

Разработка системы контроля и управления тепловым режимом микропроцессора «Эльбрус-4С+»

Магистерская диссертация

Студент Клишин П.А.

Научный руководитель к. т. н. Груздов Ф.А.

Микропроцессор «Эльбрус-4С+»

- 8 универсальных ядер
- Частота 1200 МГц
- Пиковая производительность не менее 150 Gflops
- Технология 28 нм
- Расчетная выделяемая мощность при максимальной нагрузке до 150 Вт

Содержание работы

- Анализ решения задачи в зарубежных разработках
- Проектирование и реализация конфигурируемой системы управления тепловым режимом на жесткой логике
- Верификация и результаты тестирования

Энергопотребление и нагрев процессора

Качественная зависимость мощности от частоты:

$$P = CV^2f$$

где:

f – частота процессора (регулируется);

V – напряжение питания (постоянно);

C – эффективная перезаряжающаяся ёмкость (суммарная ёмкость переключающихся цепей микропроцессора). C зависит от выполняемой программы (случайная величина $C(t)$).

Качественная зависимость температуры кристалла от мощности:

$$T = T_{air} + R_{temp} * P$$

где:

R_{temp} (°C/Вт) – тепловое сопротивление системы охлаждения;

T_{air} – температура окружающей среды.

Конфигурируемость системы

На стадии разработки процессора точно неизвестны параметры R_{temp} , C_{temp} , $C(t)$ (в том числе для случая перехода от 0% до 100% загрузки процессора).

Эти параметры, а также значение V и максимально допустимые значения f и T уточняются после изготовления опытных образцов экспериментально.

Вывод:

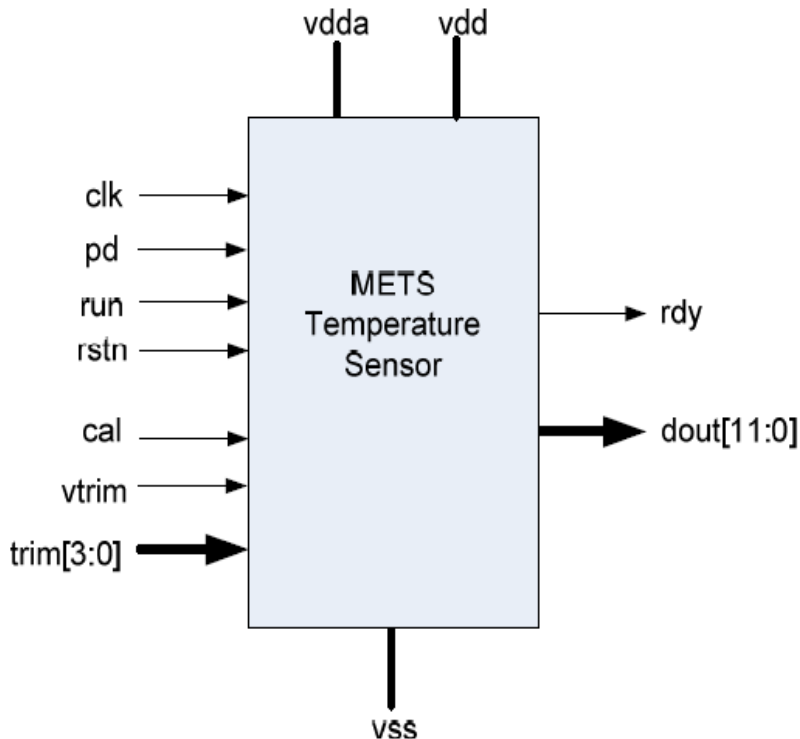
Разрабатываемая система должна обеспечивать возможность программной настройки всех основных параметров.

Решения зарубежных производителей

- Динамическая регулировка напряжения
- Отключение питания модулей процессора при их неактивности (power-gating)
- Разделение сетей питания core и uncore частей
- PCU (Power Control Unit)
- Использование термосенсоров

В соответствии с установленными ограничениями проекта, вызванными сложностью и трудоемкостью реализации, был выбран вариант с использованием термосенсоров и блока управления частотой. Т.е. единственный непосредственно измеряемый параметр – температура кристалла, а единственный регулируемый – частота.

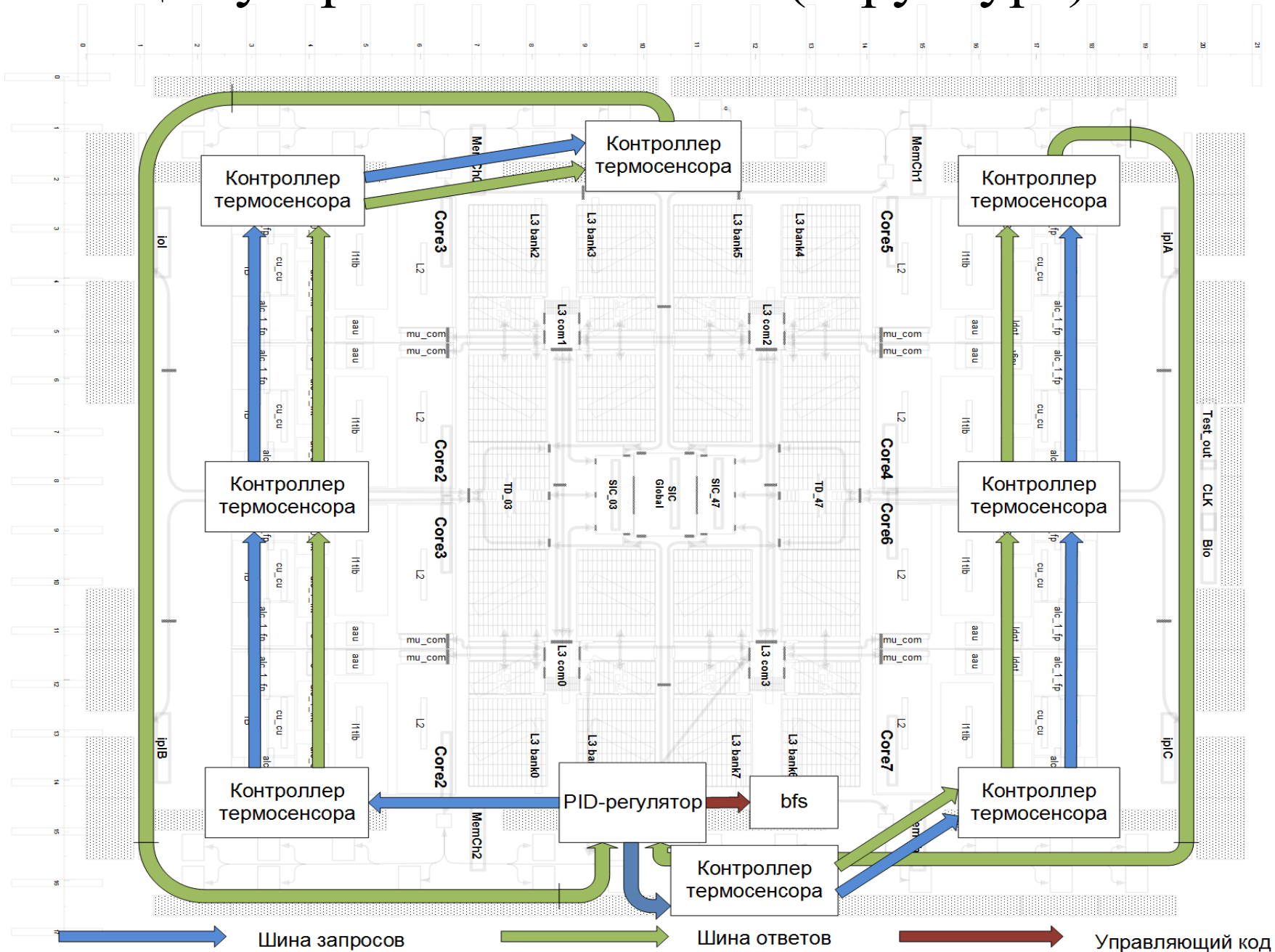
Примененный термосенсор



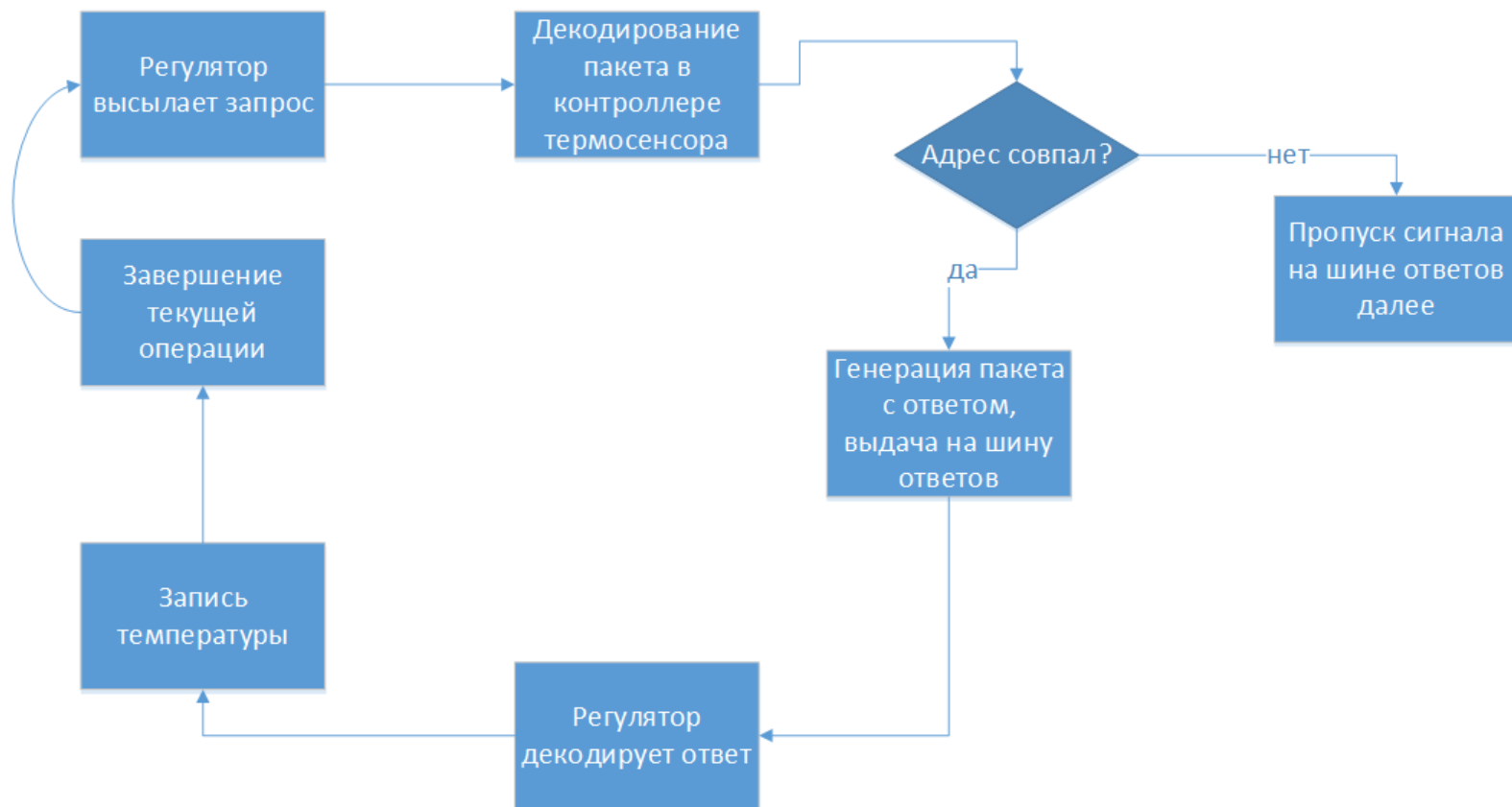
Moortec Embedded Temperature Sensor (METS) MR74060:

- Точность $\pm 5^{\circ}\text{C}$ в неоткалиброванном состоянии
- Точность $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ в откалиброванном состоянии
- Разрешение 12 бит
- Рабочая частота от 0.75 до 2 МГц
- Диапазон измеряемых температур от -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$

Общее устройство системы (структура)



Общее устройство системы (логика)



Пакет с запросом



Пакет с ответом



Контроллер термосенсора

Decoder – при совпадении адреса со своим передает информацию в transmitter

Transmitter – генерирует пакет с ответом или пропускает сигнал с шины, не изменяя его

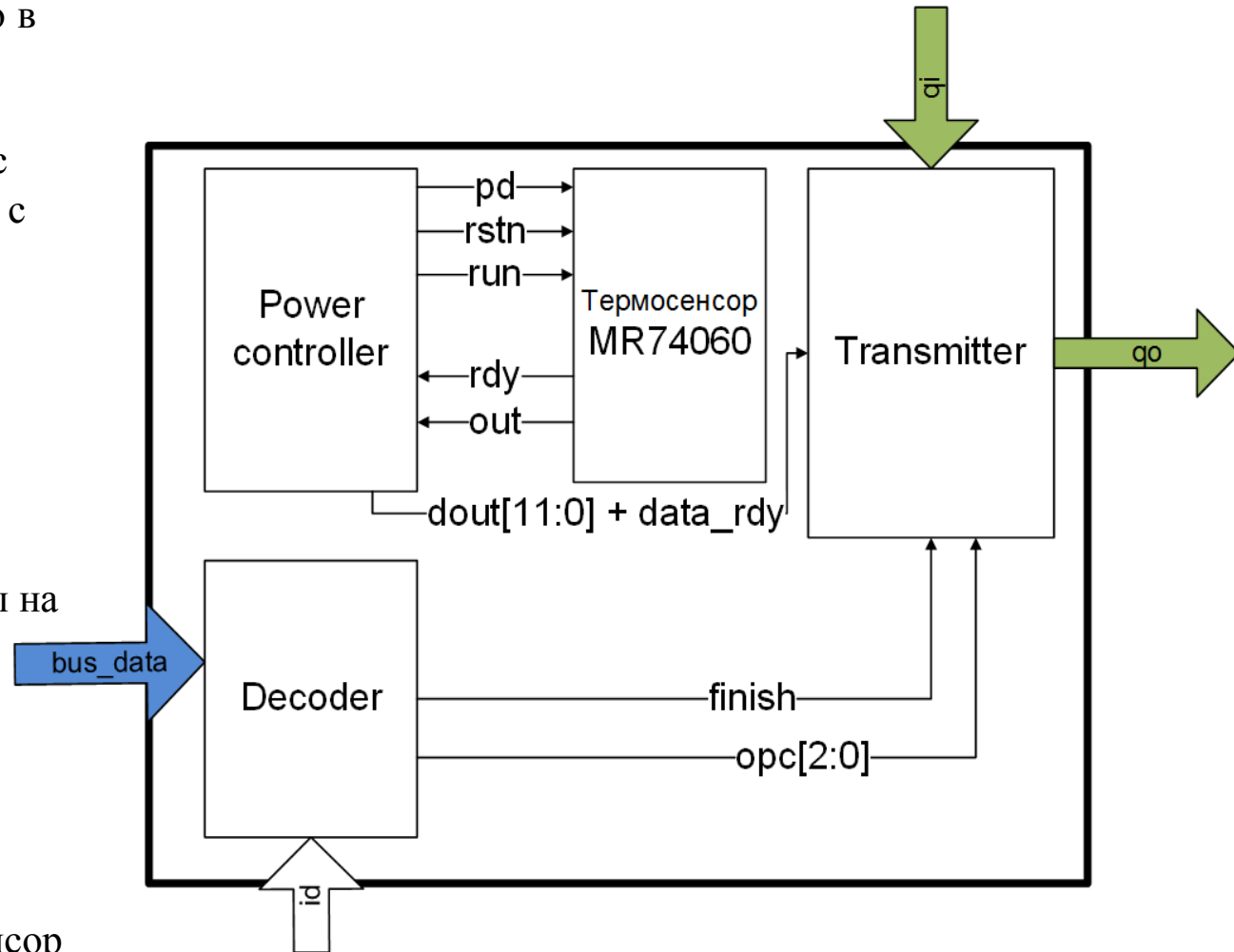
Power controller – запуск и инициализация термосенсора:

1. pd в низкий уровень
2. ожидание 50 мкс
3. rstn в низкий уровень хотя бы на такт
4. ожидание 4 такта
5. run в высокий уровень для начала работы

pd (power down) – сигнал включения (если 1, то термосенсор выключен)

rstn – сигнал сброса (активный 0)

run – сигнал выполнения операций



Структурная схема PID-регулятора

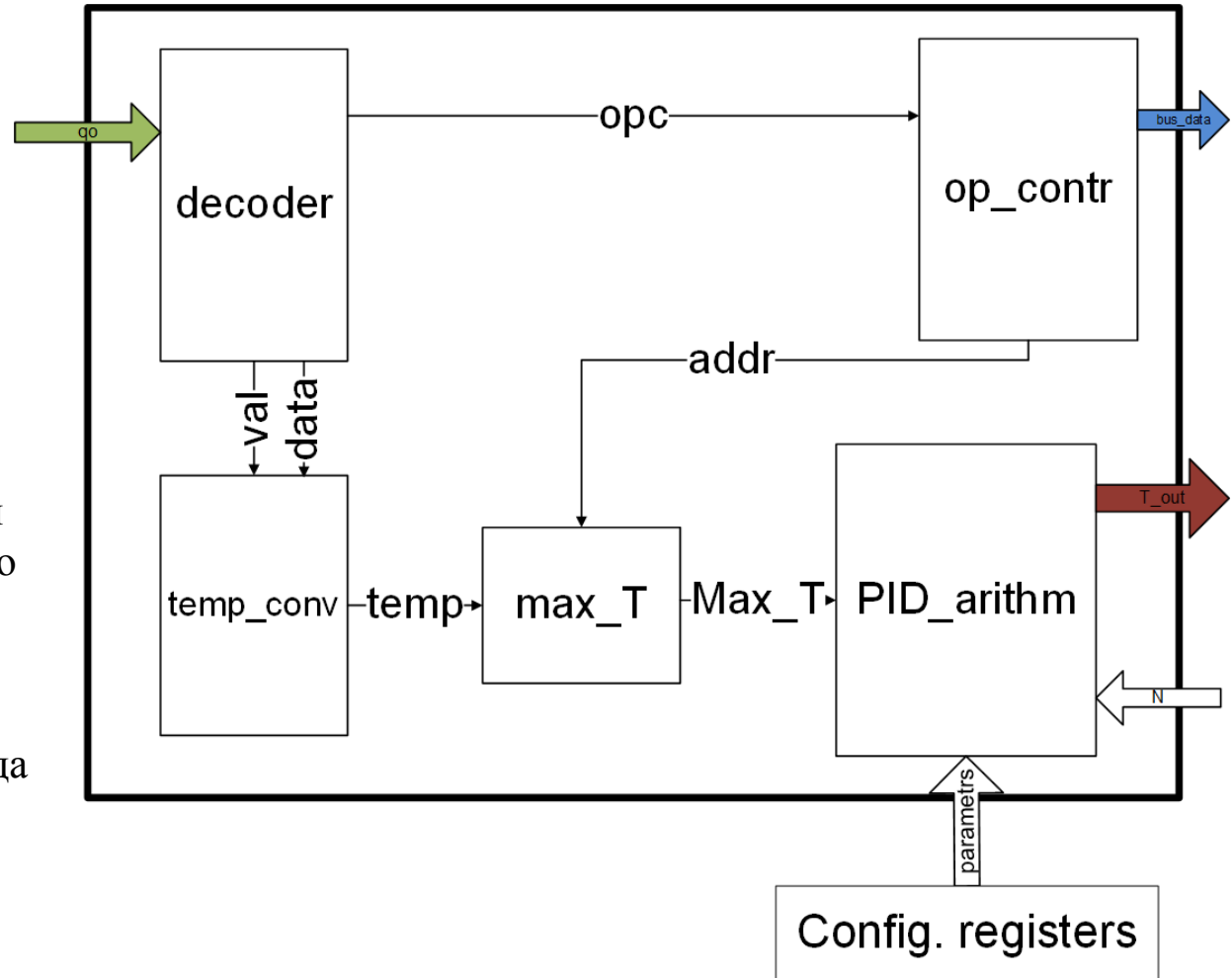
Temp_conv – конвертирует код от термосенсора в реальное значение температуры (9 знаков целая часть, 3 дробная)

Max_T – хранение всех температур в системе и поиск максимальной среди них при каждом полном обновлении массива

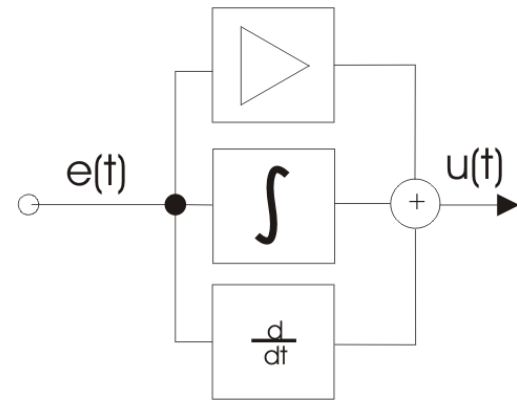
Op_contr – контроль выполнения протокола общения центрального контроллера с термосенсорами:

1. последовательный опрос по адресам
2. запрос высылается только когда пришел ответ на предыдущий и температура сохранена

PID_arithm – генерация управляющего сигнала, параметры загружаются из конфигурационных регистров



Формула генерации управляющего сигнала



- $e(t)$ – разница между желаемой температурой и максимальной в системе (невязка)
- Пропорциональная составляющая – $K_p e(t)$
- Интегральная составляющая – $K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$
- Дифференциальная составляющая – $K_d \frac{de}{dt}$
- $U(t)$ – управляющий сигнал

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}$$

Дискретная формула:

$$U_k = U_{k-1} + K_p(e_k - e_{k-1}) + T_s e_k / K_i + (K_d / T_s)(e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2})$$

(T_s – временная постоянная)

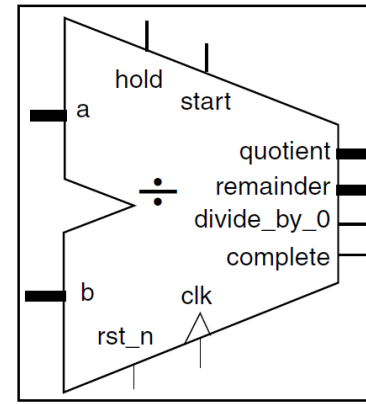
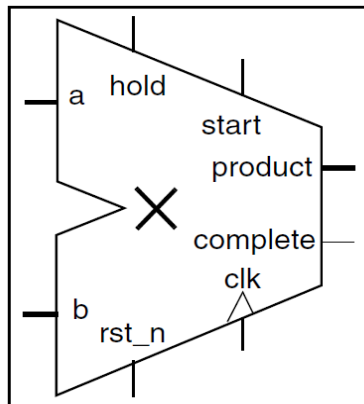
Реализация арифметических операций в блоках temp_conv и PID_arithm

Требования:

- Выполнение арифметических операций с фиксированной точкой
- Поддержка знаковой арифметики
- Быстродействие
- Минимизация занимаемой площади

Решение:

- Использование синтезируемых последовательных устройств из библиотеки DesignWare: sequential multiplier и sequential divider



Интегральное насыщение

Интегральное насыщение – негативная ситуация, когда управляющий сигнал продолжает расти/убывать, но уже не участвует в процессе регулирования.

Возможные решения:

- Ограничение скорости нарастания входного воздействия
(уменьшает скорость реакции системы)
- Алгоритмический запрет интегрирования
(подходит под требования проекта)
- Компенсация насыщения с помощью дополнительной обратной связи
(требуется большего количества оборудования)
- Условное интегрирование
(обобщение алгоритмического запрета)

*Выбран **алгоритмический запрет** из-за малого количества оборудования, необходимого для реализации, и отсутствия ухудшений скорости работы*

Контроллер bfs

Основная функция – обработка управляющего сигнала от PID-регулятора и передача команд блоку изменения частоты

Формула выходной частоты:

$$f_i = f_{base} * (16 / N)$$

f_{base} – частота базового синхросигнала

N – коэффициент изменения частоты

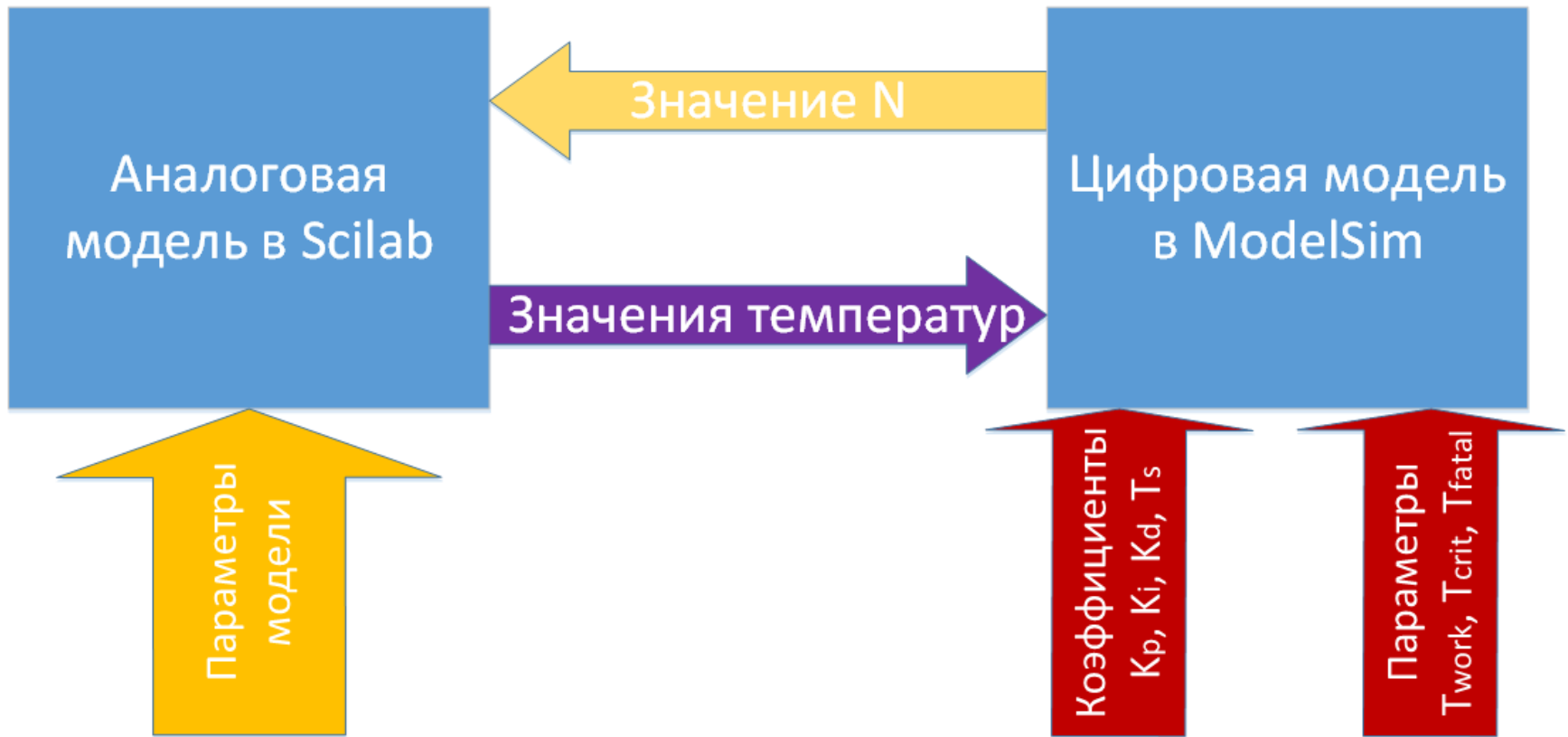
Максимальное и минимальное значения N загружаются из конфигурационных регистров (в данный момент от 12 до 27, что соответствует частотам от 590 МГц до 1333 МГц)

N изменяется с шагом 1 при изменении управляющего сигнала $U(t)$

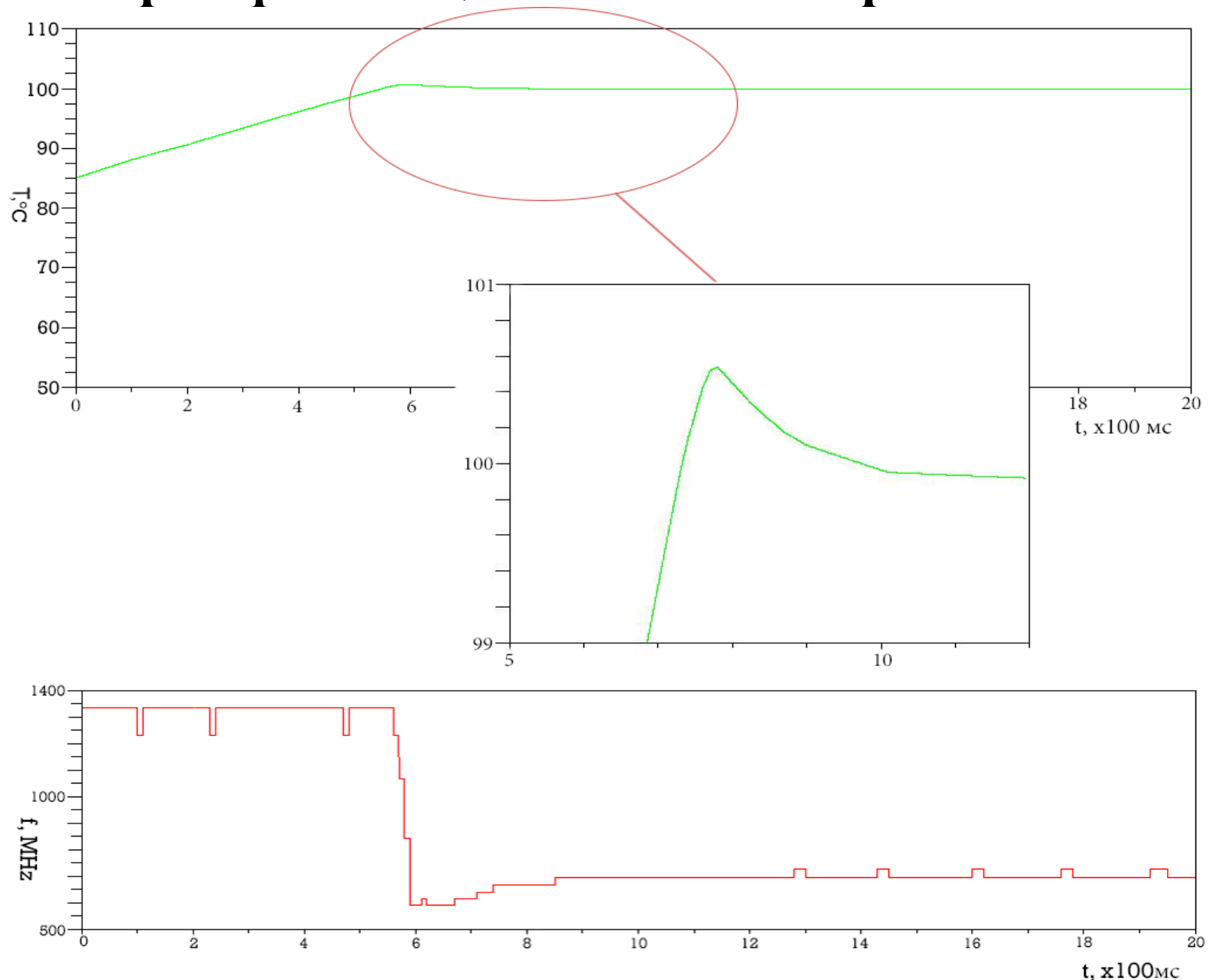
Конфигурируемые параметры СИСТЕМЫ

Название	Формат	Роль в системе
K _i , K _p , K _d	[7:0]	Интегральный, пропорциональный и дифференциальный коэффициенты
T _{work}	[11:0]	Температура начала активного регулирования
T _{crit}	[11:0]	Желаемое значение температуры
T _{fatal}	[11:0]	Значение температуры, при котором должна быть аварийно завершена работа МП
time _{const}	[7:0]	Временная постоянная
f _{base} , f _{max}	[11:0]	Базовое и максимальное значения частот для блока bfs
N _{min} , N _{max}	[5:0]	Минимальное и максимальное значения коэффициента изменения частоты N
K, Y	[11:0]	Коэффициенты для преобразования кода от термосенсора в значение температуры (берутся из документации к термосенсору)

Верификация и тестирование



Верификация и тестирование



Результаты

- Разработана система контроля и управления тепловым режимом процессора
 - Система реализованная в виде контроллера на жесткой логике
 - Управление параметрами системы выполняется через конфигурационные регистры
- Проведено тестирование, показавшее ее работоспособность
 - В установившемся режиме отклонение температуры от желаемого значения не превосходит 0.2°C (по тестам)
 - Реализован алгоритм борьбы с интегральным насыщением
- Возможны дальнейшие оптимизации
 - Разделение сетей синхросигнала для ядер или для core и uncore частей

Спасибо за внимание!