

Калашников Д.Е.

студент группы М24-112

Хромов А.В.

научный руководитель

Разработка программно-аппаратного комплекса для радиоизотопного сигнализатора предельного уровня в технологических процессах в нефтехимии и металлургии

Работа выполнена на базе
Межкафедральной лаборатории экспериментальной
ядерной физики ИЯФИТ НИЯУ МИФИ

27.06.2025

Введение в предмет разработки

Описание продукта проекта

Линейка радиоизотопных приборов для технологического контроля производственных процессов, проходящих в жестких внешних условиях (высокая температура, агрессивная среда, высокое давление)

Отрасли реализации проекта

Черная металлургия

Нефтехимическая промышленность

Строительная отрасль

Целлюлозно-бумажная промышленность

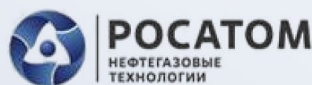


Схема работы
гамма-реле
(сигнализатора
уровня)

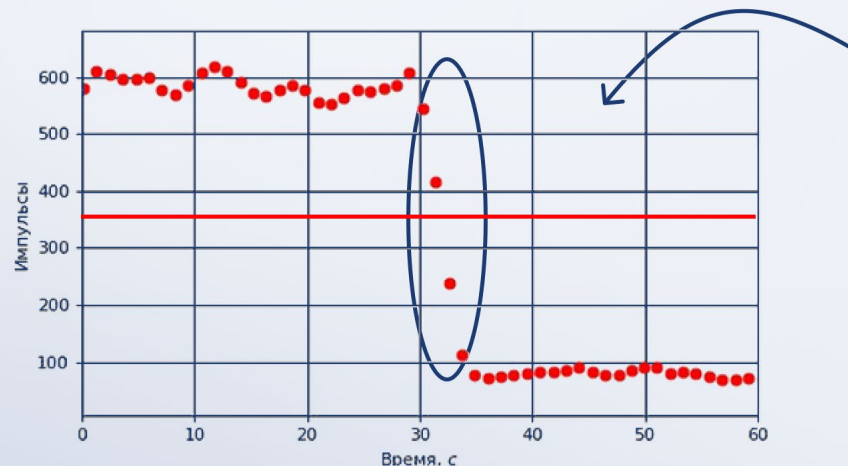
Принцип работы прибора

Источник излучения

Cs-137 с монохроматическим спектром γ -излучения ($E = 662$ кэВ)

Детектор излучения

Сцинтиллятор NaI (Tl): цилиндр $\varnothing 50$ см, H50 см
Матрица из 4 SiPM 6x6 мм



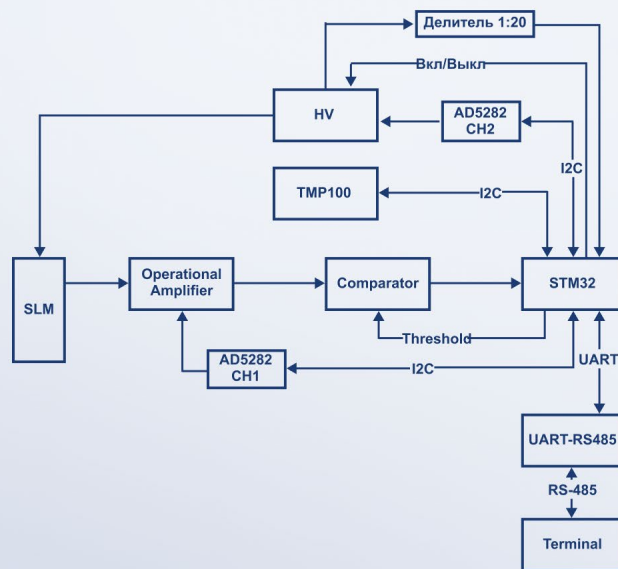
В момент резкого снижения скорости счета импульсов на детекторе можно судить о превышении заданного уровня

$$\mu_{\text{воздух}} \sim 1.12 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$$

$$\mu_{\text{уголь}} \sim 0.081 \text{ см}^{-1}$$

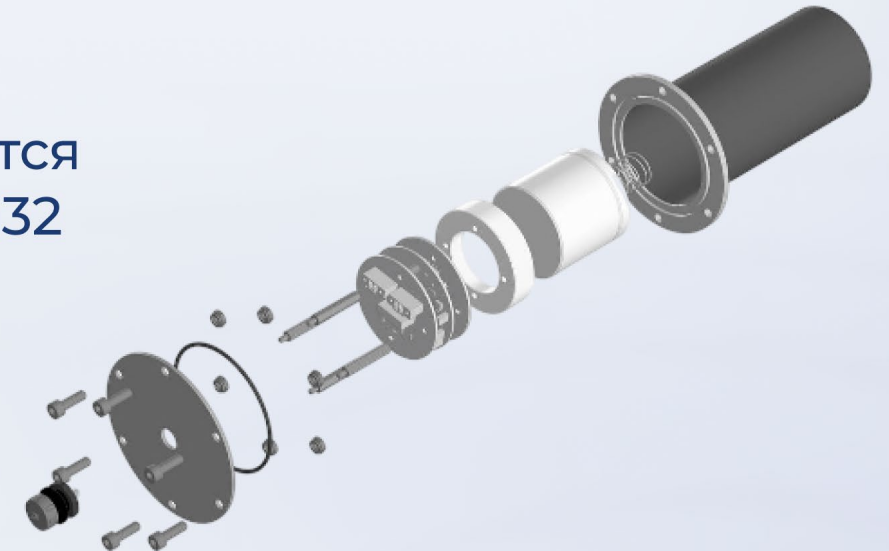
Функционал

1. Управление питанием матрицы SiPM
2. Сбор данных с датчиков (температура, напряжение, скорость счета)
3. Передача информации в цифровом виде для дальнейшей обработки



«Сердцем» блока детектирования является микроконтроллер STM32 поколения F4.

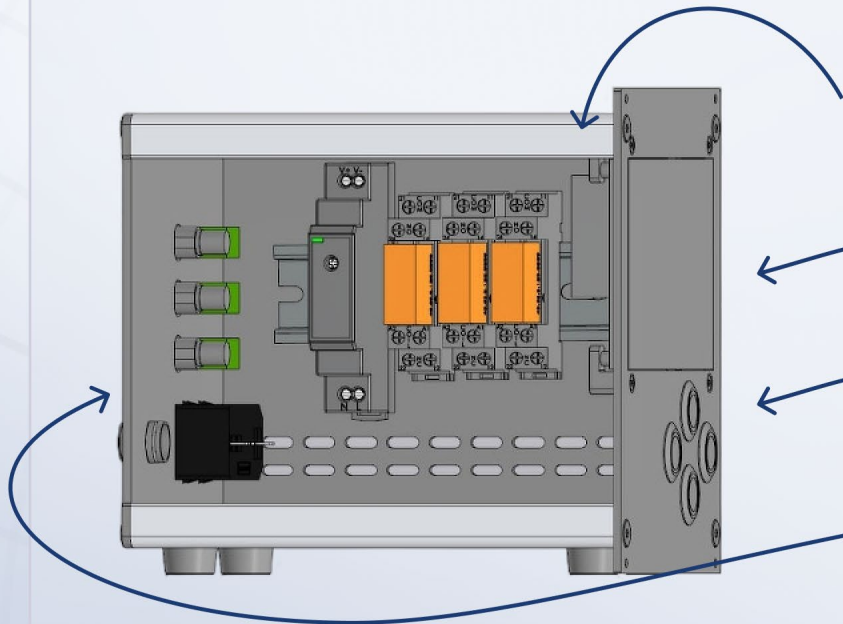
Разработанная прошивка МК была протестирована и модифицирована для обеспечения необходимого функционала



Блок обработки информации

Функционал

1. Коммуникация с микроконтроллером БД
2. Управление параметрами сбора данных
3. Взаимодействие с пользователем
4. Управление релейными выходами



Одноплатный компьютер Raspberry Pi 3

Дисплей IPS 5"

Ввод при помощи кнопок

Питание 220V

3 релейных выхода

RS-485 для работы с блоком детектирования

Блок-схема работы



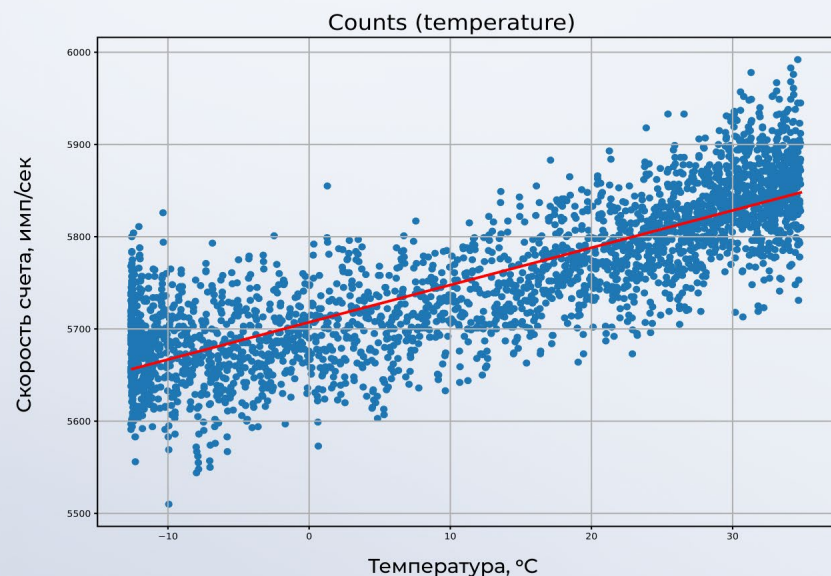
Стек технологий

Язык программирования Python3.13 (no-GIL)
Графический фреймворк Tkinter



Температурная стабильность

Проведены измерения при отсутствии механизмов компенсации температурного хода SiPM. Отмечена зависимость скорости счета и температуры (в частности, в диапазоне от -10 до 30 °C)



$$k = 4 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$
$$C_0 = 5700$$

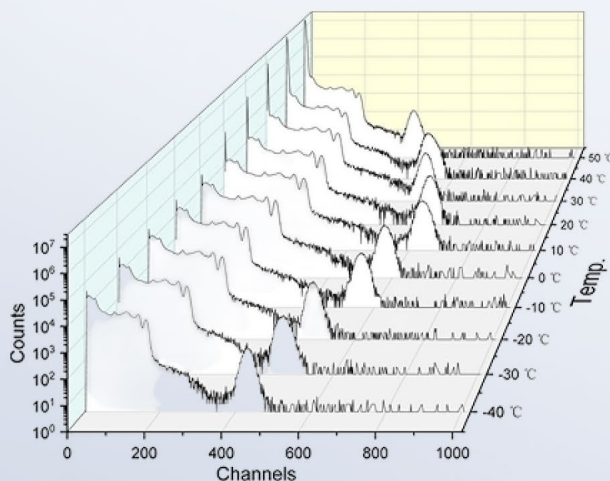
Для сравнения:

$$\sigma \sim 50$$

$$\Delta C = 160 \text{ (за } 40 \text{ }^{\circ}\text{C)}$$

Методы температурной компенсации

1. Фундаментальный: корректировка напряжения смещения SiPM, чтобы перенапряжение оставалось постоянным
2. Эмпирический: корректировка порога дискриминатора, чтобы захватывать постоянное число событий и отсекается от шумов SiPM



Из «Temperature dependence of SiPM array coupled $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}^{3+}$ detector performance»
DOI: 10.1016/j.nima.2021.166112

Методы температурной компенсации

1. Фундаментальный: корректировка напряжения смещения SiPM, чтобы перенапряжение оставалось постоянным

$$K_{\text{упр}} = 22 \text{ мВ/}^{\circ}\text{C}$$

Для учета изменения на 1 °C требуется чувствительность ЦАП в ~20 мВ в рабочем диапазоне. Предположение: линейное смещение

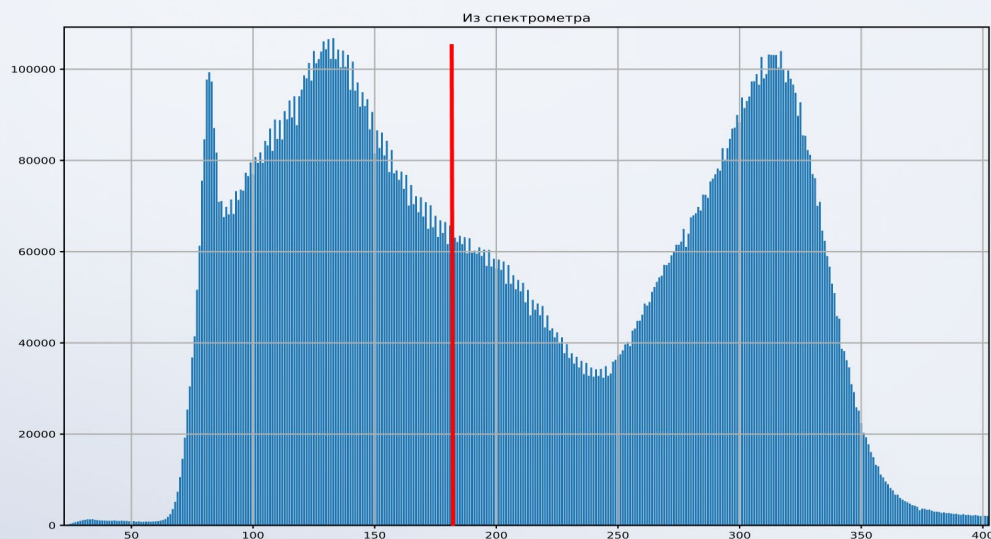
Однако с существующей электроникой получилось добиться (в среднем)

а) 56 мВ/канал с относительно линейной переходной характеристикой в широком диапазоне (19..32 В)

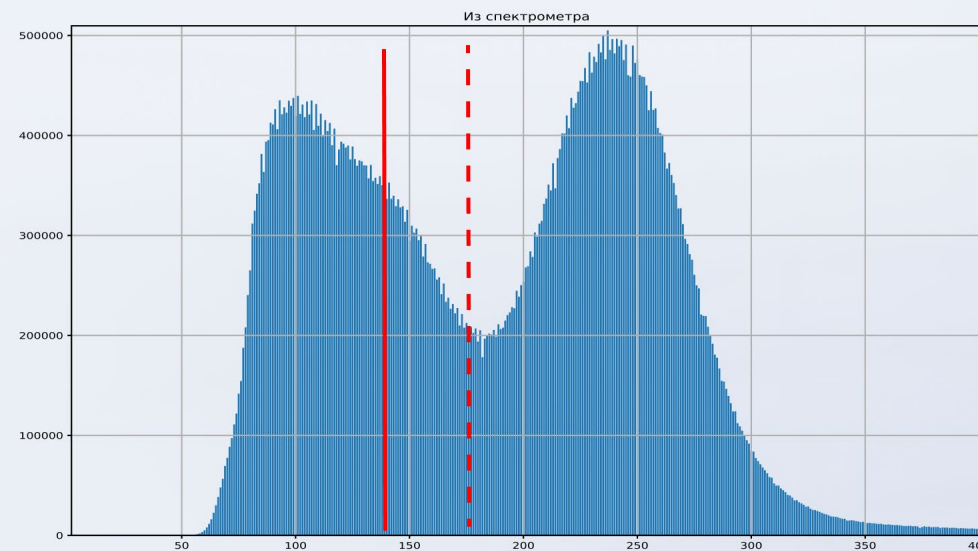
б) 5 мВ/канал в очень узком диапазоне (около 30 В) и большой нелинейностью в расширенном диапазоне

Методы температурной компенсации

2. Эмпирический: корректировка порога дискриминатора, чтобы захватывать постоянное число событий и отсекается от шумов SiPM

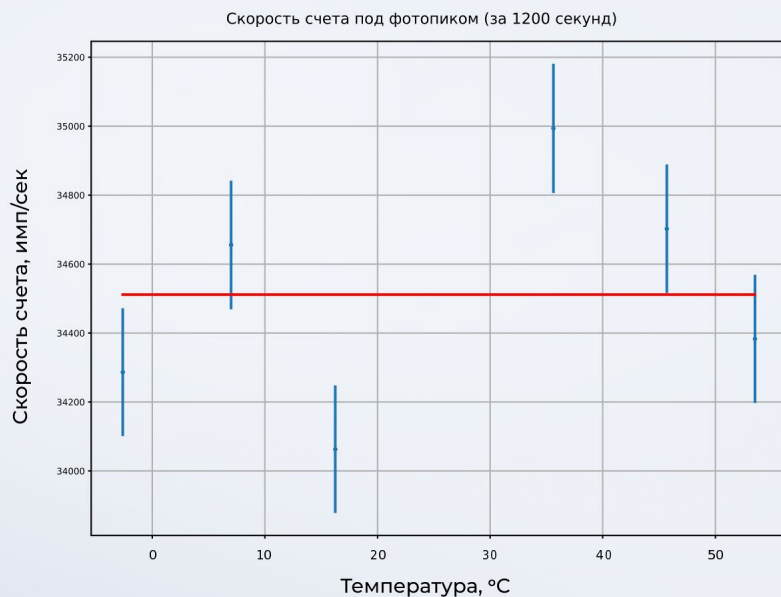


Cs-137 @ 662 кэВ, 60 °C

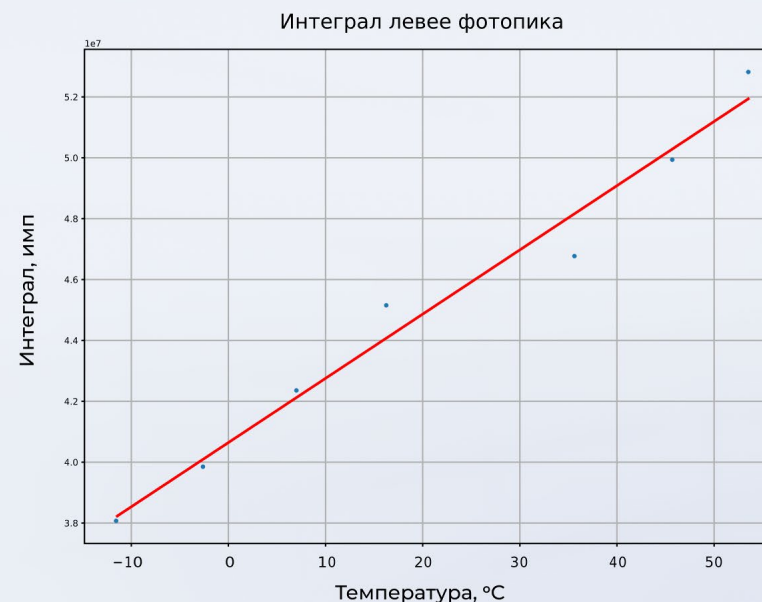


Cs-137 @ 662 кэВ, -20 °C

«Эмпирическая» компенсация



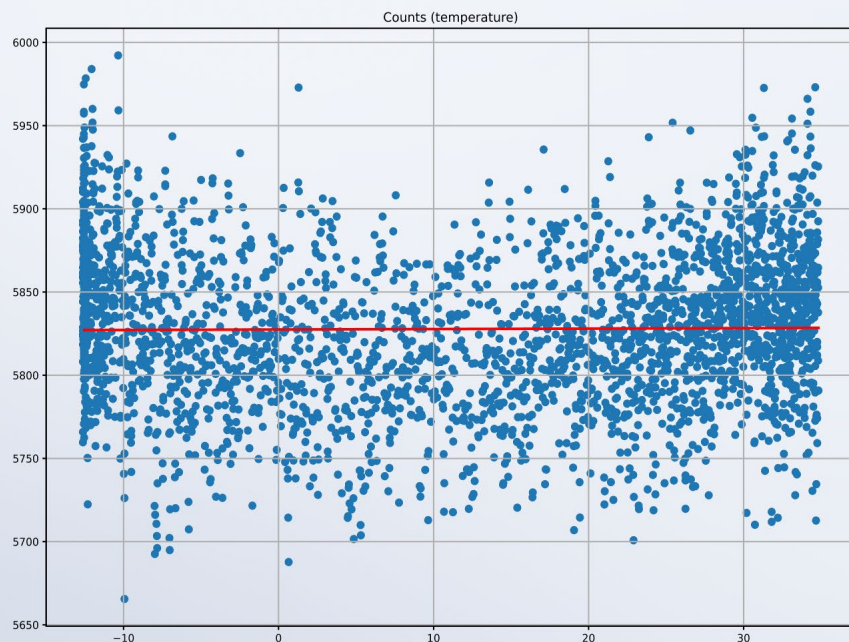
Соотношение между событиями в фотопике и левее (комптон+шумы): 48% к 52%



С ростом температуры доля фотопика уменьшается (за счет роста шумов SiPM)

Методы температурной компенсации

3. Подгоночный: нормировать показания скорости счета на множитель, полученный из температурной зависимости



Вводим поправочный множитель
$$f(T) = C(T') / (kT + C_0)$$

Референсная точка: $T' = 30\text{ °C}$
 $\Rightarrow C(T') = 5830$

Разработка программно-аппаратного комплекса для радиоизотопного сигнализатора предельного уровня в технологических процессах в нефтехимии и металлургии

Калашников Д.Е., студент М24-112
DEKalashnikov@mephi.ru



«Идея должна работать не в принципе, а в металлическом корпусе»

Д.И. Менделеев

Для ответов на вопросы

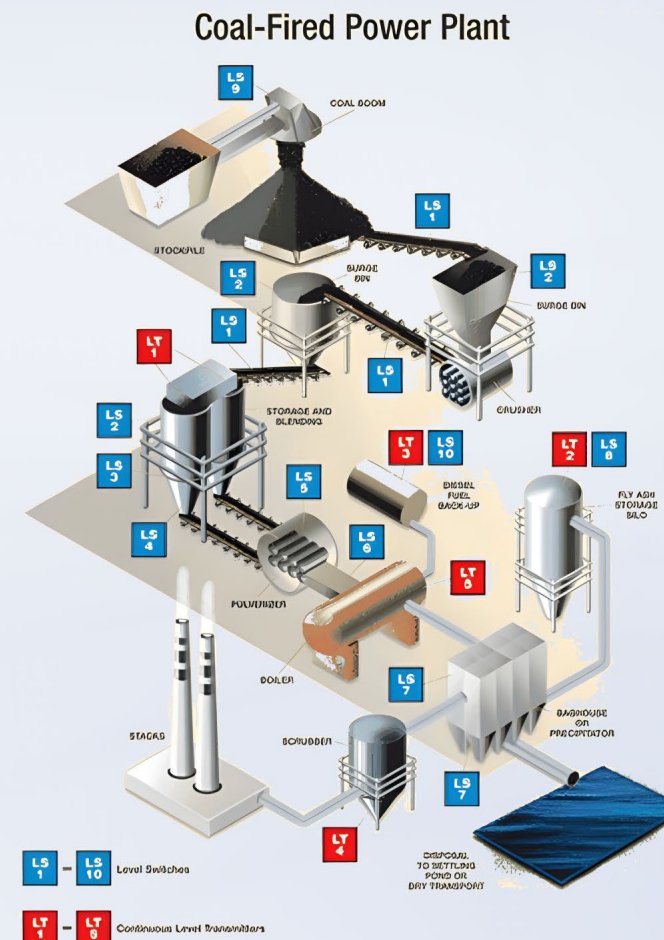
Введение в предмет разработки

Пример технологического процесса

Бункеры разделяют по виду использования:

- > приёмные – для компенсации перерывов в транспортировке сырья
- > промежуточные – для обеспечения равномерной загрузки технологических линий
- > отпускные – для недолгого хранения и загрузки готовой продукции в транспортную тару

В условиях агрессивной среды, высоких температур или влажности приборы по другой технологии не могут работать

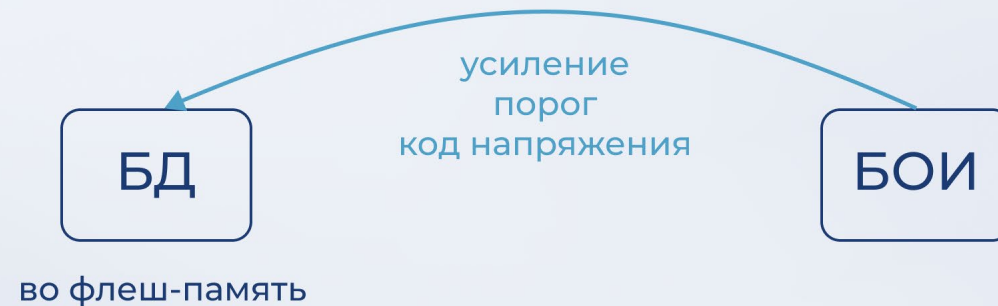


Информационные блок-схемы

Считывание



Управление (ручное)



Информационные блок-схемы

Управление (автоматическое)



Сигнализация

