли установленных значений ($T_{\text{исп}} = 1212^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{под}} = 212^{\circ}\text{C}$), микропроцессор передает сигнал $A = 1$ и $B = 1$ в измерительную схему, заслонка открывается и осуществляется процесс напыления материала. При этом на ЖК-дисплее оператору высвечивается сообщение, что идет напыление. По истечению установленного времени напыления MCU передает сигналы сигнал $A = 0$ и $B = 0$ в измерительную схему, а следовательно заслонка закрывается (рисунок 3.15). На ЖК-дисплее отображается информация «стоп и конец», а микропроцессор передает сигнал $X1$ на остывание и завершения работы ав-

томатизированной системы создания и управления вакуумом в соответствии с алгоритмом представленном на рисунке 2.2.

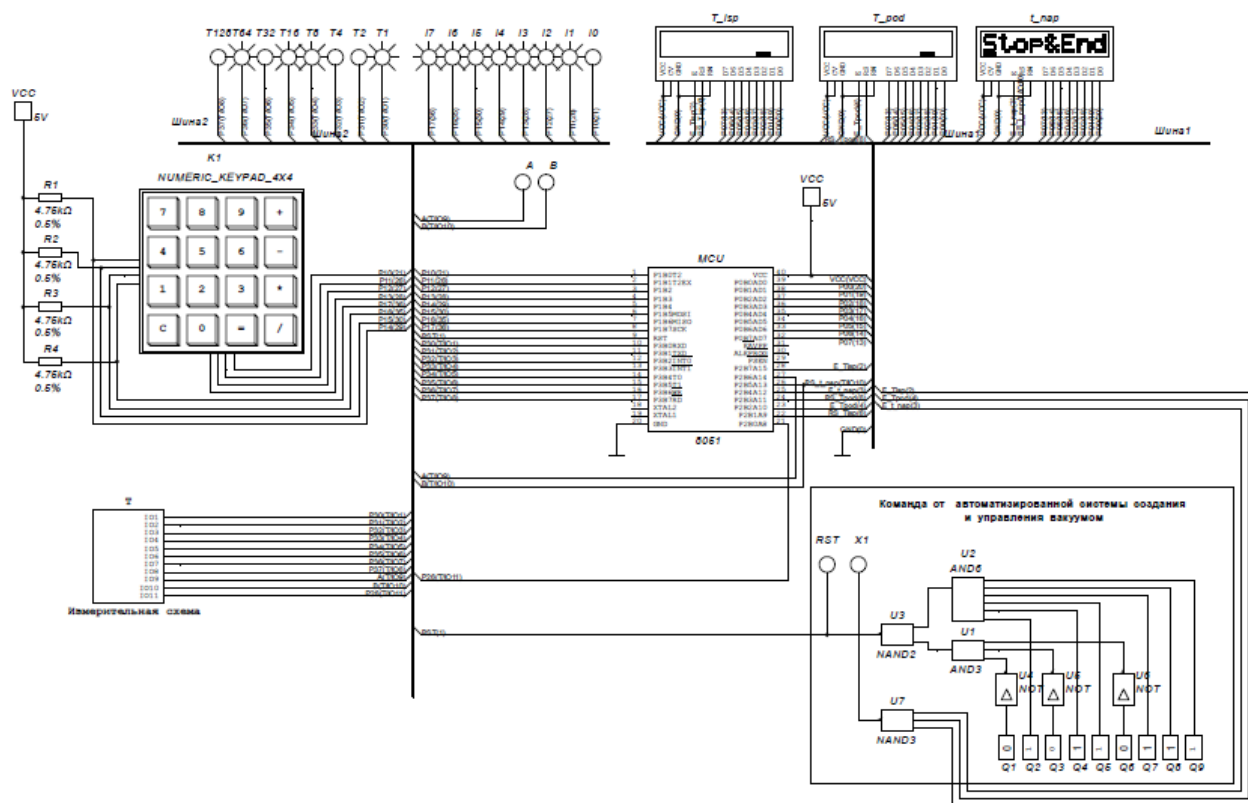


Рисунок 3.15 – Схема автоматической системы напыления, завершение напыления

Сигнал $X1 = 0$ (рисунок 2.2.), следовательно осуществляется завершение технологического процесса формирования элементов микроэлектроники методом термического испарения в вакууме. Далее полученное изделие извлекается из подколпачного пространства и отправляется на следующую технологическую операцию.

Таким образом, разработано и выполнено моделирование автоматического процесса напыления электротехнического материала методом термического испарения в вакууме на установке УВН-71П-3.

4 Безопасная эксплуатация установок термического вакуумного напыления

Установки вакуумного напыления предназначены для серийного производства многослойных пленочных микросхем, а также для отработки технологии их изготовления [6].

Конструктивно установка включает в себя:

- колпак с подколпачным устройством;
- вакуумную систему;
- систему водоохлаждения;
- электрооборудование;
- контрольно-измерительные приборы;
- установку питания электронно-лучевого испарителя;
- подвод азота.

4.1 Начало работы вакуумной установки

4.1.1 Исходное положение элементов управления

Все переключатели и регуляторы с фиксированными положениями "Включено"/"Выключено" должны быть установлены в положение "Выключено". Ручка высоковакуумного затвора должна находиться в нижнем положении, соответствующем закрытому состоянию.

4.1.2 Запуск системы охлаждения

Перед началом эксплуатации установки необходимо открыть запорный вентиль подачи охлаждающей воды для обеспечения теплоотвода от рабочих узлов оборудования.

4.1.3 Последовательность включения питания

Процедура активации системы питания выполняется в следующем по-

рядке:

- 1) Активировать тумблер "Питание" на правой боковой панели управления;
- 2) Включить главный тумблер "Сеть" на основной панели управления (индикация включения подтверждается световой сигнализацией);
- 3) Запустить механический насос переключателем на панели управления для создания первичного разрежения в системе;
- 4) Произвести манипуляции с нижней ручкой клапанной коробки: поворот на 45° против часовой стрелки, вытягивание до упора и дополнительный поворот на 45° в том же направлении

4.1.4 Активация паромасляного насоса

При достижении в системе давления в диапазоне от $5 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ мм. рт.ст. (контроль по манометру ВИТ-2П) следует перевести переключатель «Паромасляный насос» в положение «Включено».

4.1.5 Процедура прогрева системы

После стабилизации параметров работы паромасляного насоса (фиксируется по снижению давления) необходимо:

- 1) Вернуть нижнюю ручку клапанной коробки в исходное положение (обратная последовательность действий)
- 2) Осторожно вытянуть верхнюю ручку клапанной коробки, соблюдая указанную методику

4.1.6 Переход в рабочий режим

При достижении рабочего давления под колпаком (от $5 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ мм. рт.ст.) выполнить:

- 1) Утопить верхнюю ручку клапанной коробки;
- 2) Вытянуть нижнюю ручку клапанной коробки;
- 3) Плавным движением перевести рукоятку высоковакуумного затво-

ра в верхнее положение («Открыто»).

4.2 Завершение работы вакуумной установки

4.2.1 Закрыть высоковакуумный затвор.

4.2.2 Отключить паромасляный насос.

4.2.3 После остывания паромасляного насоса (45...60 мин) нижнюю ручку клапанной коробки утопить.

4.2.4 Выключить механический насос, после чего заполнить воздухом в трубопровод, нажав на кнопку «Натекатель».

4.2.5 Отключить контрольно-измерительные приборы.

4.2.6 Обесточить установку.

4.2.7 Перекрыть подачу воды к установке.

4.3 Загрузка и выгрузка партии образцов

4.3.1 Отвернуть натекаТЕЛЬ и открыть доступ атмосферному воздуху под колпак.

4.3.2 После достижения под колпаком атмосферного давления поднять колпак.

4.3.3 Отвести вручную колпак в верхнее положение влево. Опускается колпак в обратном порядке.

Предупреждение! Заполнение атмосферным воздухом объема паромасляного насоса допустимо только при необходимости съема или ремонта самого насоса. Во всех остальных случаях заполнение атмосферным воздухом насоса

Запрещается! Во избежание порчи вакуумного масла паромасляный насос всегда должен находиться под вакуумом.

Заключение

В ходе проведенного исследования была рассмотрена актуальная проблема современного развития электронной промышленности и микроэлектроники, связанная с необходимостью создания высокотехнологичных решений для формирования компонентов, таких как тонкие пленки из электротехнических материалов. Эти технологии имеют важное значение в таких критически важных отраслях, как авиация, космонавтика и оборонная промышленность.

В итоге получены следующие результаты:

1. В ходе работы были изучены существующие технологии, что позволило собрать необходимые исходные данные для управления технологическим процессом. Это исследование дало четкое представление о современных подходах к созданию микроэлектронных компонентов и их особенностях.

2. Был создан проект схемы, который учитывает все ключевые аспекты работы вакуумной системы, включая обеспечение высокого вакуума и контроль технологических параметров. Это является критически важным для достижения необходимого качества и надежности конечного продукта.

3. Проведенное моделирование позволило не только визуализировать процесс, но и определить слабые моменты, которые могут повлиять на эффективность работы системы. Это также дало возможность оптимизировать процесс напыления для достижения максимальной точности и выхода годных изделий.

Таким образом, проделанная работа подтвердило важность автоматизации процессов в микроэлектронике и продемонстрировала возможности повышения качества и надежности продукции через внедрение высоких технологий. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований и разработок в области автоматизации процессов формирования микроэлектронных компонентов, а также для улучшения существующих технологий в данной области.

Список использованных источников

1. Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН. Применение и особенности. Метод термического испарения в вакууме [Электронный ресурс], Режим доступа: URL: <http://kirensky.ru/ru/info/study/dop/vak> (дата обращения: 14.04.2025).
2. Минайчев, В.Е. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 кн.: Учеб. пособие для ПТУ. Кн. 6. Нанесение пленок в вакууме / В.Е. Минайчев – М.: Высш. шк., 1989. – 110 с.
3. Готра, З.Ю. Справочник. Технология микроэлектронных устройств /З.Ю. Готра – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
4. Википедия. КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник [Электронный ресурс], Режим доступа: URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/CMOS> – (дата обращения: 05.05.2025).
5. Мир познаний. Что такое компаратор в электронике [Электронный ресурс], Режим доступа: URL: <https://deepcloud.ru/articles/chto-takoe-komparator-v-elektronike>, (дата обращения: 10.05.2025).
6. Кулиш С.Н., Олейник В.П. Конструирование и технология специализированных микросхем и микросборок. / С.Н. Кулиш, В.П. Олейник. – Учеб. пособие по лабораторному практикуму. - Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2001. – 84 с.
7. Магда Ю.С. Микроконтроллеры серии 8051: практический подход. — М.: ДМК Пресс, 2008. – 228 с.
8. Википедия. Пирометр [Электронный ресурс], Режим доступа: URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Пирометр>, (дата обращения: 10.05.2025).
9. Стационарные пирометры серии PYROSPOT 40 [Электронный ресурс], Режим доступа: URL: <https://www.geo-ndt.ru/pribor-5664-stacionarnie-pirometri-serii-pyrospot-40.htm> , (дата обращения: 11.05.2025).

Приложение А

(обязательное)

Задание на выпускную квалификационную работу магистра

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой

Пронин И.А.

(фамилия, имя, отчество)

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу магистра

1. Студент гр. 23ПДм1 факультета информационных технологий и электроники

Направление 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

Магистерская программа Нано- и микроэлектроника

Кежаев Данила Сергеевич

(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Аношкин Юрий Владимирович

(фамилия, имя, отчество)

3. Тема выпускной работы Комплекс автоматизированного управления
процессом напыления при создании элементов микроэлектроники

Тема утверждена приказом ПГУ № 588/0 от « 28 » 04 2025

4. Техническое задание на выпускную работу (разработать, исследовать (назначение
объекта разработки, исследования), исходные данные, граничные условия
разрабатываемого или исследуемого объекта, условия эксплуатации и т.д.):

Разработать автоматическую систему управления технологическими параметрами
напыления материалов электронной техники с возможностью ее интегрирования
в установку термического испарения в вакууме

Характеристики измерения технологических параметров вакуумной установки:

- измерение высокого вакуума: от 5×10^{-10} до 5×10^{-2} мм.рт.ст.:
- измерение температуры испарения исходной загрузки: от 500 до 2000 °C;
- измерение температуры подложки: от 20 до 1000 °C;
- минимальное время напыления: от 1 с.

5. Объем и содержание основной части выпускной работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)

1. Методы получения элементов микроэлектроники

1.1 Методы получения резистивных структур

1.2 Термические методы напыления пленок в вакууме

1.3 Напыление электротехнических веществ в вакууме

1.4 Импульсное формирование пленочных элементов микроэлектроники

1.5 Метод ионного напыления пленок

2. Проектирование автоматизированной системы создания и управления вакуумом

2.1 Подготовка исходных данных для проектирования автоматизированной системой
откачки установки УВН-71 ПЗ

2.2 Разработка и проектирование схемы управления процессом создания вакуума на установке УВН-71 ПЗ

2.3 Вывод логических выражений

2.4 Разработка автоматизированной схемы управления созданием вакуума на основе автомата Миля

2.5 Моделирование работы автоматизированной системы создания вакуума

2.6 Разработка измерительного блока технологических параметров при создании вакуума

3 Проектирование автоматической системы процесса напыления пленок

3.1 Микропроцессорное управление установками для напыления пленок

3.2 Микроконтроллеры серии 8051

3.3 Пирометры промышленного назначения

3.4 Моделирование работы пирометров

3.5 Разработка и моделирование схемы измерения параметров температуры

3.6 Разработка автоматической системы напыления пленочных элементов электроники

3.7 Моделирование работы автоматической системы напыления

4. Безопасная эксплуатация установок термического вакуумного напыления

4.1 Начало работы вакуумной установки

4.2 Завершение работы вакуумной установки

4.3 Загрузка и выгрузка партии образцов

5.2. Иллюстративная часть (перечень и содержание слайдов презентации)

1. Тема магистерской диссертации, слайд №1

2. Цель и задачи магистерской диссертации, слайд №2

3. Панель управления и алгоритм создания и управления вакуумом, слайд №3

4. Моделирование работы схемы создания и управления вакуумом, слайд №4

5. Моделирование работы пирометров для измерения температуры, слайд №5

6. Моделирование работы измерительной схемы при нагревании, слайд №6

7. Моделирование работы автоматической системы, ожидание, слайд №7

8. Моделирование работы автоматической системы, начало, слайд №8

9. Моделирование работы автоматической системы, старт, слайд №9

10. Моделирование работы автоматической системы, установка, слайд №10

11. Моделирование работы автоматической системы, нагрев, слайд №11

12. Моделирование работы автоматической системы, напыление, слайд №12

12. Моделирование работы измерительной схемы при напылении, слайд №13

13. Моделирование работы автоматической системы, завершение, слайд №14

14. Выводы, слайд №15

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1. _____

Консультант _____

7. Календарный план по выполнению выпускной работы магистра

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
1 Методы получения элементов микроэлектроники	20%	22.05.2025	
2 Проектирование автоматизированной системы создания и управления вакуумом	20%	24.05.2025	
3 Проектирование автоматической системы процесса напыления пленок	40%	26.05.2025	
4 Безопасная эксплуатация установок термического вакуумного напыления	10%	30.05.2025	
5. Оформление пояснительной записки	5%	31.05.2025	
6. Оформление иллюстративного материала	5%	31.05.2025	

Руководитель выпускной работы _____

подпись

Аношкин Ю.В.

фамилия, инициалы

Дата выдачи задания

«22» 05

2025 г.

Задание к исполнению принял _____

подпись

Кежаев Д.С.

фамилия, инициалы

«22» 05

2025 г.

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

Декан факультета _____

подпись

Кревчик В.Д.

фамилия, инициалы

«22» 05

2025 г.

Приложение Б
(обязательное)
Листинг программ микроконтроллеров 5081

```

/*****
*      Module control  for spraying      *
*****/

#include <8051.h>

void Init(void);           // 1. Initialisation program
void Run(void);            // 2. Run program
void End(void);            // 3. End program
void TimeOut(int x);       // 4. Pausa x*10 msec
unsigned char Survey(unsigned char select); // 5. Survey kaypad's button
void OutLcd(unsigned char char_[], unsigned char lcd,
              unsigned char chars, unsigned char reset); // 6. Output chars on the LCD
void Menu(unsigned char *txt, unsigned char *r);           // 7. Interface for install parametrs
unsigned char SetParam(unsigned char *txt, unsigned char lcd,
                       unsigned char cursor, unsigned char *r); // 8. Set parametrs for
spraying
void SymbolToNumber(unsigned char *r,
                    unsigned int *param); // 9. Trasform and send parametrs
unsigned int pow(unsigned char a, unsigned char n); // 10. Function Math f=a^n
unsigned char StartStopSpraying(unsigned int time); // 11. Start / stop process spraying
void Temperature(unsigned int *param); // 12. Control temperatures
void NumToStr(unsigned int num, unsigned char *txt); // 13. Transform number to string


void main()
{
    Init();
    Run();
    End();
}

// 1. Initialisation program
void Init(void){
    P0 = 0x00;           // Output port P0
    P1 = 0xFF;           // Input port P1
    P2 = 0x00;           // Output port P2
    P3 = 0xFF;           // Input port P3
}

// 2. Run programm
void Run(void){
    unsigned char Tisp[8] = "Tisp, 'C";
    unsigned char Tpod[8] = "Tpod, 'C";
    unsigned char tnap[8] = "tnap, c";
    unsigned char params[3][8] = {{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
                                   {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
                                   {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}};

    unsigned int control[3] = {0, 0, 0};
    unsigned char i = 0;

    unsigned char *txt_lcd;

```

```

unsigned char *parm;
unsigned int *cont;

OutLcd(Tisp, 0, 8, 0);
OutLcd(Tpod, 1, 8, 0);
OutLcd(tnap, 2, 8, 0);

txt_lcd = &Tisp;
parm = &params;
cont = &control;

Menu(txt_lcd, parm);
SymbolToNumber(parm, cont);
Temperature(cont);
StartStopSpraying(control[2]);

OutLcd(' ', 0, 9, 1);
OutLcd(' ', 1, 9, 1);

Tisp[0] = 'S';
Tisp[1] = 't';
Tisp[2] = 'o';
Tisp[3] = 'p';
Tisp[4] = '&';
Tisp[5] = 'E';
Tisp[6] = 'n';
Tisp[7] = 'd';
OutLcd(Tisp, 2, 8, 0);

}

// 3. End program
void End(void){
    while(1){
        P22 = 1;
        P24 = 1;
        P27 = 1;
    }
}

// 4. Pausa x*10 msec
void TimeOut(int x){
    while(x --> 0){
        TH0 = (- 10000) >> 8;
        TL0 = (- 10000);
        TR0 = 1;
        do;
        while(TF0 == 0);
        TF0 = 0;
        TR0 = 0;
    }
}

```

// Set parametrs for spraying
// Transform parametrs for control process
// Control temperatures
// Start / stop process spraying

// End process spraying

```

// 5. Survey keypad's button
// where select - select between set - 0; number - 1;
unsigned char Survey(unsigned char select){
    if (select == 0){
        while (1){
            P1 = 0b11111110;

            // [+] - select Tisp
            if ((P10 == 0) && (P14 == 0)){
                return 73;
            }

            // [-] - select Tpod
            if ((P10 == 0) && (P15 == 0)){
                return 80;
            }

            // [*] - select tnap
            if ((P10 == 0) && (P16 == 0)){
                return 78;
            }

            // [/] - Start
            if ((P10 == 0) && (P17 == 0)){
                return 83;
            }
        }
    }
    else {
        while(1){
            P1 = 0b111111101;

            // [9] - number 9
            if ((P11 == 0) && (P14 == 0)){
                return 57;
            }

            // [6] - number 6
            if ((P11 == 0) && (P15 == 0)){
                return 54;
            }

            // [3] - number 3
            if ((P11 == 0) && (P16 == 0)){
                return 51;
            }

            // [=] - Enter
            if ((P11 == 0) && (P17 == 0)){
                return 69;
            }
        }
    }
}

```

```

// [8] - number 8
P1 = 0b11111011;
    if ((P12 == 0) && (P14 == 0)){
        return 56;
    }

// [5] - number 5
if ((P12 == 0) && (P15 == 0)){
    return 53;
}

// [2] - number 2
if ((P12 == 0) && (P16 == 0)){
    return 50;
}

// [0] - number 0
if ((P12 == 0) && (P17 == 0)){
    return 48;
}

P1 = 0b11110111;

// [7] - number 7
if ((P13 == 0) && (P14 == 0)){
    return 55;
}

// [4] - number 4
if ((P13 == 0) && (P15 == 0)){
    return 52;
}

// [1] - number 1
if ((P13 == 0) && (P16 == 0)){
    return 49;
}

// [C] - Cancel
if ((P13 == 0) && (P17 == 0)){
    return 67;
}
}
}
}

```

```

// 6. Output chars on the LCD
// where char_ - array chars;
//      lcd - number LCD display;
//      chars - all chars;
//      reset - clear LCD with position reset.
void OutLcd(unsigned char char_[], unsigned char lcd, unsigned char chars,
unsigned char reset){
    unsigned char i = 0;
    unsigned char cursor = 0;

    // Output on LCD display
    if (reset == 0){

        // Tisp
        if (lcd == 0){
            P21 = 1;
            for (i = 0; i < chars; i++){
                P27 = 0;
                P0 = char_[i];           // Output messege 'msg' on the LCD
                P27 = 1;
                P27 = 0;
            }
            if ((chars < 8) && (chars != 1)){
                for (i = chars; i < 8; i++){
                    P27 = 1;
                    P0 = 32;
                    P27 = 0;
                }
            }
            P21 = 0;
        }

        // Tpod
        if (lcd == 1){
            P23 = 1;
            for (i = 0; i < chars; i++){
                P22 = 0;
                P0 = char_[i];   // Output messege 'msg' on the LCD
                P22 = 1;
                P22 = 0;
            }
            if ((chars < 8) && (chars != 1)){
                for (i = chars; i < 8; i++){
                    P22 = 1;
                    P0 = 32;
                    P22 = 0;
                }
            }
            P23 = 0;
        }

        // tnap

```

```

if (lcd == 2){
    P25 = 1;
    for (i = 0; i < chars; i++){
        P24 = 0;
        P0 = char_[i];           // Output messege 'msg' on the LCD
        P24 = 1;
        P24 = 0;
    }
    if ((chars < 8) && (chars != 1)){
        for (i = chars; i < 8; i++){
            P24 = 1;
            P0 = 32;
            P24 = 0;
        }
    }
    P25 = 0;
}
}
// Reset LCD display
else{
    switch(lcd){
        case 0:
            P21 = 1;
            for (i = 0; i < 8; i++){
                P27 = 1;
                P0 = 32;
                P27 = 0;
            }
            for (i = reset; i < 7; i++){
                P27 = 1;
                P0 = 32;
                P27 = 0;
            }
            P21 = 0;
            break;

        case 1:
            P23 = 1;
            for (i = 0; i < 8; i++){
                P22 = 1;
                P0 = 32;
                P22 = 0;
            }
            for (i = reset; i < 7; i++){
                P22 = 1;
                P0 = 32;
                P22 = 0;
            }
            P23 = 0;
            break;
    }
}

```

```

case 2:
    P25 = 1;
    for (i = 0; i < 8; i++){
        P24 = 1;
        P0 = 32;
        P24 = 0;
    }
    for (i = reset; i < 7; i++){
        P24 = 1;
        P0 = 32;
        P24 = 0;
    }
    P25 = 0;
    break;
}
}
}

// 7. Interface for install parametrs
// where *txt - array reference text;
//      *r - array reference symbols.
void Menu(unsigned char *txt, unsigned char *r){
    unsigned char i = 0;
    unsigned char j = 0;
    unsigned char k = 0;
    unsigned char l = 0;
    unsigned char select = 0;
    unsigned char exit = 1;

    while(exit){
        select = Survey(0);
        switch (select){
            case 73:
                for (i = 0; i < 8; i++) txt[i] = 32;
                l = SetParam(txt, 0, l, r);
                break;

            case 80:
                for (i = 0; i < 8; i++) txt[i] = 32;
                j = SetParam(txt, 1, j, r);
                break;

            case 78:
                for (i = 0; i < 8; i++) txt[i] = 32;
                k = SetParam(txt, 2, k, r);
                break;

            case 83:
                txt[0] = 'S';
                txt[1] = 't';
                txt[2] = 'a';

```

```

txt[3] = 'r';
txt[4] = 't';
txt[5] = ' ';
txt[6] = ' ';
txt[7] = ' ';

        // Reset LCD
OutLcd(txt, 0, 8, l);
OutLcd(txt, 1, 8, j);
OutLcd(txt, 2, 8, k);

        // Start on LCD
OutLcd(txt, 2, 8, 0);
exit = 0;
break;

default:
    break;
}
}
}
// 8. Set parametrs for spraying
// where *txt - array reference text;
//      lcd - number LCD display;
//      cursor - input/resset for LCD;
//      *r - array reference symbols.
unsigned char SetParam(unsigned char *txt, unsigned char lcd,
unsigned char cursor, unsigned char *r){
    unsigned char i = 0;
    unsigned char j = 0;
    unsigned char k = 0;
    unsigned char select = 0;

    OutLcd(txt, lcd, 8, cursor);
    j = 0;
    while(1){
        select = Survey(1);
        txt[0] = select;
        OutLcd(txt, lcd, 1, 0);
        k = lcd * 8 + j;
        r[k] = select - 48;
        if (select == 69) break;           // enter

        if (select == 67) {               // reset
            OutLcd(txt, lcd, 1, j);
            j = 7;
        }
        j = j + 1;
        if (j > 7) j = 0;
    }
    return j;
}

```

```

// 9. Trasform and send parametrs
// where *r - array reference symbols;
//      *param - array reference for parametrs.
void SymbolToNumber(unsigned char *r, unsigned int *param){
    unsigned char i = 0;
    unsigned char j = 0;
    unsigned char k = 0;
    unsigned int n = 0;
    unsigned int buf = 0;

    for (k = 0; k < 3; k++){
        buf = 0;
        n = 0;
        for(i = 0; i < 8; i++){
            if (r[k * 8 + i] == 21){
                break;
            }
        }
        for(j = 0; j < i; j++){
            n = i - j - 1;
            n = pow(10, n);
            buf = (unsigned int) (buf + r[k * 8 + j] * n) ;
        }

        param[k] = buf;
    }
}

// 10. Function Math  $f=a^n$ 
unsigned int pow(unsigned char a, unsigned char n){
    unsigned char i = 0;
    unsigned int rez = a;
    if (n == 0) return 1;
    if (n == 1) return rez;
    else{
        for(i = 2; i <= n; i++){
            rez = rez*a;
        }
    }
    return rez;
}

// 11. Start / stop is process spraying
// where time - time, sec.
unsigned char StartStopSpraying(unsigned int time){
    unsigned int t = (unsigned int) (time * 100);
    unsigned char txt[8] = "Spraying";
    OutLcd(txt, 2, 8, 0);
    P25 = 1;
    P26 = 1;
    TimeOut(t);
}

```

```

P25 = 0;
P26 = 0;
return 1;
}

// 12. Control temperatures
// where *param - array reference for parametrs.
void Temperature(unsigned int *param){
    unsigned char Tisp_kod = 0;
    unsigned char Tpod_kod = 0;
    unsigned char Tisp_set_kod = 0;
    unsigned char Tpod_set_kod = 0;
    unsigned char buf_syml[8] = "Heating!";
    unsigned char Kisp_kod_T = 8;    // k = 7.843 - isp
    unsigned char Kpod_kod_T = 4;    // k = 3.922 - pod
    unsigned char dKisp_kod = 62;    // k = 62

    unsigned char *txt;

    OutLcd(buf_syml, 2, 8, 0);

    Tisp_set_kod = (unsigned char) (param[0] / Kisp_kod_T - dKisp_kod);
    Tpod_set_kod = (unsigned char) (param[1] / Kpod_kod_T);

    txt = &buf_syml;

    P25 = 0;
    P26 = 0;
    P20 = 0;
    P20 = 1;

    while(1){
        P25 = 1;
        P26 = 0;
        P20 = 0;
        Tisp_kod = P3;
        param[0] = (unsigned int) (500 + Tisp_kod * Kisp_kod_T);
        P20 = 1;
        NumToStr(param[0], txt);
        OutLcd(txt, 0, 8, 0);

        P25 = 0;
        P26 = 1;
        P20 = 0;
        Tpod_kod = P3;
        param[1] = (unsigned int) (Tpod_kod * Kpod_kod_T);
        P20 = 1;
        NumToStr(param[1], txt);
        OutLcd(txt, 1, 8, 0);

        if ((Tisp_kod >= Tisp_set_kod) && (Tpod_kod >= Tpod_set_kod)) break;
    }
}

```

```

}

// 13. Transform number to string
// where num - number type int;
//          *txt - array reference for text.
void NumToStr(unsigned int num, unsigned char *txt){
    unsigned char num_symbl[10] = {'0', '1', '2', '3', '4', '5', '6', '7', '8', '9'};
    unsigned char i = 0;
    unsigned char eden = 0;

    for (i=0; i<8; i++) txt[i] = ' ';

    i = 7;
    while(1){
        eden = num % 10;
        txt[i] = num_symbl[eden];
        num = (unsigned int) (num / 10);
        if (num == 0) break;
        i--;
    }
}

```

Приложение В

(обязательное)

Заявление и протокол проверки магистерской диссертации
на оригинальность

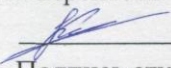
Ректору Пензенского
государственного университета
А. Д. Гулякову
студента курса ФИТЭ
очной формы обучения
Кежаева Даниила Сергеевича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Кежаев Данила Сергеевич, студент 2 курса очной формы обучения направления подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, магистерской программы «Нано- и микроэлектроника», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» выпускной квалификационной работы на тему «Комплекс автоматизированного управления процессом напыления при создании элементов микроэлектроники», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.


Подпись студента

28.05.2025

дата

ВКР представлена на проверку 28.05.2025

Руководитель ВКР  Ю.В. Аношкин

Протокол

Проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной квалификационной работы на тему «Автоматизированная система создания вакуума и управления им» студента 2 курса Д.С. Кежаева направления подготовки/специальности 11.04.04 Электроника и наноэлектроника Магистерской программы «Нано- и микроэлектроника» Руководитель ВКР Аношкин Ю.В.

АНТИПЛАГИАТ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА
о результатах проверки текстового документа на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Кежаев Данила Сергеевич
Специализация: Кежаев Данила Сергеевич
рассчитано для: Кежаев Данила Сергеевич
Название работы: Комплекс автоматизированного управления процессом напыления при создании элементов микроэлектроники
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра «Нано- и микроэлектроника»

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ НИЖЕ ПОКАЗАНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОПЛАВЛЕНИЕ	28.97%	СОПЛАВЛЕНИЕ	28.97%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	71.03%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	71.03%
ЦИТИРОВАНИЕ	0%	ЦИТИРОВАНИЕ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЕ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЕ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 30.05.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 30.05.2025 09:24

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с 3.24, 27-73, содержание с.2, введение с.1, выводы с.24-26
Модуль поиска: IEEE, Публикации РГБ, Скандинавская коллекция ЗЭС, Шаблонные фразы, Перифразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте, СПС ГАРАНТ аналитика, Перифразирование по коллекции IEEE, Коллекция НБУ, Переводные заимствования, СМИ России и СНГ, Патенты СССР, РФ, СНГ, Цитирование, ИПС Адмлет, Диссертации ИББ, Медицина, Публикации eLIBRARY, Кольцо вузов, Переводные заимствования по коллекции Гарант аналитика, Перифразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте, Публикации eLIBRARY (переводы и перифразирование), Публикации РГБ (переводы и перифразирование), Переводные заимствования IEEE, Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте, Кольцо вузов (переводы и перифразирование), Перифразирование.

Работу проверил: Головацкий Алексей Николаевич
ФИО проверяющего

Дата подписи: 02.06.25

Подпись проверяющего

QR код

Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR код, который содержит ссылку на отчет

Отчет на запрос, является ли обнаруженные заимствования корректными, система оставляет на усмотрение правоприменителя. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.

30.05.2025

Ю.В. Аношкин



АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Пензенский государственный
университет"

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Кежаев Данила Сергеевич
Самоцитирование
рассчитано для: Кежаев Данила Сергеевич
Название работы: Комплекс автоматизированного управления процессом напыления при создании элементов
микроэлектроники
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	28.97%	СОВПАДЕНИЯ	28.97%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	71.03%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	71.03%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 30.05.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 30.05.2025 09:26

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.3-24, 27-73, содержание с.2, введение с.1, выводы с.24-26
Модули поиска: IEEE; Публикации РГБ; Сводная коллекция ЭБС; Шаблонные фразы; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по коллекции IEEE; Коллекция НБУ; Переводные заимствования; СМИ России и СНГ; Патенты СССР, РФ, СНГ; Цитирование; ИПС Адилет; Диссертации НББ; Медицина; Публикации eLIBRARY; Кольцо вузов; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Переводные заимствования IEEE; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Кольцо вузов (переводы и перефразирования); Перефразировани...

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи:

02.06.25



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Подпись проверяющего

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

Приложение Г
(обязательное)
Презентация

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра «Нано- и микроэлектроника»

Комплекс автоматизированного управления напыления при создании элементов микроэлектроники

Выполнил студент гр. 23ПДм1
Руководитель к.т.н., доцент каф. НиМЭ

Кежаев Д.С.
Аношкин Ю.В.

ПЕНЗА 2025

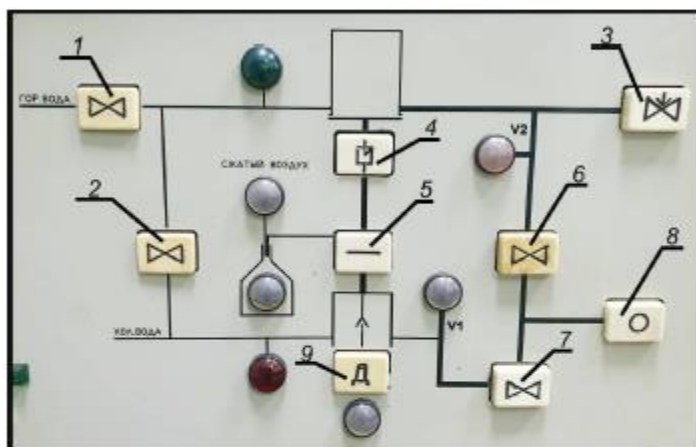
Цель и задачи магистерской диссертации:

Целью работы: разработать схему и выполнить моделирование работы автоматическим управлением вакуумного напыления на основе установки УВН-71 ПЗ.

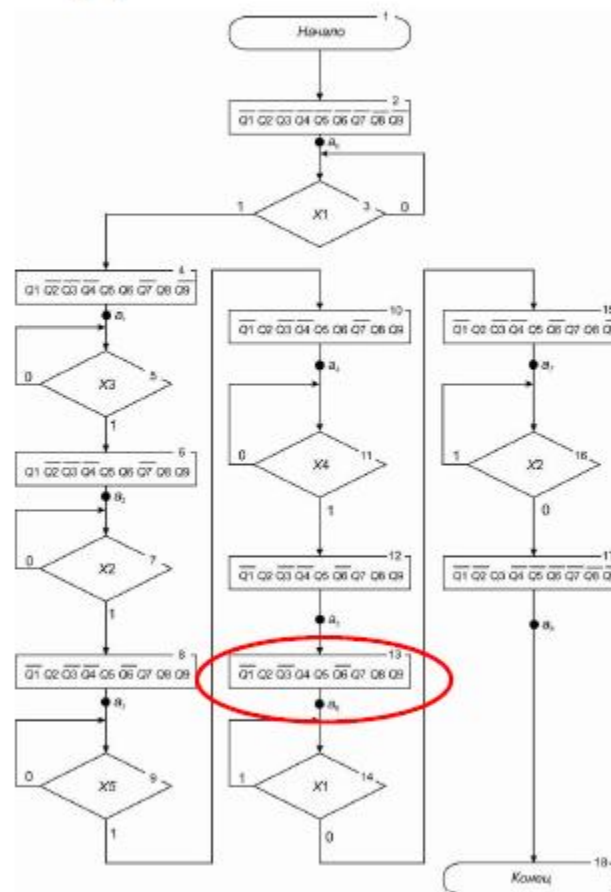
Задачи работы:

- ☐ рассмотреть имеющиеся методы формирования элементов микроэлектроники и подготовить исходные данные для управления технологическим процессом при формировании элементов микроэлектроники;
- ☐ разработать схему и выполнить моделирование работы управления вакуумной системы;
- ☐ разработать схему и выполнить моделирование работы автоматической системы напыления.

Панель управления и алгоритм создания и управления вакуумом



Сигналы	Описание сигналов	Пех на рисунке 2.1
1	2	3
Входные сигналы		
X1	сигнал на пуск процесса (вкл - 1 / выкл - 0)	—
X2	датчик температуры диффузионного насоса больше установленного, (°C)	—
X3	датчик низкого вакуума камеры больше установленного, (мм рт.ст.)	—
X4	датчик высокого вакуума камеры больше установленного, (мм рт.ст.)	—
X5	датчик высокого вакуума диффузионного насоса больше установленного, (мм рт.ст.)	—
X6	установка нормального состояния, (вкл - 1 / выкл - 0)	—
Выходные сигналы		
Q1	клапан горячей воды камеры (вкл - 1 / выкл - 0)	1
Q2	клапан холодной воды камеры (вкл - 1 / выкл - 0)	2
Q3	клапан напуска воздуха в камеру (вкл - 1 / выкл - 0)	3
Q4	клапан высоковакуумного затвора (вкл - 1 / выкл - 0)	4
Q5	клапан нагрева (вкл - 1 / выкл - 0)	5
Q6	клапан камеры - форвакуумный насос (вкл - 1 / выкл - 0)	6
Q7	клапан диффузионный насос - форвакуумный насос (вкл - 1 / выкл - 0)	7
Q8	форвакуумный насос (вкл - 1 / выкл - 0)	8
Q9	нагрев диффузионного насоса (вкл - 1 / выкл - 0)	9



Моделирование работы пирометров для измерения температуры

Пирометр – прибор для бесконтактного измерения температуры твердых тел. Принцип действия основан на измерении мощности теплового излучения объекта преимущественно в диапазонах инфракрасного излучения и видимого света.

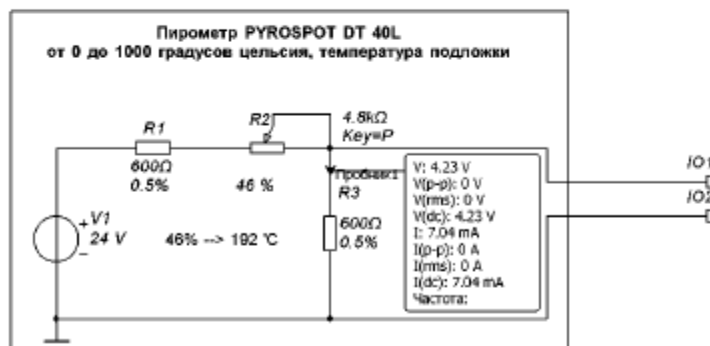


Технические характеристики пирометра DT 40L

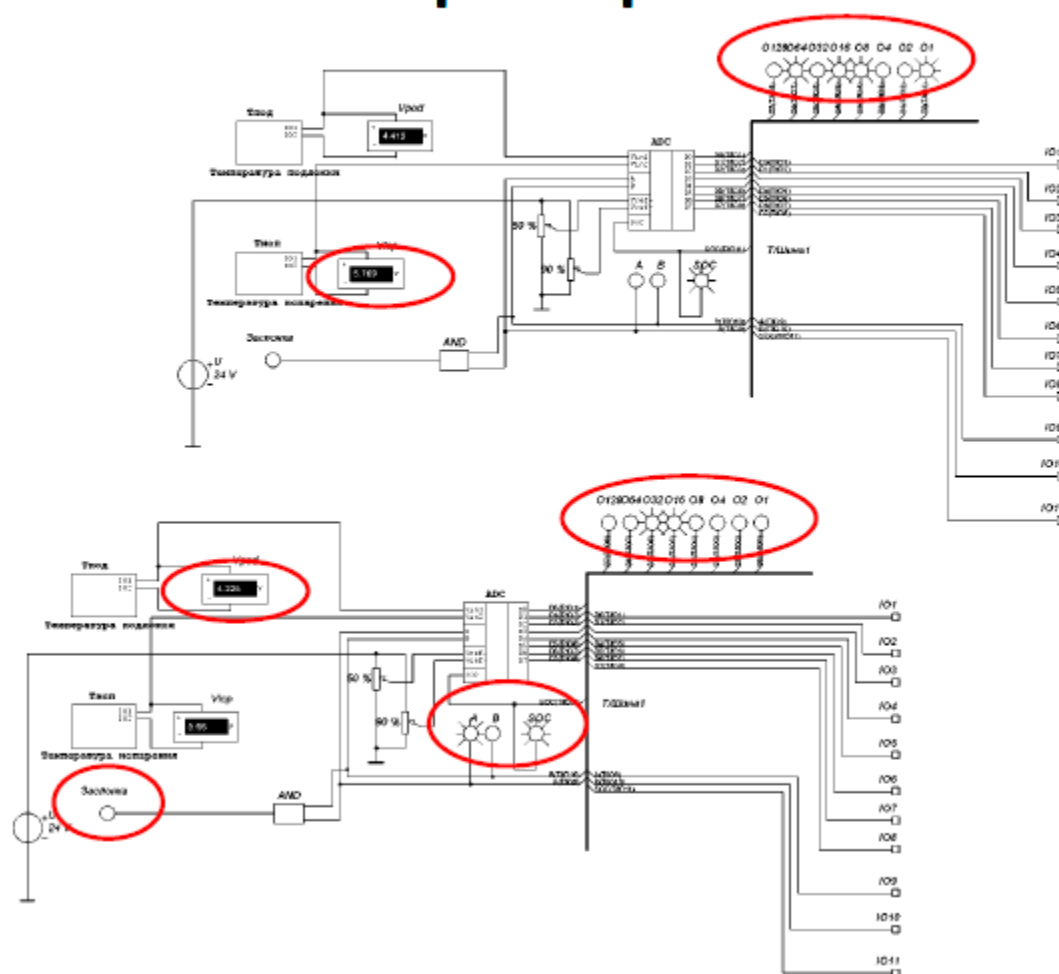
Измерительный диапазон	-40 - 1000 °C; 0 - 1000 °C
Доп. диапазон	регулируется в рамках темпер. диапазона, мин. шаг 50 °C
Диапазон спектра	8 - 14 мкм
Масштабирование	50 : 1
Оптика (см. табл.)	100, 300, 800, 2000
Козф. излучения ϵ	0.200 - 1.000, настраивается через USB интерфейс
Время отклика t95	60 мс (мин.), настраивается до 100 с через USB
Погрешность измерений	1 % от получен. значения в °C или 1 K
Воспроизводимость	0.5 % от получен. значения в °C или 0.5 K
Темп. чувствительность	< 0.1 K
Зависимость от внеш. темпер. помехи f)	< 0.3 K/Δ T _u = 10 K
Выходной сигнал	4 - 20 mA, переключаемый, линейный, макс. нагрузка 600 Ом при 24 В

Технические характеристики пирометра DT 40G

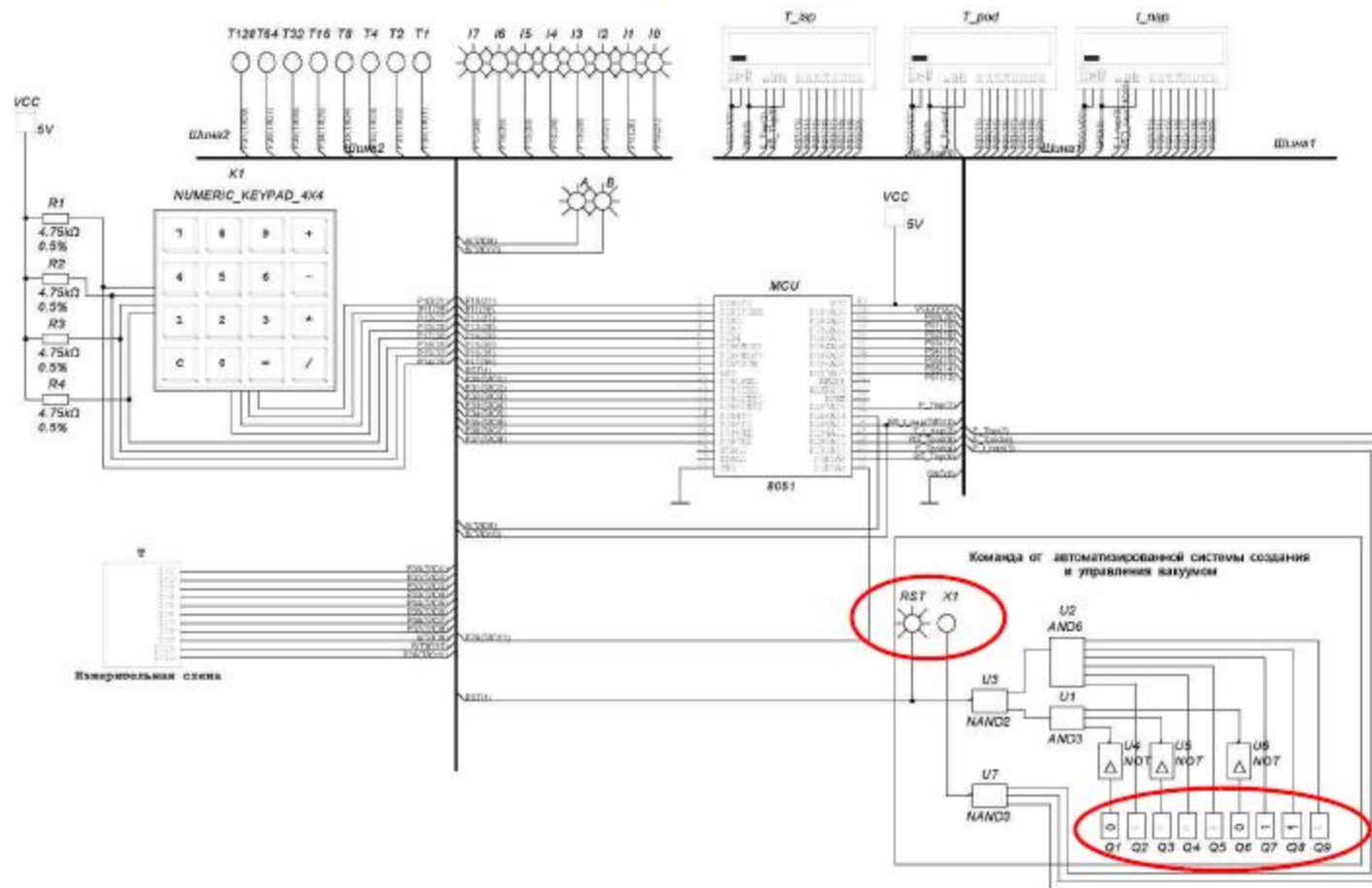
Измерительный диапазон	100 - 1300 °C; 200 - 1400 °C; 500 - 2500 °C
Доп. диапазон	регулируется в рамках темпер. диапазона, мин. шаг 50 °C
Диапазон спектра	5 мкм
Масштабирование	50 : 1
Оптика (см. табл.)	100, 300, 800
Козф. излучения ϵ	0.200 - 1.000, настраивается через USB интерфейс
Время отклика t95	60 мс (мин.), настраивается до 100 с через USB
Погрешность измерений	1 % от получен. значения в °C или 1 K
Воспроизводимость	0.5 % от получен. значения в °C или 0.5 K
Темп. чувствительность	< 0.1 K
Зависимость от внеш. темпер. помехи f)	< 0.3 K/Δ T _u = 10 K
Выходной сигнал	4 - 20 mA, переключаемый, линейный, макс. нагрузка 600 Ом при 24 В



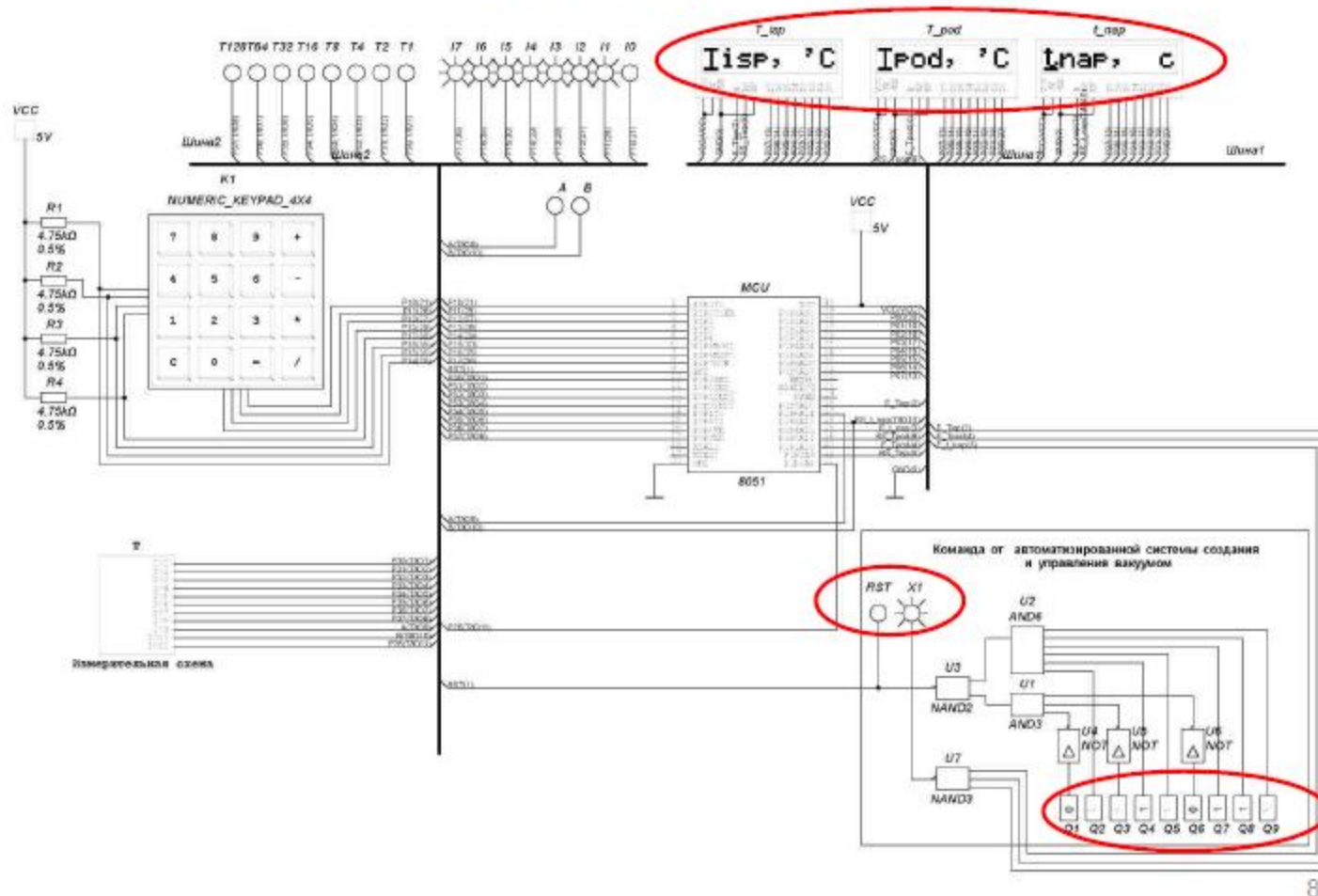
Моделирование работы измерительной схемы при нагревании



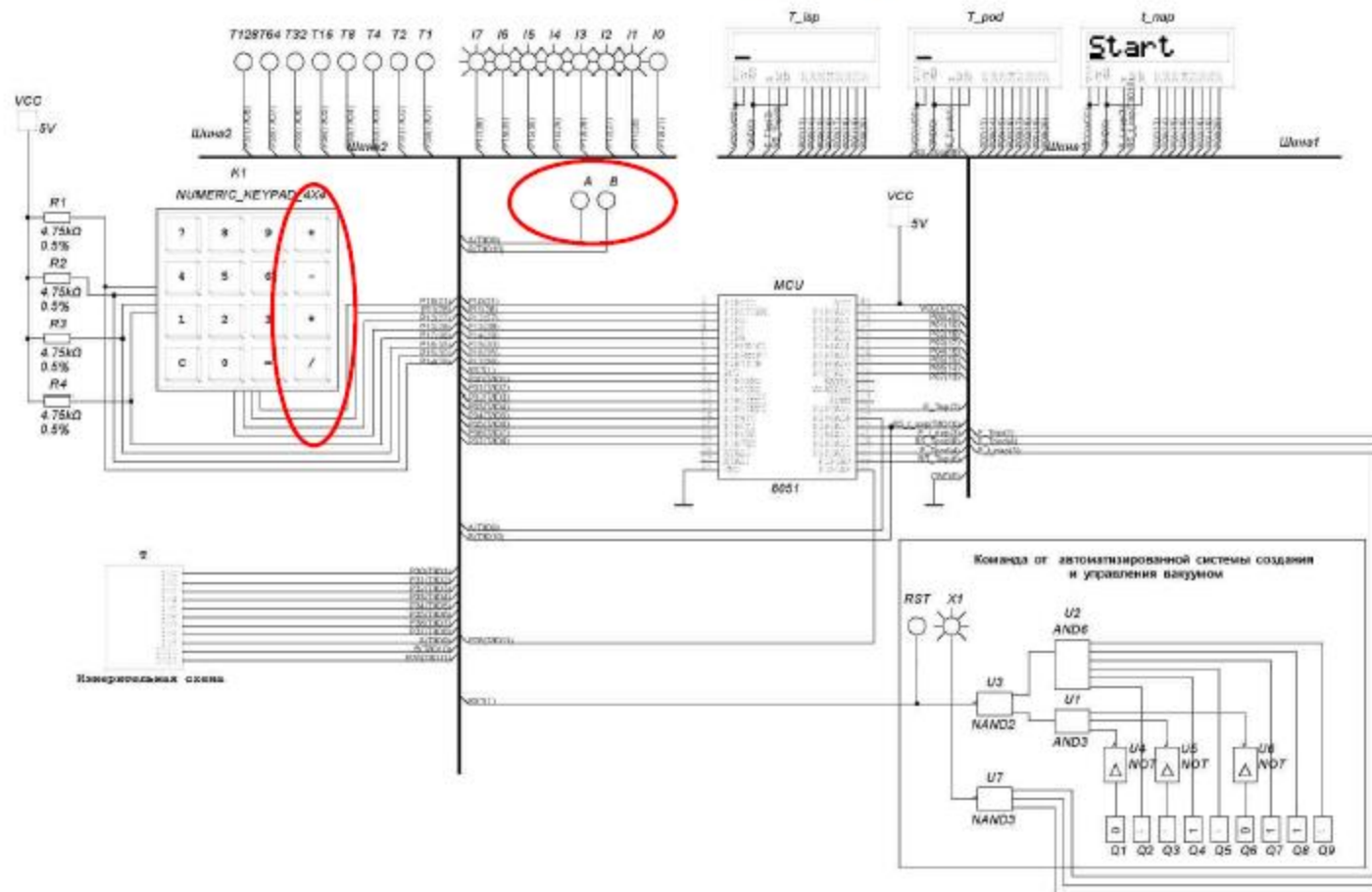
Моделирование работы автоматической системы, ожидание



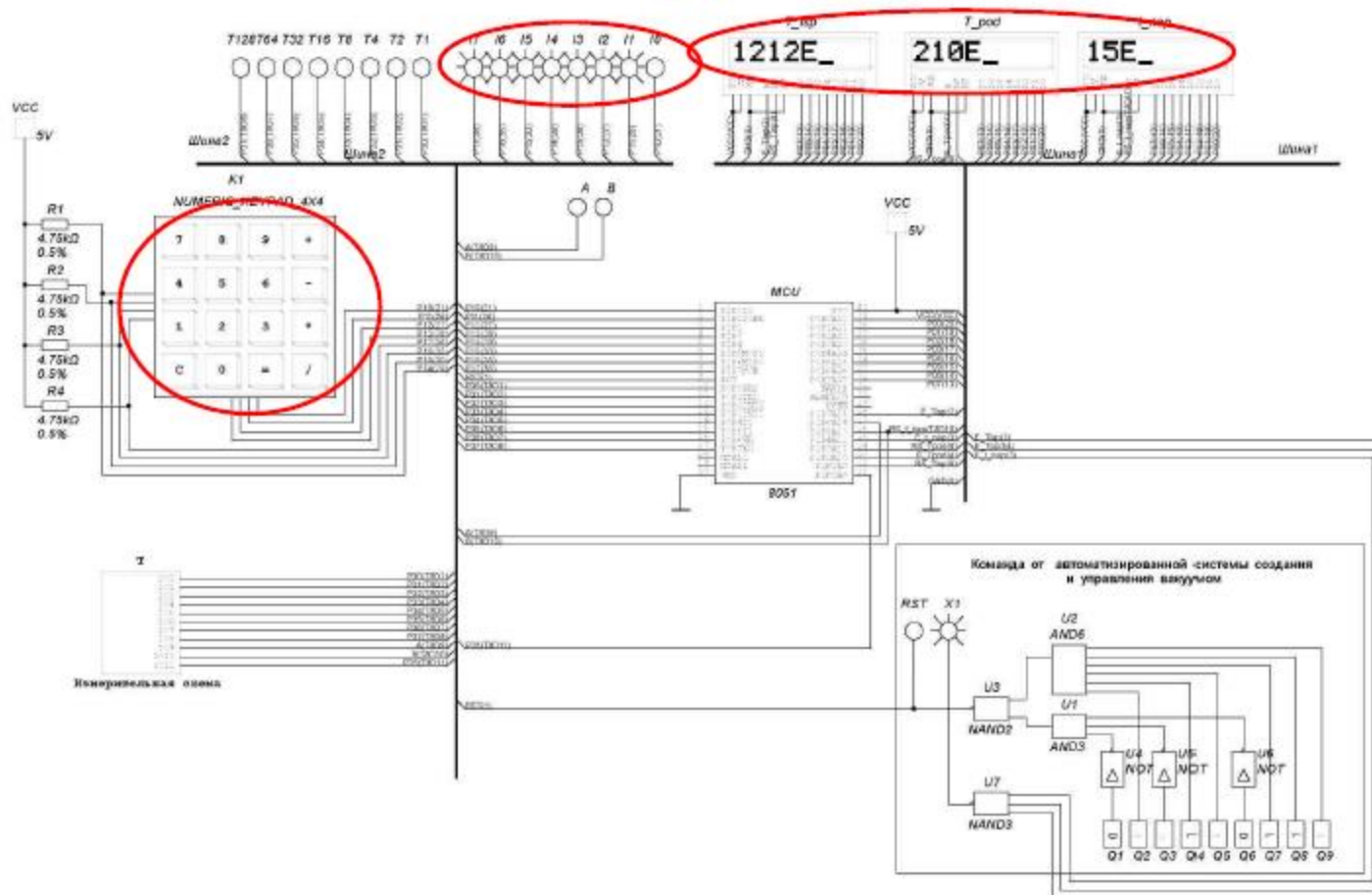
Моделирование работы автоматической системы, начало



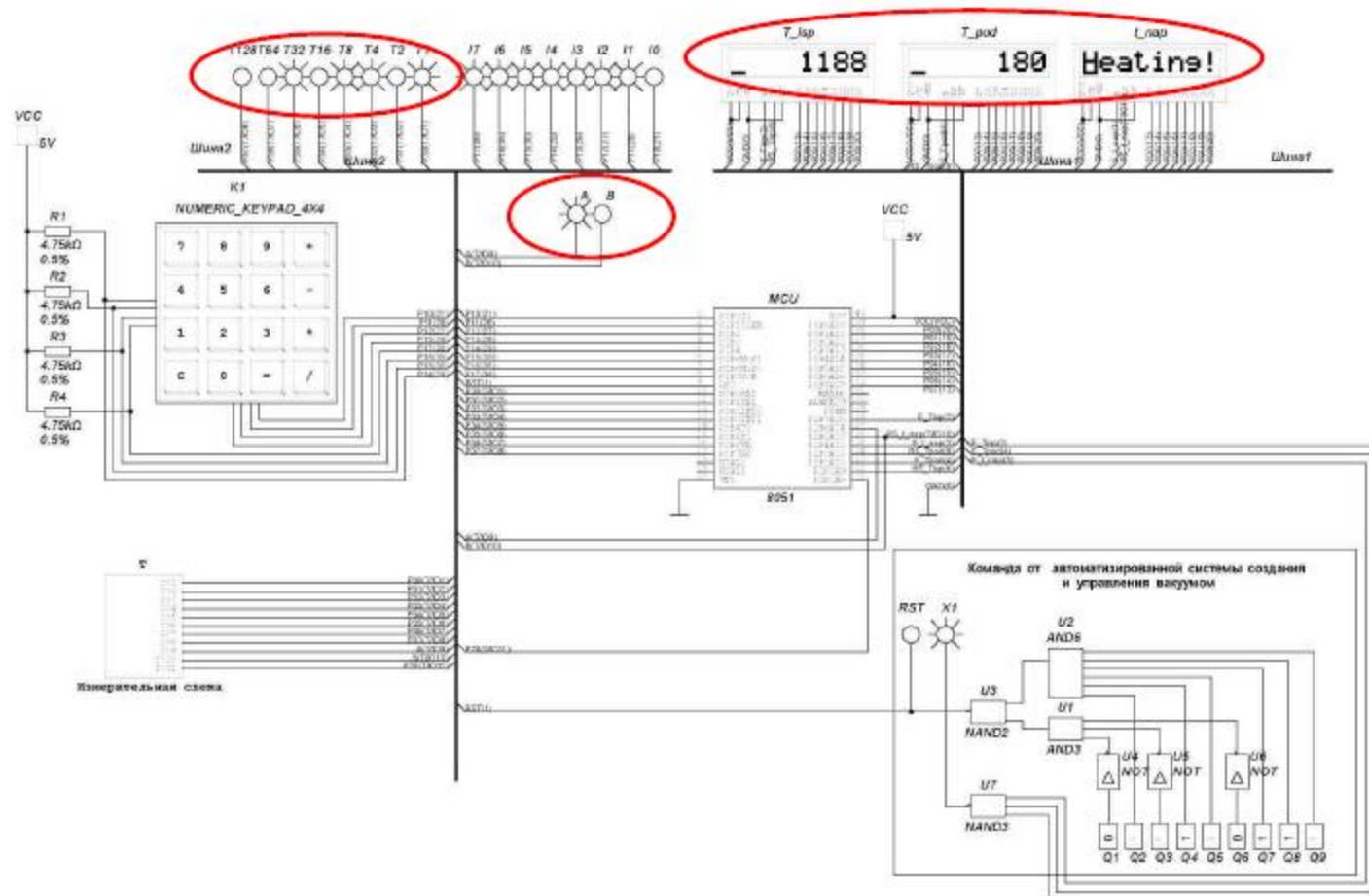
Моделирование работы автоматической системы, старт



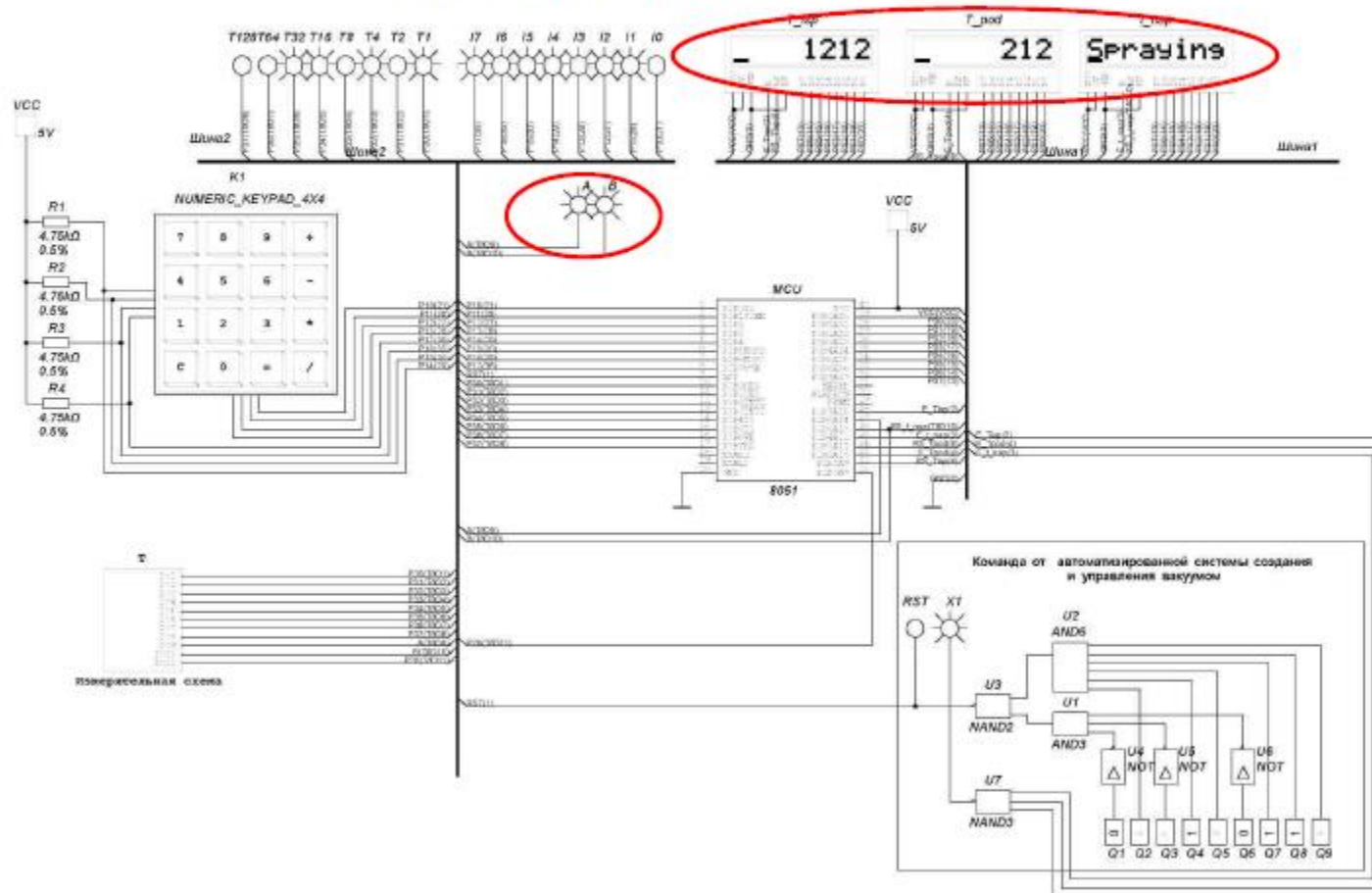
Моделирование работы автоматической системы, установка



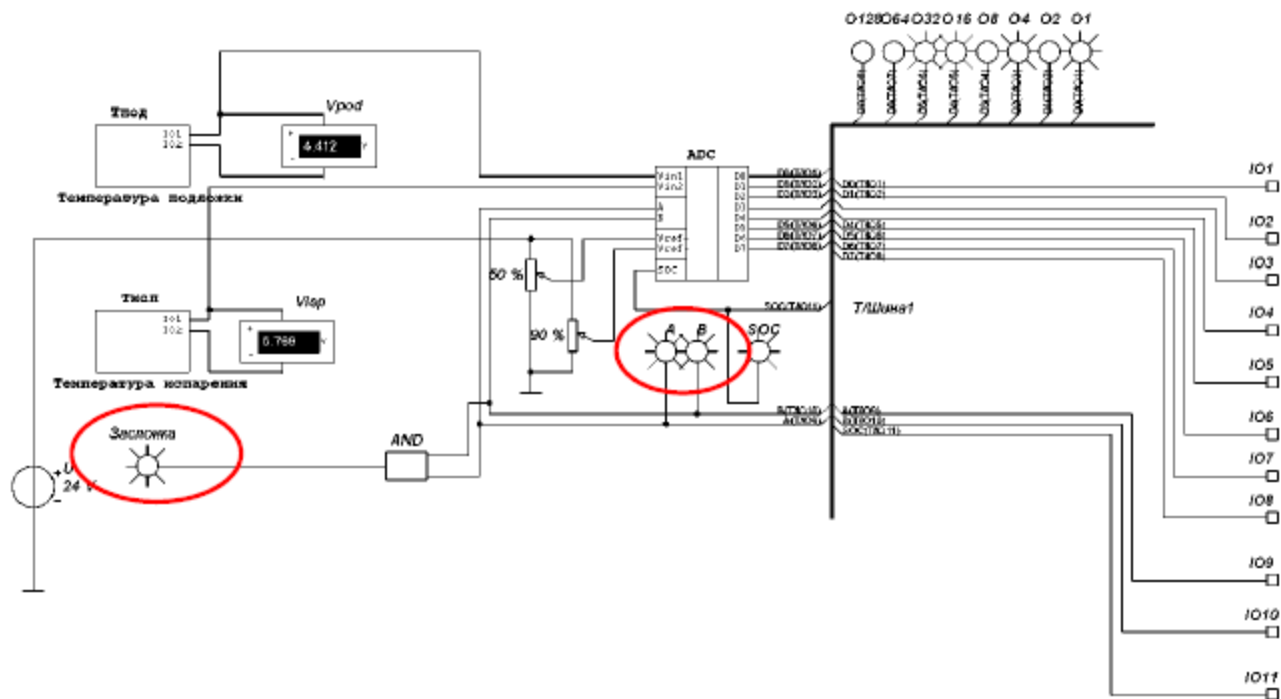
Моделирование работы автоматической системы, нагрев



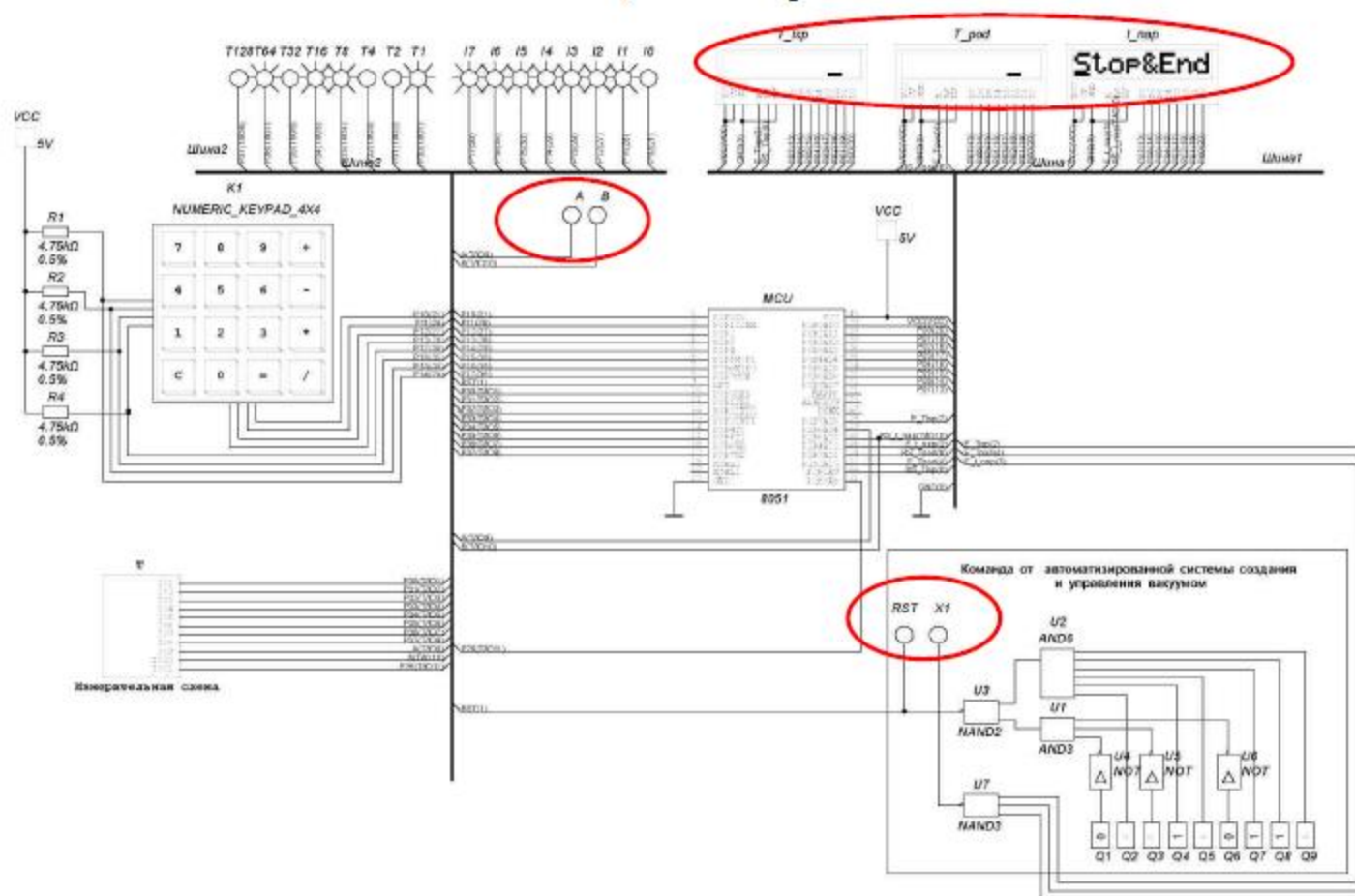
Моделирование работы автоматической системы, напыление



Моделирование работы измерительной схемы при напылении



Моделирование работы автоматической системы, завершение



ВЫВОДЫ:

1. В ходе работы были изучены существующие технологии, что позволило собрать необходимые исходные данные для управления технологическим процессом. Это исследование дало четкое представление о современных подходах к созданию микроэлектронных компонентов и их особенностях.
2. Был создан проект схемы, который учитывает все ключевые аспекты работы вакуумной системы, включая обеспечение высокого вакуума и контроль технологических параметров. Это является критически важным для достижения необходимого качества и надежности конечного продукта.
3. Проведенное моделирование позволило не только визуализировать процесс, но и выявить возможные узкие места, которые могут повлиять на эффективность работы системы. Это также дало возможность оптимизировать процесс напыления для достижения максимальной точности и выхода годных изделий.

Таким образом, проделанная работа подтвердило важность автоматизации процессов в микроэлектронике и продемонстрировала возможности повышения качества и надежности продукции через внедрение высоких технологий. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований и разработок в области автоматизации процессов формирования микроэлектронных компонентов, а также для улучшения существующих технологий в данной области. 15

Спасибо
за
внимание