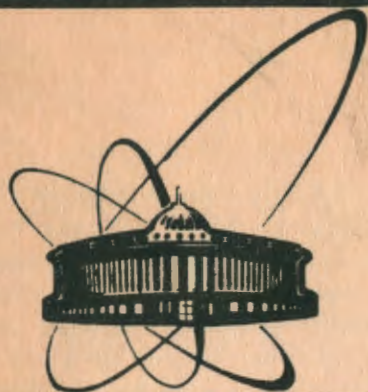


89-508



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

9

326

P13-89-508

В.Н.Замрий, А.Б.Роганов, А.П.Сиротин

ПРЕЦИЗИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР ТЕМПЕРАТУРЫ
СО ВСТРОЕННЫМ 16-РАЗРЯДНЫМ
МИКРОПРОЦЕССОРОМ

1989

Прецизионный регулятор температуры со встроенным 16-разрядным микропроцессором (ПРТМ) предназначен для реализации программируемых режимов точных измерений и адаптивного регулирования параметров продолжительных процессов нагрева-охлаждения. Регулятор, программы которого сочетают свойства дискретного управления и качества пропорционального, интегрального и дифференциального (ПИД) регулирования, проектировался для применения в составе измерительной системы КАМАК экспериментальной установки с управляющей ЭВМ, а также для автономного применения с обеспечением основных режимов¹¹. В его постоянной перепрограммируемой памяти (ППЗУ) размещаются программы измерения и стабилизации. Условия выполнения программ и значения регулируемого параметра, задаваемые в ходе эксперимента по программе от ЭВМ или вручную, вводятся в ПРТМ через контроллер КАМАК и записываются в оперативную память (ОЗУ) микропроцессора (МП). Назначение ПРТМ определяет серьезные требования к помехозащищенности и погрешностям измерений сигналов датчиков и к качеству регулирования в различных диапазонах температур.

При проектировании ПРТМ учтен опыт разработки и применения программируемых регуляторов величины и скорости изменения температуры¹². С целью обеспечения требуемой прецизионности и расширения функций ПРТМ построен на основе 12-разрядных аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей (АЦП, ЦАП), памяти ППЗУ и ОЗУ с общей емкостью 8К слов и 16-разрядного МП, программно совместимого с главной ЭВМ (типа "Электроника-60", СМ-1300, СМ-3) экспериментальной установки. Применение в ПРТМ встроенного МП типа К1801ВМ1, с учетом рационального распределения функций используемых интегральных схем (ИС), обеспечивает ряд важных возможностей:

- программируемые коррекции погрешностей различных, в том числе нелинейных, измерительных и управляющих трактов;
- усреднение результатов многократных измерений и увеличение отношения "Сигнал/Шум";
- выбор чувствительности и диапазона измерений (усиления сигнала, тока питания подключаемых датчиков), формата данных и размерности величин;

- адаптация дискретно-аналоговых функций ПИД-регулирования и поиск по таблицам их составляющих величин (при выбираемых шагах и временах установления температуры, скорости ее изменения);
- формирование оперативной информации для вывода (фиксации, изображения, сообщений) на различных этапах измерений, стабилизации и регулирования параметров;
- расширенные функции коммуникации (программный интерфейс), самоконтроля и защиты от ошибок при взаимодействии с ЭВМ, а также предупреждения аварийных режимов и отклонений параметров.

Функционально завершенный блок ПРТМ выполнен на одной плате функционального модуля КАМАК (минимальной ширины 1М). Для обеспечения взаимодействия со встроенным МП применено "прямое" сопряжение шин МП (типа Q) и КАМАК¹³. Схема взаимодействия с МП в блоке ПРТМ показана на рис.1, где 1 — измеряемые сигналы, 2 — питание датчиков, 3 — сигнализация выполнения режима, 4 — регулирующий сигнал, 5 — блокировка программы, 6 — входной коммутатор и нормирующий преобразователь (НП) с переключаемым усилением, 7 — источник питания датчиков (ИПД) с переключаемым током, 8 — выходной нормирующий усилитель, 9 — АЦП со схемой выборки — хранения (СВХ), 10 — регистр статуса, 11 — ЦАП с входным регистром, 12 и 16 — шины МП и КАМАК, 13 — МП, ОЗУ и ППЗУ, 14 — сопряжение шин, входной и выходной регистры, 15 — регистры запросов и управления МП.

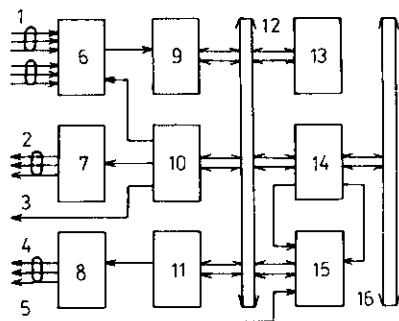


Рис.1

Импульс блокировки 5 применяется для приостановки измерений, например на время основной импульсной помехи от экспериментального оборудования¹¹, или для задержки начала цикла программы с целью синхронизации, таймирования периода повторения циклов (при измерении и регулировании скорости изменения температуры¹²). Сигнализация используется для разрешения работы внешней экспериментальной аппаратуры при достижении заданного режима стабилизации температуры. Для защиты от аварийных режимов, например перегрева объекта, предусмотрено снятие регулирующего сигнала в исходном состоянии ПРТМ, причем установление выходного сигнала ЦАП разрешается программно.

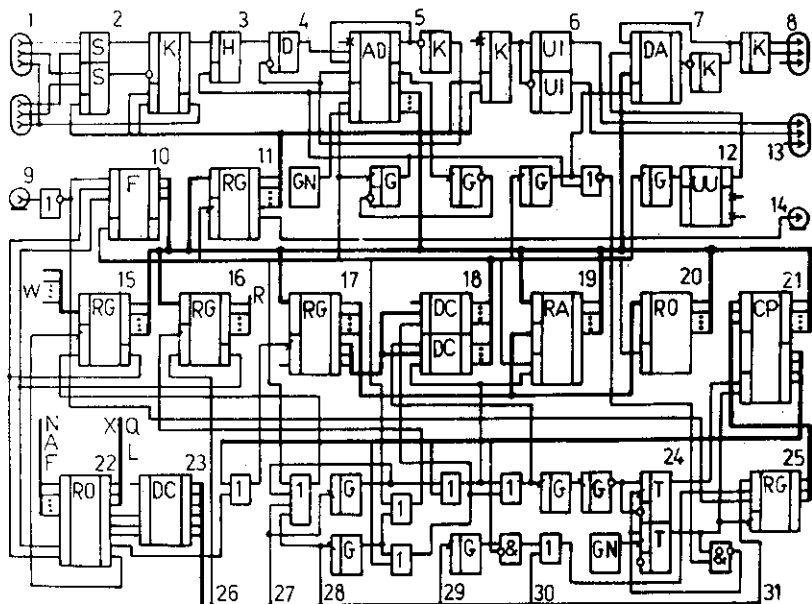


Рис.2

Схема блока ПРТМ, содержащая 62 ИС, приведена в несколько упрощенном виде на рис.2, где 1 и 9 — входы сигналов датчиков и блокировки, 2 — коммутатор сигналов датчиков, 3 — СВХ, 4 — компаратор, 5 — АЦП, 6 — ИПД, 7 — ЦАП, 8 и 13 — выходы сигналов регулирования и ИПД, 10 — коммутатор-формирователь сигналов запроса, 11, 15, 16, 17 и 25 — регистры статуса, входной и выходной, адресный и МП управления, 12 — изолированный преобразователь напряжения, 14 — сигнализация выполнения режима, 18 — двоянный дешифратор кода адреса, 19 и 20 — ОЗУ и ППЗУ (по 4К слов), 21 — 16-разрядный МП, 22 и 23 — программируемая логическая матрица (ПЛМ) и дешифратор команд КАМАК, 24 — триггеры синхронизации цикла МП и деления частоты тактовых импульсов, 26-31 — сигналы команд F(0)A(0), F(16)A(0), F(16)A(1), F(24)A(0), F(24)A(1), F(26)A(0). Элементы схемы: 2 — реле типа РЭС55А; 3 — ИС типа КР1100СК2 (AD583), 4 — К521СА3; 5, 7 — К572ПВ1А, ПА2А; 10 — К589АП16; 11, 15, 16 и 17 — 7 ИС типа К589ИР12; 18, 23-25 — 2 ИС типа К555ИД4, ИД6, ТМ2, ТМ8; 19 — 16 ИС типа КР537РУ2; 20 — 2 ИС типа К573РФ2; 21 — К1801ВМ1Б; 22 — КР556РТ1; мультивибраторы G и генераторы GN (для АЦП — 200 кГц и для МП — 8 мГц, кварц) — 4 ИС типа КМ555АГ3 и ЛН1; И, ИЛИ, НЕ — 5 ИС; операционные усилители К — 8 ИС типа К140УД6

и К574УД1, содержащие изолированные аналоговые ключи — 3 ИС типа КР143КТ1; схема 6 — два противофазно включенных прецизионных источника тока¹⁴ — 2 ИС, К140УД6; схема 12 содержит генератор КР1006ВИ1, разделительный трансформатор, стабилизаторы питания (± 12 В) и опорного напряжения (для АЦП, ИПД, ЦАП) — К140УД6. Входной НП с дифференциальным изолированным входом¹⁵ содержит 2 буферных усилителя, повторитель синфазной помехи с выходом на изолированный экран, дифференциальный каскад и активный фильтр основной помехи. В двух последних каскадах используются две пары ключей для уменьшения усиления (без нарушения балансировки схемы). В схеме усилителя ИПД такие же ключи позволяют увеличить выходной ток. С учетом диапазона входного сигнала НП ($0 \div 100$ мВ при усилении 100, смещении нулевого уровня 10 - 100 мкВ, температурном дрейфе 5 - 10 мкВ/градус, входном сопротивлении 1 - 10 МОм, подавлении синфазной и дифференциальной помех 100 и 30 дБ), СВХ и АЦП ($0 \div 10$ В) можно работать с различными датчиками (термопары, термометры сопротивления, полупроводниковые) для различных диапазонов температур ($20 \div 80$, $80 \div 300$ К или $0 \div 100$, $100 \div 1000^\circ\text{C}$), при переключаемых коэффициентах усиления и токах ИПД. В схемах НП, СВХ и АЦП предусмотрены цепи точной подстройки¹⁴⁻⁶ диапазона сигналов, коррекций погрешностей (до 0,05 - 0,1%). В схеме ЦАП с выходным усилителем нормированного сигнала ($0 \div 5$ В, $0 \div 10$ мА) предусмотрены аналогичные цепи коррекции¹².

Преобразование входного сигнала в 12-разрядный код начинается, когда по выбранному адресу в соответствующем цикле МП запускается одновибратор, формирующий сигнал управления для СВХ и АЦП. Этим же сигналом блокируется делитель частоты (24) импульсов генератора, и МП остается в режиме ожидания. Сигнал управления снимается после запуска одновибратора сброса в момент окончания цикла работы АЦП. После этого код АЦП доступен для чтения по шине МП и последующего определения линеаризованных показаний и кодов регулирования. Код регулирования с шины МП заносится в регистр ЦАП сигналом одновибратора, запускаемого по выбранному адресу в цикле МП. Разрешение сигнала ЦАП осуществляется аналогично сигналом одновибратора, на время (~ 1 с) которого размыкается изолированный ключ, шунтирующий стабилитрон в схеме источника опорного напряжения ЦАП. Состояния ключей аналоговой схемы определяются кодом регистра 11. Значения разрядов кода статуса: 1 — 9 резервируются; 10 — подключен вход датчика 2 либо вход 1; 11, 12 — коэффициент усиления (1000, 100 либо 10); 13, 14 — ток питания датчика (10, 1 либо 0,1 мА); 15 — сигнализация выполнения режима ПРТМ.

Система управляющих команд ПРТМ обеспечивает "прямое" сопряжение шин МП и КАМАК при их информационной связи через входной

и выходной регистры (R1, R2). Используемые команды КАМАК:

F(0)A(0)	— чтение регистра R1, ответ	Q = 1
F(8)A(0)	— проверка запроса (L1 = 1 после записи в регистр R1), ответ	Q=L1
F(8)A(1)	— проверка запроса (L2 = 1 после записи в регистр R2), ответ	Q=L2
F(16)A(0)	— запись данных в регистр R1, пуск цикла "Вывод" шины МП, ответ	Q = 1
F(16)A(1)	— запись адреса в регистр R1, пуск цикла "Ввод" шины МП, ответ	Q = 1
F(16)A(2)	— запись данных в регистр R1, без обращения к шине МП, ответ	Q = 1
F(24)A(0)	— стоп микропроцессора после завершения его текущего цикла обращения к шине МП, ответ	Q = 0
F(24)A(1)	— безусловный стоп микропроцессора, ответ	Q = 0
F(26)A(0)	— запуск программы микропроцессора с адреса ОЗУ, записанного в старшем байте регистра R1, ответ	Q = 0

В ПРТМ шиной МП может управлять как МП, после команды F(26)A(0), так и внешняя ЭВМ, после команд F(24)A(1) или F(24)A(0). Пуск программы МП командой F(26)A(0) выполняется после предварительной записи в регистр 15 начального адреса программы, находящейся в ОЗУ¹ 19. Сигнал команды 31, записываемый в регистр 25 синхронно с частотой 4 МГц тактовых импульсов, подается на вход МП ACLO. Процедура начального пуска выполняется по указанному адресу, младший байт которого в МП принимается как "0". Остановка программы МП командами F(24)A(1) и F(24)A(0): сигнал первой команды 30, записываемый в регистр 25 аналогично, подается на вход МП DCLO, а второй команды 29 запускает одновибратор, прохождение сигнала которого на тот же вход МП разрешается по окончании текущего цикла МП на его шине Q. После остановки МП, в режиме ожидания, шина МП освобождается и открыт доступ к ней со стороны контроллера КАМАК.

Организация взаимодействия иллюстрируется на примере команд записи и чтения. Запись данных из ЭВМ в ОЗУ осуществляется по команде F(16)A(0) после F(16)A(2): запись адреса ОЗУ с шин W в регистр 15, по стробу F(16)A(2)S1 с выхода ПЛМ 22; передача кода адреса из много-режимного регистра 15 и сброс L1 разрешается сигналом F(16)A(0) с выхода 27 дешифратора 23; запись кода в регистр адреса 17 — по стробу F(16)A(0)S1 с другого выхода ПЛМ 22; запись данных в регистр 15 — по стробу F(16)A(0)S2 с первого выхода ПЛМ 22; передача данных из регистра 15 и запись в ОЗУ (с их адресом 17) разрешается по окончании F(16)A(0) запускаемым одновибратором (цикл "Вывод"). Его сигнал подается на дешифратор 18 и вход управления МП RPLY через

одновибраторы задержки и синхронизируемый триггер 24. При этом в регистре 17 сохраняется код адреса ОЗУ (00XXXX) и сигналом 18 выбирается ОЗУ. Другие адресуемые устройства выбираются аналогично по адресу: 02XXXX*Ввод — ППЗУ, 12XXXX*Вывод — ЦАП, 12XXXX*Ввод — АЦП, 10XXXX*Ввод — коммутатор запросов, 14XXXX*Вывод — регистр статуса, 16XXXX*Ввод и 16XXXX*Вывод — входной и выходной регистры (для разрешения сигнала ЦАП также используется адрес его выбора), где X может принимать любые значения от 0 до 7, так как эта часть адреса не учитывается при дешифрации номера устройства.

Чтение данных по команде F(0)A(0) возможно после F(16)A(1): запись адреса источника информации в регистр 15 — по стробу F(16)A(1)S1 с выхода ПЛМ 22; передача кода адреса из регистра 15 разрешена сигналом F(16)A(1) с выхода 28 дешифратора 23; занесение кода в регистр адреса 17 — по стробу F(16)A(1)S2 с другого выхода ПЛМ; передача данных из устройства (с адресом в регистре 17) и занесение их в регистр 16 (с запросом L2) разрешается по окончании F(16)A(1) запускаемым вторым одновибратором (цикл "Ввод"). Его сигнал через дешифратор 18 разрешает выбор адресуемого устройства, а также следует на триггер 24 для управления циклом МП и на вход занесения регистра 16. Данные многорежимного регистра 16 доступны для чтения на шинах R (со сбросом L2) по сигналу F(0)A(0) с выхода 26 дешифратора 23.

Программа, работающая в управляющей ЭВМ, может остановить программу МП для занесения управляющей информации в его ОЗУ по определенным адресам:

- 1004 — заданное значение стабилизируемого параметра (0÷40950 мкВ);
- 1006 — задание погрешности или диапазона стабилизации (+10 мкВ, -10 мкВ);
- 1010 — ограничение кода регулирования для ЦАП (до 4095).

После окончания текущего цикла измерений с заданной температурой, остановив программу МП, можно воспользоваться информацией о завершённом цикле работы:

- 1014 — текущее значение температуры;
- 1070 — максимальное отклонение температуры от заданного значения (после входа в режим стабилизации);
- 1120 — количество зарегистрированных точек процесса установления температуры;
- 6570 — начальный адрес массива данных процесса установления температуры.

Полная информация о текущем состоянии программы и регулируемого параметра содержится в ОЗУ по адресам 1004 — 1152. Командное слово,

записываемое в регистр R1 по F(16)A(2), содержит признаки следующих команд (8 разрядов) :

- 1 — пуск алгоритма стабилизации температуры с начала;
- 4 — стоп стабилизации;
- 5 — продолжение стабилизации;
- 7 — запрос на сообщение текущей температуры;
- 8 — запрос на сообщение о количестве выходов температуры из заданного диапазона.

После выполнения команды или по заданным условиям МП отвечает записываемым в регистр R2 словом сообщения (12 разрядов) :

- 1 — температура в заданном диапазоне (режим стабилизации установлен);
- 2 — температура вышла из диапазона (продолжаются попытки установить режим);
- 3 — стабилизация невозможна (работа окончена);
- 8 — команда стоп стабилизации выполнена;
- 9 — появился внешний сигнал блокировки программы (работа будет продолжена после его снятия);
- 10 — ошибка в исходных данных из ЭВМ;
- 11 — получена ложная команда от ЭВМ;
- 12 — ошибка при выполнении табличных вычислений.

Подпрограмма входного контроля ПРТМ проверяет соответствие поступающей информации установленным ограничениям. Например, заданная температура не должна превышать 40950 мкВ, а ограничение кода регулирования — 4095. Все поступающие команды должны соответствовать приведенному списку. При обнаружении несоответствия МП заносит в R2 ответное сообщение и запрос L2. Если заданная температура T_y менее 10% от ее максимального значения, меняется код статуса так, что увеличивается, например, усиление НП до 1000.

Продолжительность программы стабилизации, имеющей циклическую организацию, определяет минимальный период (0,6-0,8 с) повторения операций определения текущей температуры (T_t) и поиска регулирующей величины (T_p). Погрешности, возникающие из-за дискретности и разброса времени выполнения операций стабилизации, снижаются сокращением времени при применении быстрых алгоритмов табличной обработки и синхронизацией, таймированием периодов с использованием импульсов блокировки программы. В каждом цикле проверяются условия выполнения программы и затем формируются сообщения, если заданная температура (T_y) установилась и стабилизируется в течение определенного количества (200) циклов, а также если это еще не достигнуто или считается невозможным после выполнения максимально допустимого числа циклов. По окончании цикла проверяется наличие

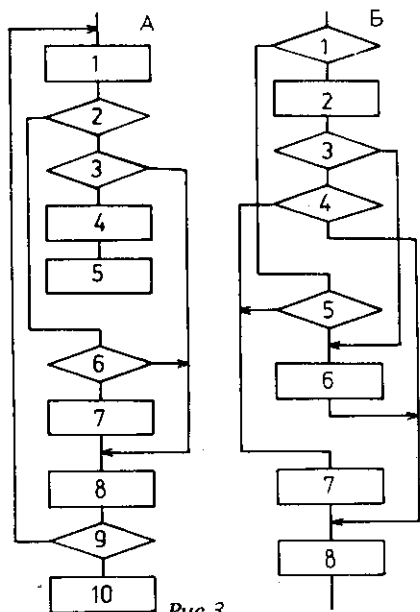


Рис.3

запроса от ЭВМ и повторение циклов может быть прервано для выполнения поступившей команды. На рис.3 показан цикл программы стабилизации (А), где 1 — определение температуры, 2 — проверка наличия отклонения температуры от заданных границ диапазона, 3 — проверка выполнения максимального числа циклов, 4 — сообщение о невозможности выполнения режима стабилизации, 5 — ожидание команды, 6 — проверка выполнения заданного числа (200) циклов, 7 — сообщение о выполнении режима стабилизации, 8 — поиск кода управления, 9 — проверка наличия запроса, 10 — выполнение команды. Сообщение 7 сопровождается соответствующей сигнализацией в регистре статуса.

Подпрограмма определения температуры выполняет операцию занесения кода в регистр статуса, 4 цикла запуска и чтения АЦП с усреднением его данных, определение по таблицам линеаризованного показания (с учетом нелинейности датчика в расширенном диапазоне температур), проверку отсутствия случайного сбоя (достоверными считаются показания с разбросом не более 3%) и запись показаний в ОЗУ (для запоминания графика процесса регулирования). После входа в режим стабилизации контролируется количество выходов температуры из заданной зоны стабилизации и максимальное отклонение температуры от заданного значения T_y .

Подпрограмма поиска кода управления проверяет, находится ли температура T_T в зоне больших отклонений $T_o = (0,9 - 1,1) T_y$. Если T_T вне зоны T_o , в зависимости от знака рассогласования температур ($T_y - T_T$) устанавливается максимальное либо минимальное значение управляющей величины ($T_{ма}$ либо $T_{ми}$). Если T_T в зоне T_o , то по соответствующим таблицам определяются и суммируются (с учетом "весовых" коэффициентов) составляющие величины регулирования T_p , пропорциональные рассогласованию, интегралу и производной от изменения T_T , а также составляющая T_p для компенсации мощности нагрева, рассеиваемой в окружающую среду при различных температурах. На рис.3 иллюстрируется работа этой подпрограммы (Б), где 1, 3, 4, 5 — проверка условий: T_T в зоне T_o , $T_p \leq T_{ма}$, $T_p \geq T_{ми}$ и $T_y - T_T > 0$; 2 — поиск

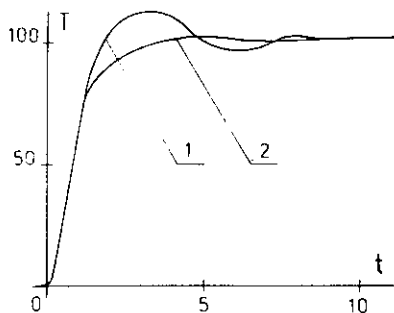


Рис.4

составляющих и определение кода T_p ; 6 и 7 — присвоение коду T_p значения $T_{ма}$ либо $T_{ми}$; 8 — запись кода T_p в регистр ЦАП.

Подпрограмма поиска пропорциональной составляющей T_p ведет поиск ее величины и знака по таблицам с учетом величины и знака рассогласования в установленной зоне T_0 . Учет "гистерезиса регулирования" ведется дополнительно в зоне малых отклонений (например, $T_y \pm 5$ мкВ). Это позволя-

ет, учитывая реальную инерционность и характеристики (таблицы) адаптивного управления, улучшать качество программируемого регулирования.

Испытания блока ПРТМ проводились совместно с удаленными на 15-20 м датчиками и нагревателем азотного и гелиевого криостата, управляемым через дополнительный усилитель мощности (40 Вт при сопротивлении нагревателя 10 Ом). При используемых датчиках, например термопара медь-константан, и диапазоне сигналов $0 \div 40$ мВ основная погрешность измерений составила $\sim 0,05-0,1\%$. Погрешность стабилизации составляет 0,22% (не более 1% от величины T_y в рабочем диапазоне $9 \div 40$ мВ). На рис.4 показаны примеры регистрируемых графиков регулирования (рост температуры $T \sim 100\%$, время $t = 0 \div 10$ мин): 1 — нагрев на 25 К с перерегулированием (ошибка в определении пропорциональной составляющей T_p) и 2 — такой же нагрев без перерегулирования (после программной коррекции T_p). При задаваемых шагах ($1 \div 20$ К) в диапазонах ($20 \div 80$ и $80 \div 300$ К) качество регулирования характеризуется погрешностью 0,2 К при времени установления 5-7 минут и неизменном знаке скорости изменения температуры. Блок ПРТМ длительное время успешно используется (для контроля и регулирования температуры монокристаллического образца) в составе спектрометра СНИМ-2 на импульсной магнитной установке ИМУ-2¹¹ в условиях интенсивных помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагов В.А. и др. — ОИЯИ, 13-89-133, Дубна, 1989.
2. Замрий В.Н., Роганов А.Б. — ОИЯИ, Р13-89-344, Дубна, 1989.
3. Вагов В.А. и др. — ОИЯИ, 13-86-742, Дубна, 1986.

4. *Алексенко А.Г. и др. – Применение прецизионных аналоговых микросхем. М.: Радио и связь, 1985, с. 220, 83, 79.*
5. *Замрий В.Н., Роганов А.Б. – ОИЯИ, 13-86-106, Дубна, 1986.*
6. *Замрий В.Н. – ОИЯИ, 13-86-538, Дубна, 1986.*

Рукопись поступила в издательский отдел
4 июля 1989 года.