



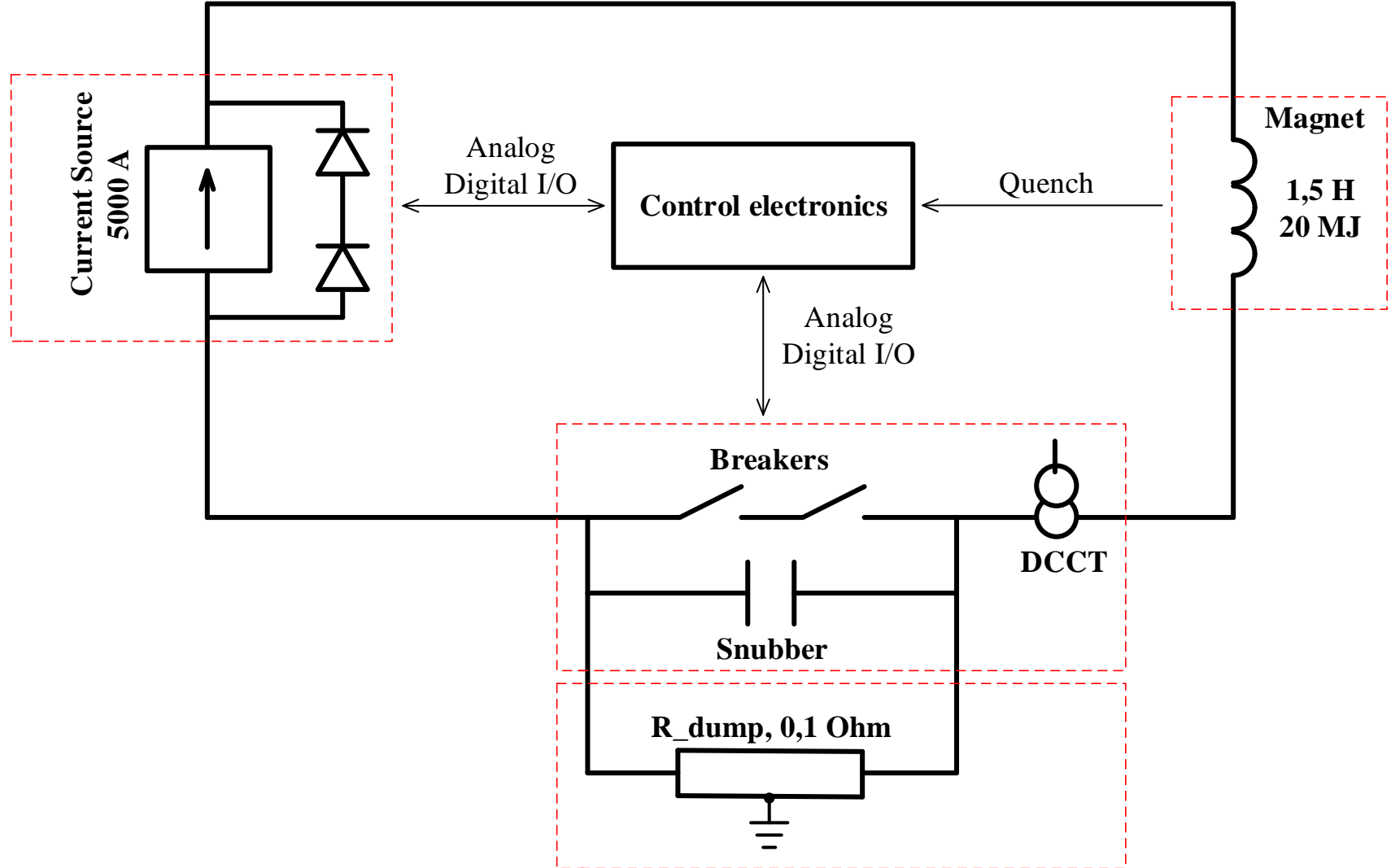
Power Supply and Energy Extraction System for the SPD Solenoid Magnet

Erokhin Aleksandr, BINP

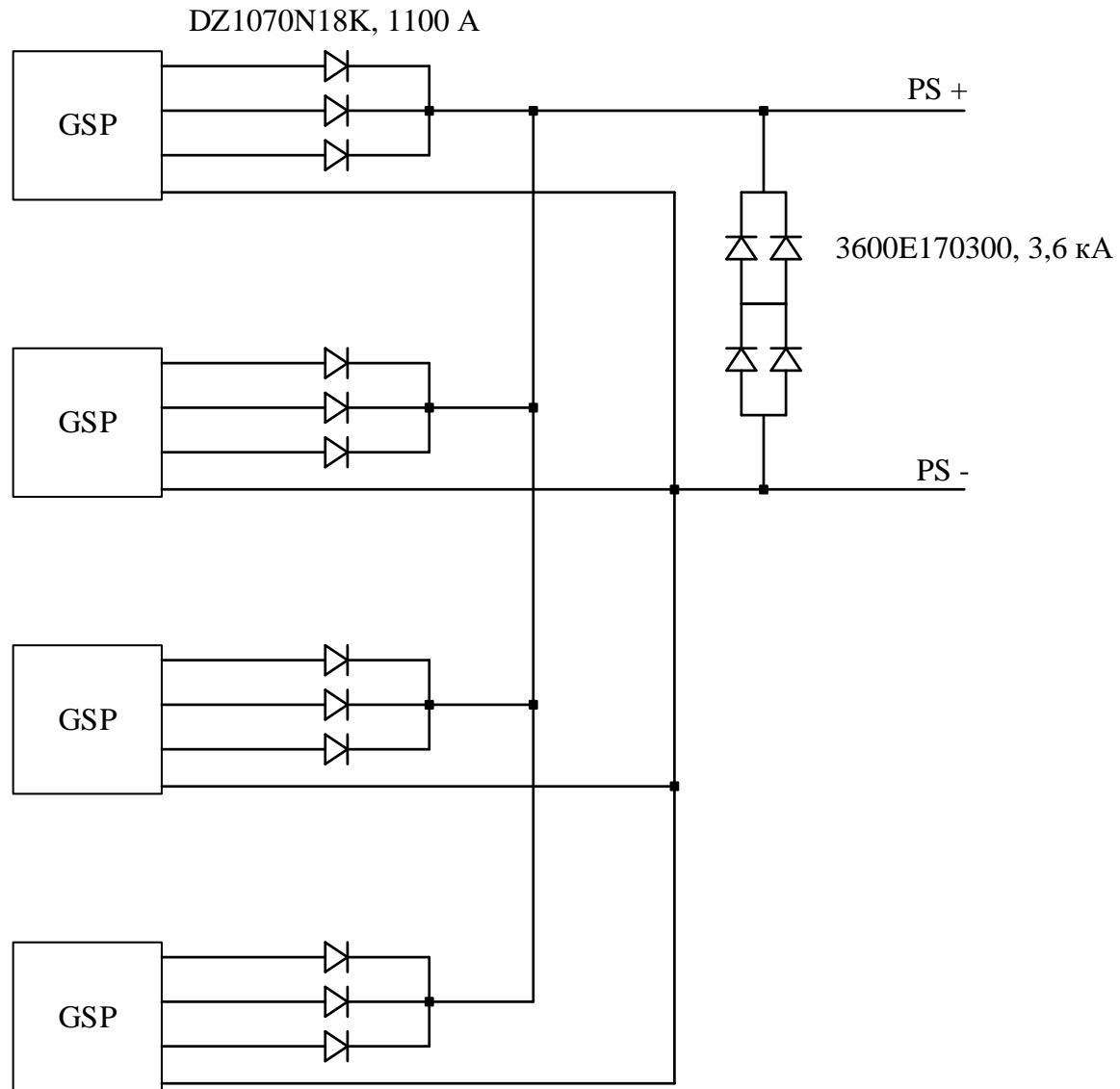
BINP - JINR, 16.11.2023

-
- Powering Circuit
 - Cabling
 - Commutator
 - Racks position
 - Thermal loses calculations
 - Minutes of meeting 23.10.2023

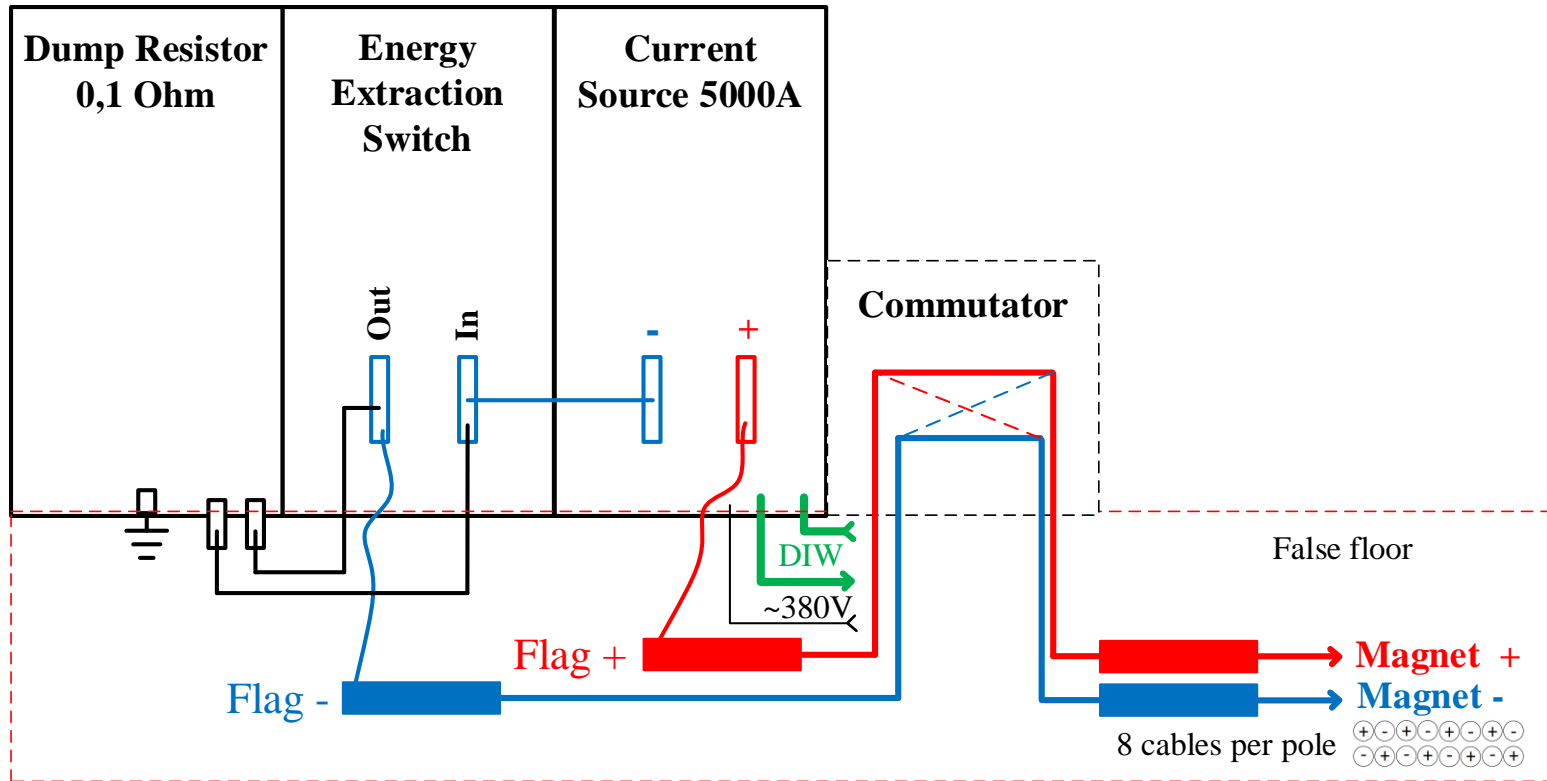
Powering circuit



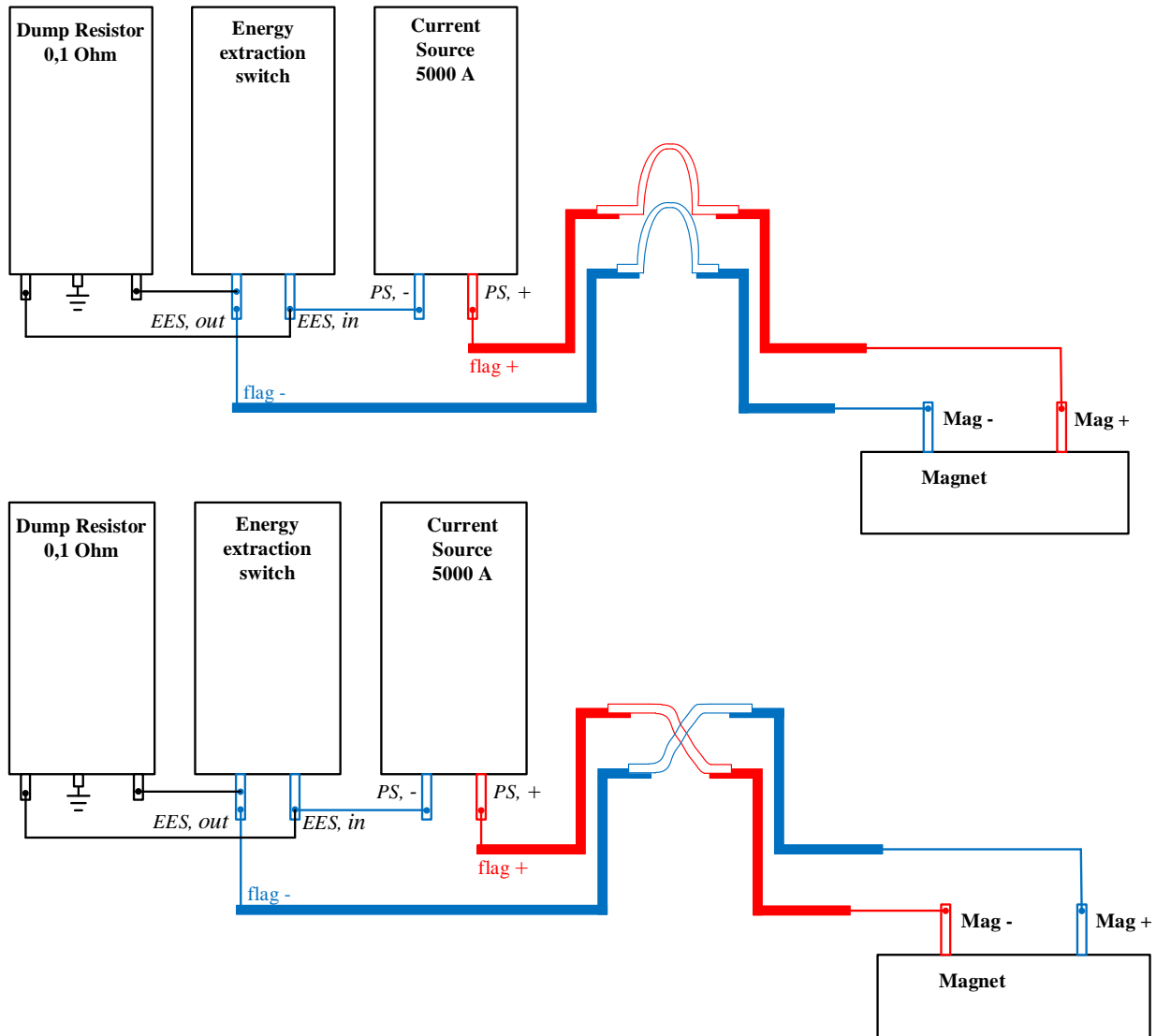
Power supplies' paralleling circuit



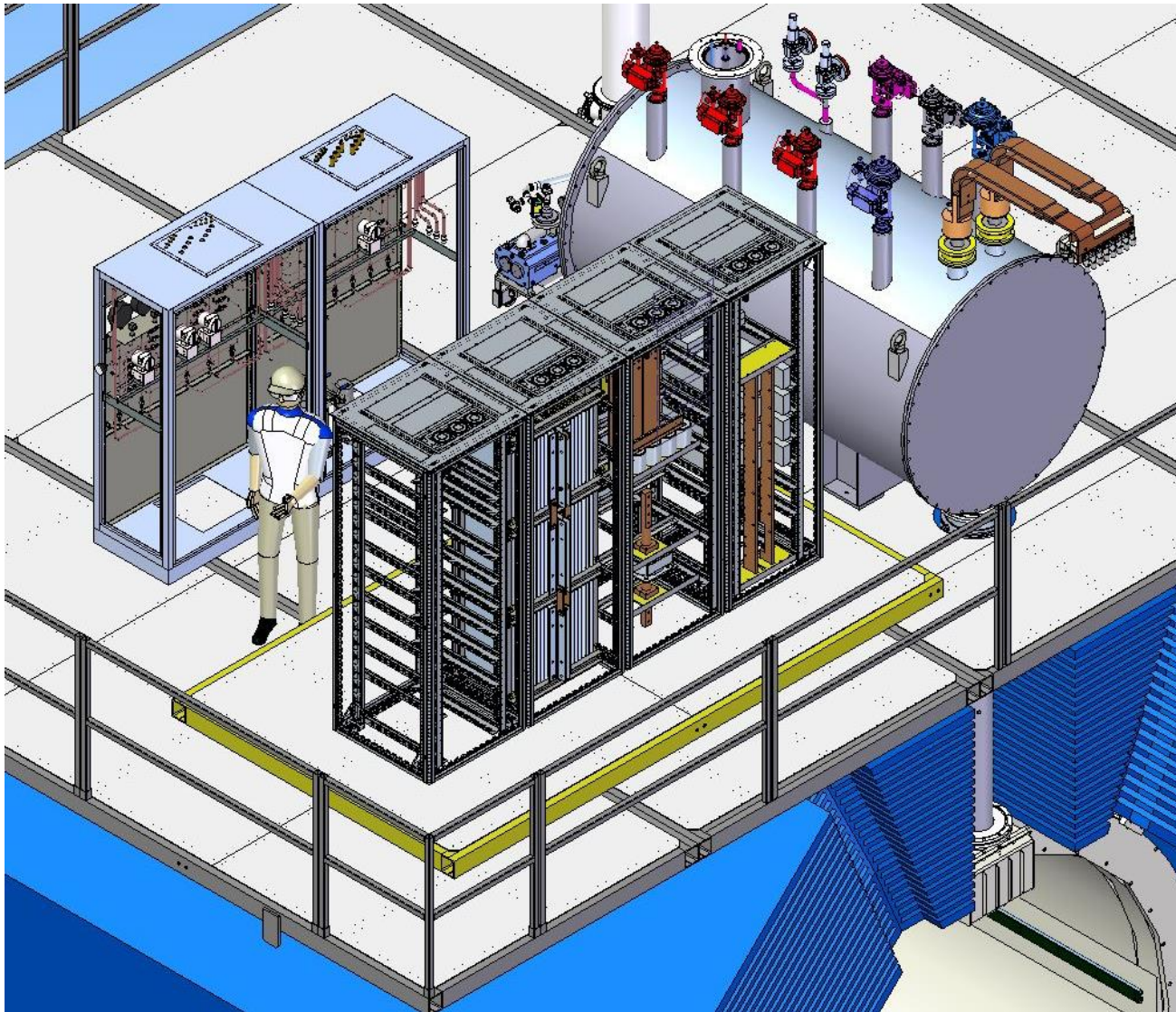
Racks & Cabling diagram



Коммутатор



Racks position



Thermal loses calculations

Mass of the stainless steel of the Dump Resistor									
Room temp, °C	dT, K	Cv, J/kg*K	W, MJ	T	m, kg	Number of racks	L, Hn	I, A	Stored Energy, MJ
25	60	500	20	85	667	1	1,50	5200	20
25	80	500	20	105	500	1			
25	100	500	20	125	400	1			
Cables resistanse and voltage drop									
ρ, Ohm * mm ² /m	crosssection, mm ²	Cable length, meters	R, mOhm	delta U, V	P, W	Current density, A/mm ²	Cooling type		Cables, total weight, kg*
0,018	3000	20	0,120	0,624	3244,8	1,73	air		536
0,018	3200	20	0,113	0,585	3042,0	1,63	air		572
0,018	1000	20	0,360	1,872	9734,4	5,20	water		179

Thermal loses calculations

Оценка тепловых потерь источника тока 5кА и системы вывода энергии

TDK-Lambda GSP15kW, 10V, 1500A			Air, W	Water, W	Water flow, l/min, 6 bars
U	10 V				
I	1500 A				
Efficiency	89%				
Unom	1,5 V	0,6 V cables + 0,8 V diode			
Inom	1000 A				
PS_loses, max	1100 W	1000 A * 10 V * 11%	1100	0	
PS_loses, nom	200 W	Не факт, что линейно	200	0	
5000 A Current Source					
			Air, W	Water, W	
U	10 V				
I	5000 A				
Efficiency	89%				
Unom	1,5 V	0,6 V cables + 0,8 V diode			
Inom	5000 A				
CS_loses, max	10500 W	PS (1100 + 0.8*1000 + 200)*5 Diodes Buses	$(1100 + 200) * 5$ 6500	$0.8*1000*5 + 1.7*5000*2$ 17000	40
CS_loses, nom	6000 W	$(200 + 0.8*1000 + 200)*5$	$(200 + 200) * 5$ 2000	$0.8*1000*5$ 4000	12

При работе источников потери в воду связаны с охлаждением последовательных диодов – 4кВт. При медленном выводе энергии источники отключены, в последовательных диодах потерь нет, но появляются потери в обратных диодах – 17кВт.

Потери на обратных диодах при медленном выводе энергии. Условно линейно с 5000 А до 0 за 2500 сек. 2 диода с падением напряжения 1,7 В при токе 5кА. $1,7 \text{ В} * 5000 \text{ А} * 2 = 17 \text{ кВт}$. Диоды (3600А, 12 класс): 2 последовательно, 2 параллельно = 4 радиатора.

Постоянные потери на последовательных диодах в цепи каждого источника. $0,8 \text{ В} * 1000 \text{ А} * 5 = 4 \text{ кВт}$. Для каждого источника 2-3 диода на 1000 А, 6+ класс, параллельно для минимизации тепловых потерь. $\Delta T = 10 \text{ К}$

Minutes of meeting

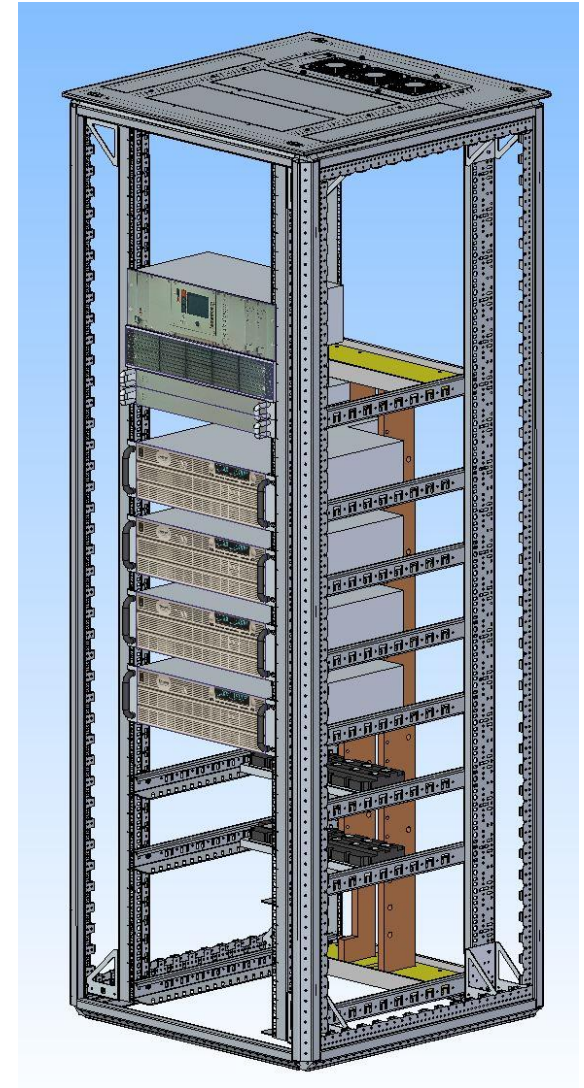
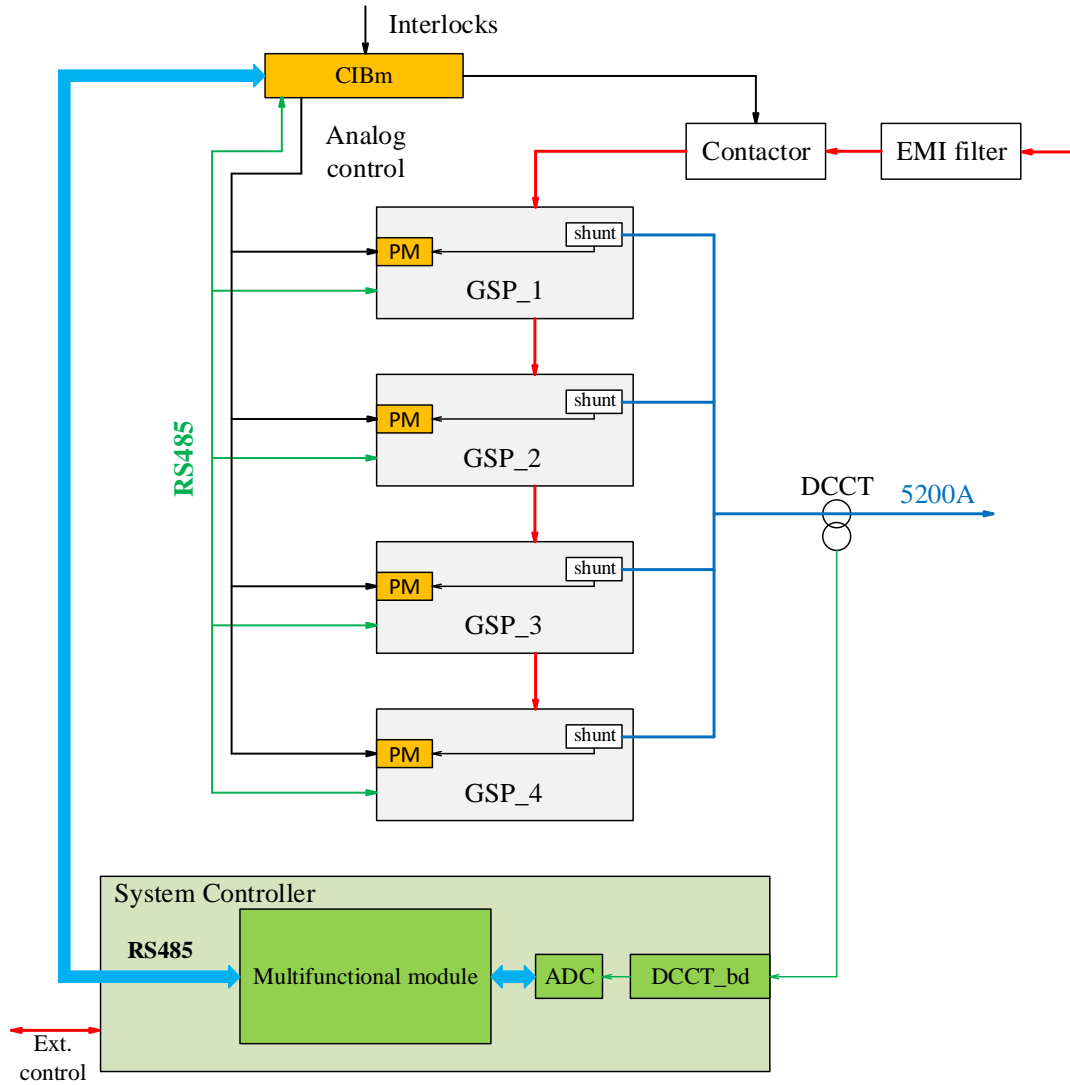
ОИЯИ, 23.10.2023

Д. Никифоров, М. Петров, А. Ерохин

1. Коммутатор. Коллеги с ОИЯИ – согласны с предложенной механической схемой коммутации.
2. Расположение стоек (90 градусов к «бочке») – ок. Фальшпол, подводы (кабели, вода) через фальшпол – ок.
3. Дмитрий и Михаил предложили в фальшполе поставить а-ля теплообменник (медная обрешётка), чтобы охлаждать входящий поток воздуха. Расход воды рассчитать с учетом теплообменника и потребности источника тока в режимах стационарно/вывод энергии.
4. Над стойками установить вытяжной короб.
5. Ерохин – предоставить примерные расчёты по тепловыделению «воздух/вода».
6. ИЯФ – расположение стоек и нагрузка на фальшпол.
7. Зоны ответственности. Все необходимые датчики (температуры, давление, уровни, выводы для квенч-детектора, квенч-детектор) – на стороне ИЯФ. Внешний контроллер и весь софт – ОИЯИ (outsourcing). От ИЯФ: согласование, технические консультации.

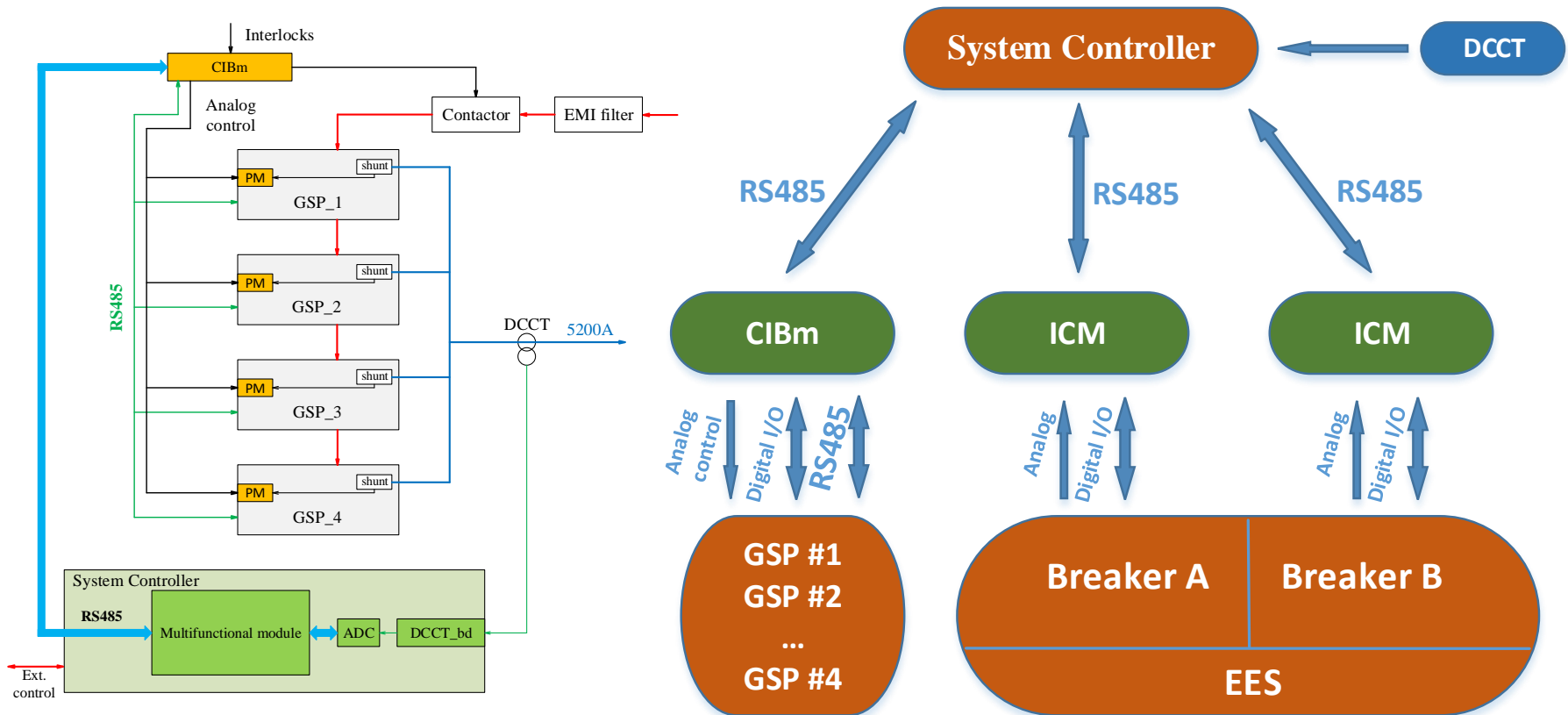
**Thanks for Your
Attention!**

General design of 5200 A Current Source

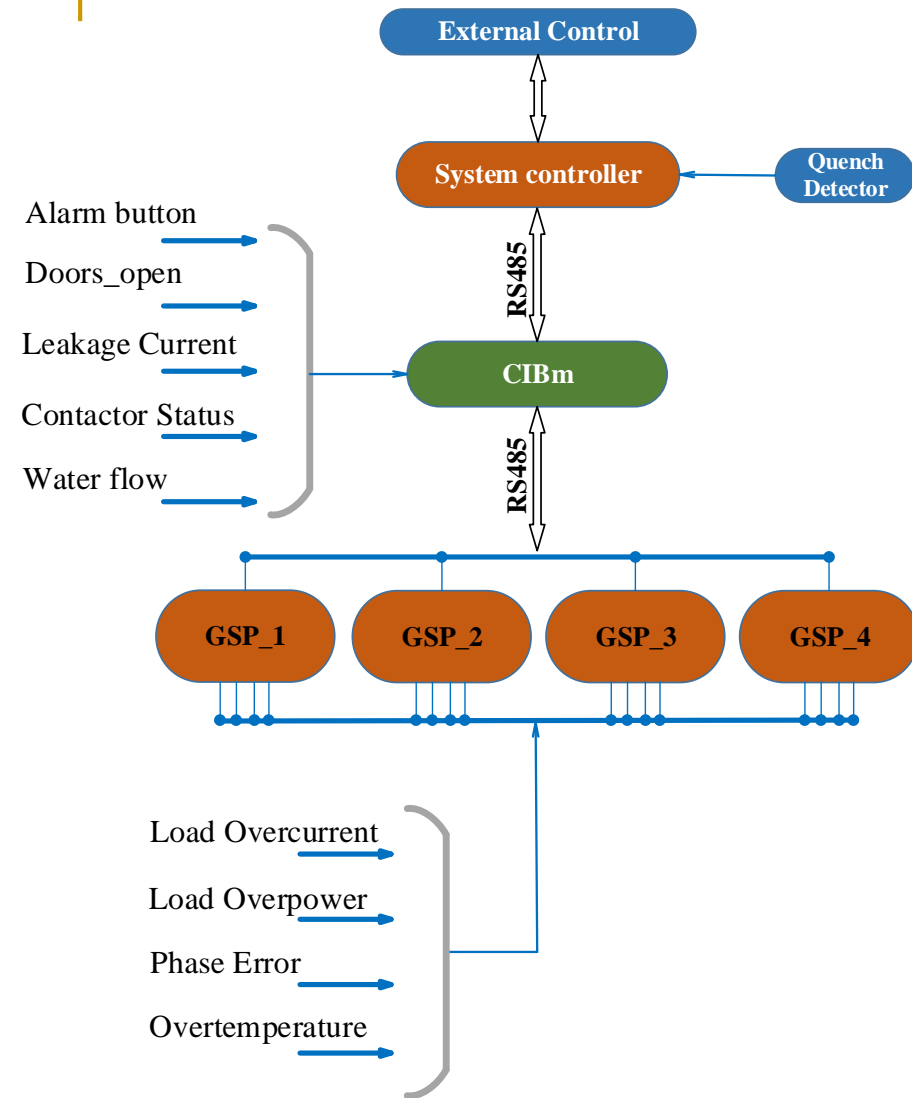


Control electronics, general view

General current control is looped through Multifunctional Module integrated to the System Controller. Two Interface Control Modules (ICM) for redundancy control two breakers of the energy extraction system independently. Current Source is controlled by Control and Interface Board master (CIBm)



PS Control electronics



The current source concept is based on the parallel connection of four commercially available power supplies covered by a common external feedback with an external current sensor. In this case, characteristics such as accuracy and long-term stability are determined not by the single power supply unit, but the feedback loop gain, the characteristics of the external current sensor, and the resolution of the ADC built into the unit. Each unit in this case is just an executive element. The external feedback system, as well as current source control, are based on the high level modular controller (System Controller). The System Controller also communicates with the external control electronics – transmits the interlocks and commands from the general control system of the accelerator complex. Multifunctional Module of the System Controller calculates the current error according to DCCT value and transmits the corrected signal (digital feedback) to CIBm module the digital interface. CIBm module forms analog control value to GSP. CIBm also collects data, interlocks and statuses from GSP by digital interface.

Current Source (power supply – TDK-Lambda, Genesys+, 10V, 1500A)

Main parameters of the TDK-Lambda Genesys+ 10V, 1500A power supply:

- Nominal output current 1500A;
- Nominal output voltage 10V;
- Load regulation in current mode $< 0.08\%$ from nominal;
- Output ripples in voltage:
- 5Hz-1MHz $< 8\text{mV rms}$,
- Current control resolution $< 0.002\%$ from nominal (20ppm)
- Control Interface – RS232/485, USB, LAN
- Input power line – 3 phases 380V with neutral.
- Cooling – forced air,
- Form factor – Euro Rack 19”, 3U



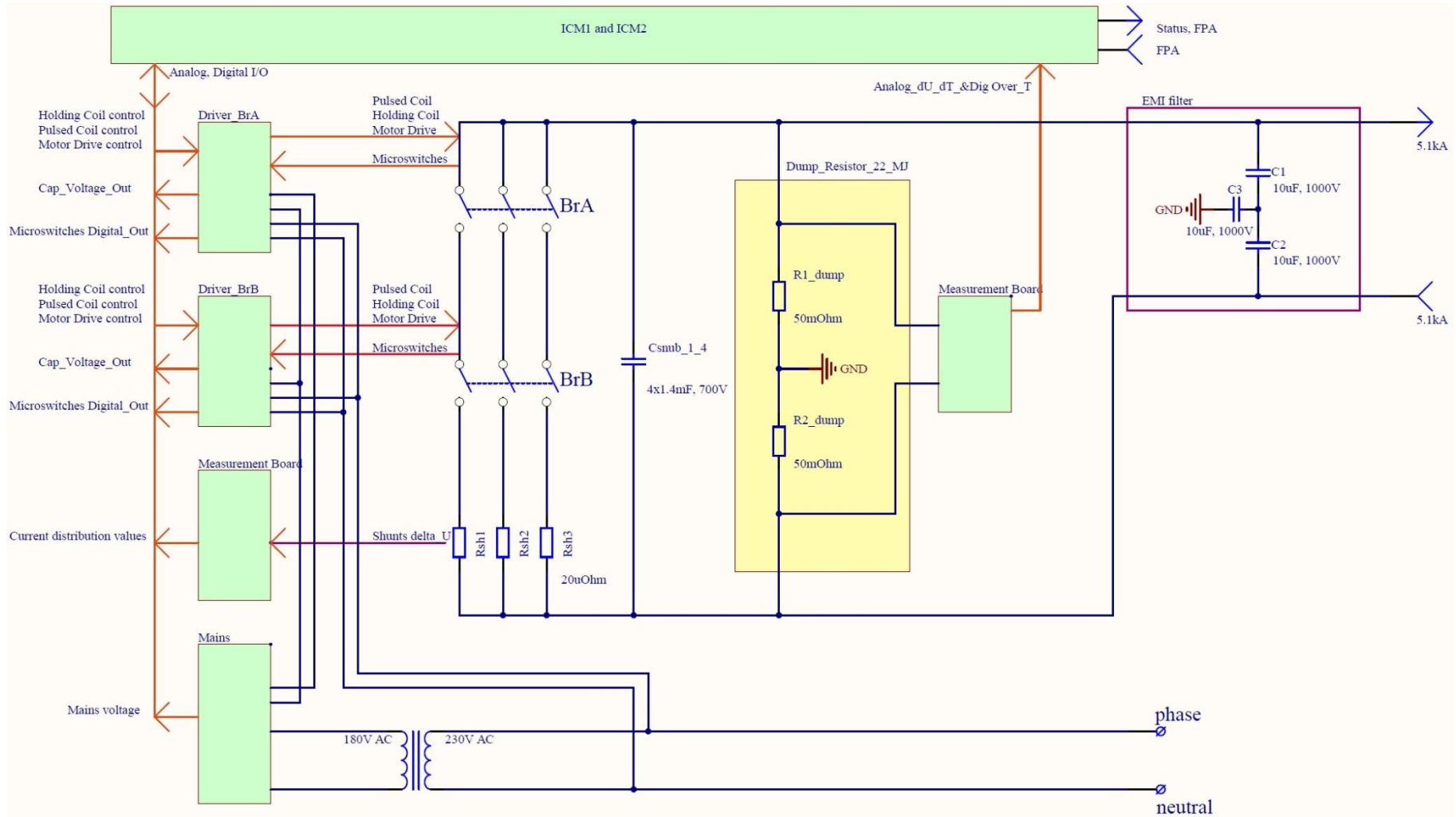
The current control resolution of 20ppm is provided by the internal ADC resolution, which for this family of sources is 16 bits. This means that with the sufficiently high external feedback loop gain, accuracy and stability of the external current sensor of at least 20ppm, it is possible to provide a long-term stability of the 5200A current source of 20ppm.

Current Source 5200A, parameters

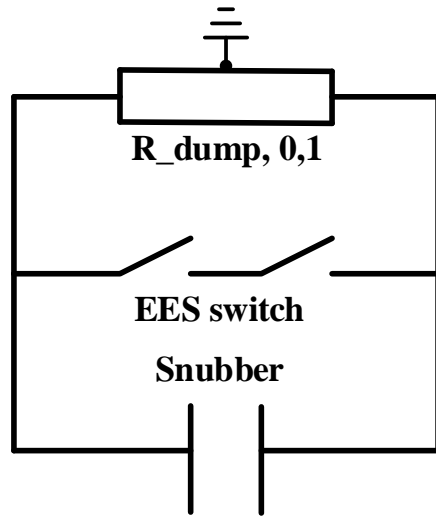
- Nominal output power 52kW;
 - Nominal output current 5200A;
 - Nominal output voltage 10V;
 - 8 hours run Stability - < 0.01% from nominal;
 - Output ripples in voltage:
 - 5Hz-1MHz - < 8mV rms,
 - 20MHz – < 75mV p-p;
 - Control Interface – RS485 (CAN)
 - Form factor Euro Rack 42” height
 - Input power line – 3 phases 380V with neutral.
 - Cooling – distilled water not warmer than 30°C;
 - Nominal input pressure 13 bars,
 - Water consumption 2 liters/min,
 - Water gradient with the maximal power < 10°C
 - Sizes 2200mm x 800mm x 800m, weight 300kg.
- Analog values:
 - Output_Current
 - Output_Voltage
 - Ireg_Error
 - Interlocks and Statuses:
 - Overcurrent ($I > "I_{max}"$);
 - Overpower ($P_{load} > "P_{max}"$);
 - Phase distortion for more than 20% ;
 - Over temperature of the power part;
 - Earth fault
 - Fast_Power_Abort
 - Emergency_stop
 - Doors_open
 - WaterFlow
 - Circuit_Breaker_On
 - Contactor_On
 - Current Sharing
 - EES_Closed
 - PS_Ready

Energy Extraction System

Energy Extraction System, general layout



Energy Extraction System, parameters

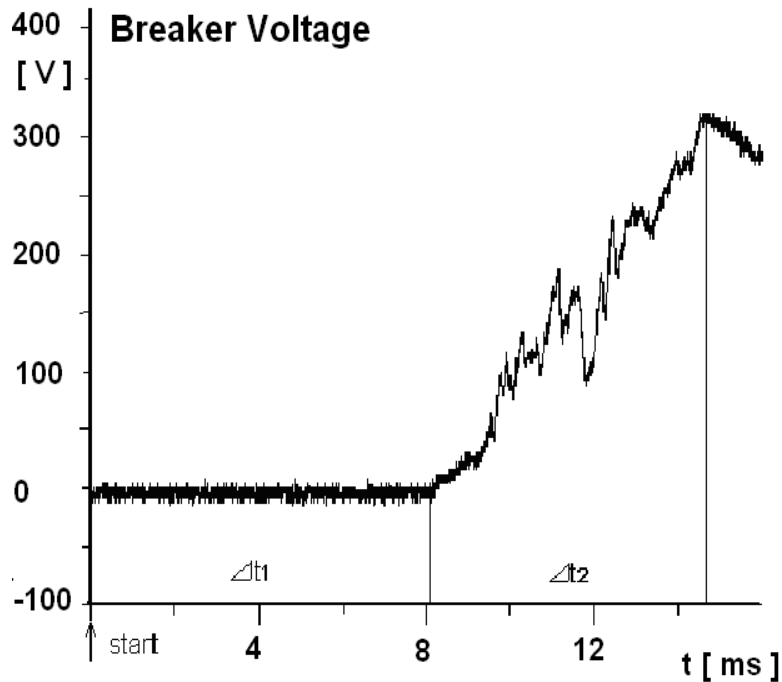


*Electromechanical
Breaker
as a main protection
element (Switch)*

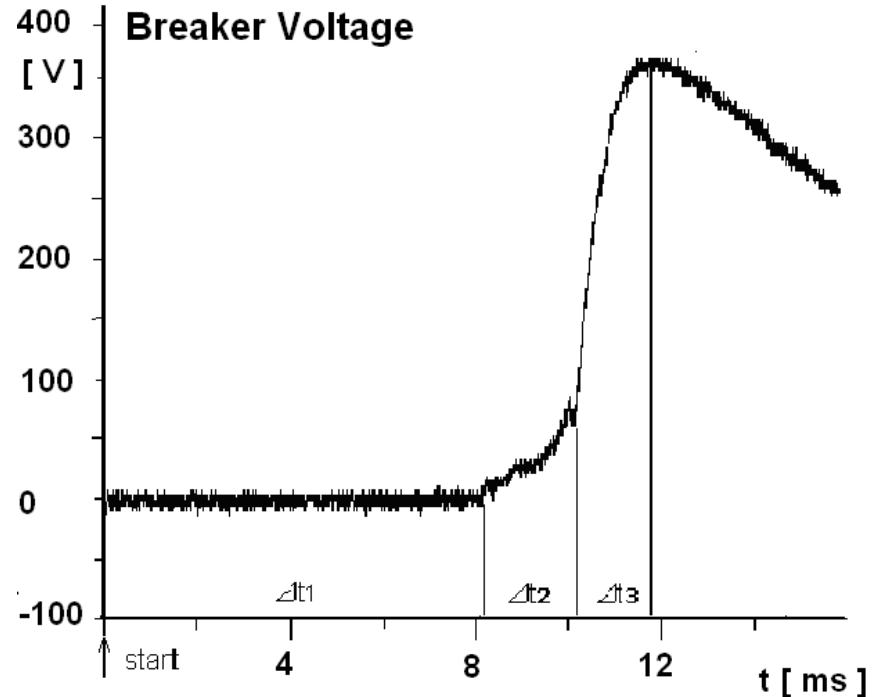
Parameter	Value	Unit
Nominal current	5200	A
Maximal extracted energy	20	MJ
Current polarity	Any	
Inductance in a circuit	1,5	H
Dump resistor value	$0,1 \pm 5\%$	Ohm
Maximal ΔT of the Dump Resistor	60	K
Time constant for the energy extraction	15	s

Energy Extraction System

Electromechanical Breaker and help of snubber against the arc - example

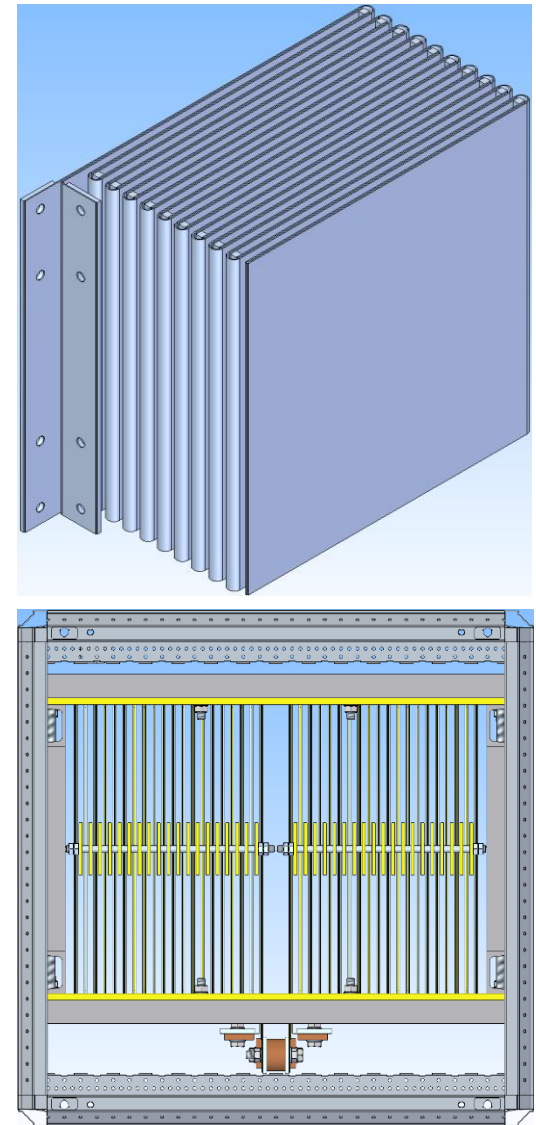
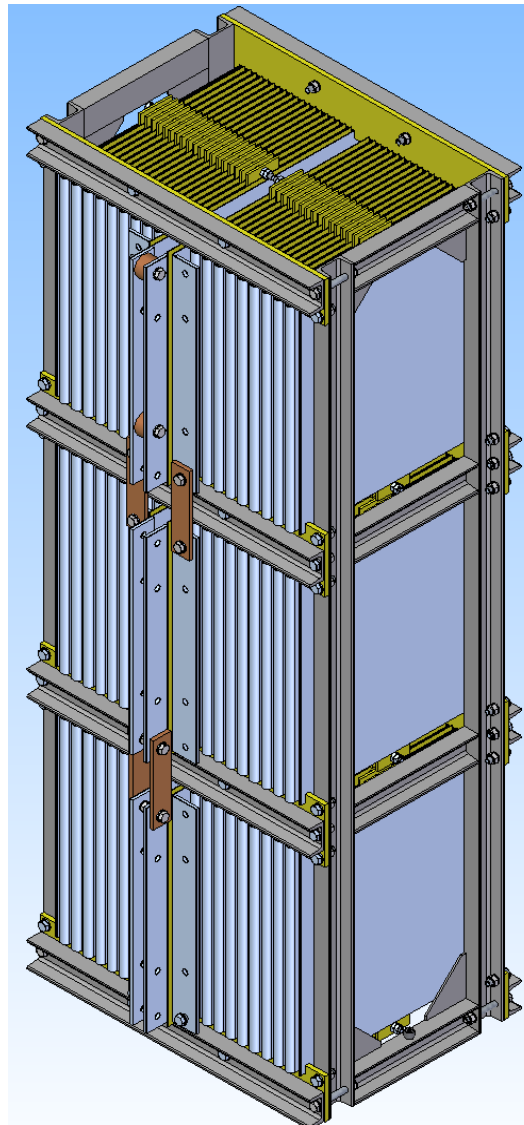
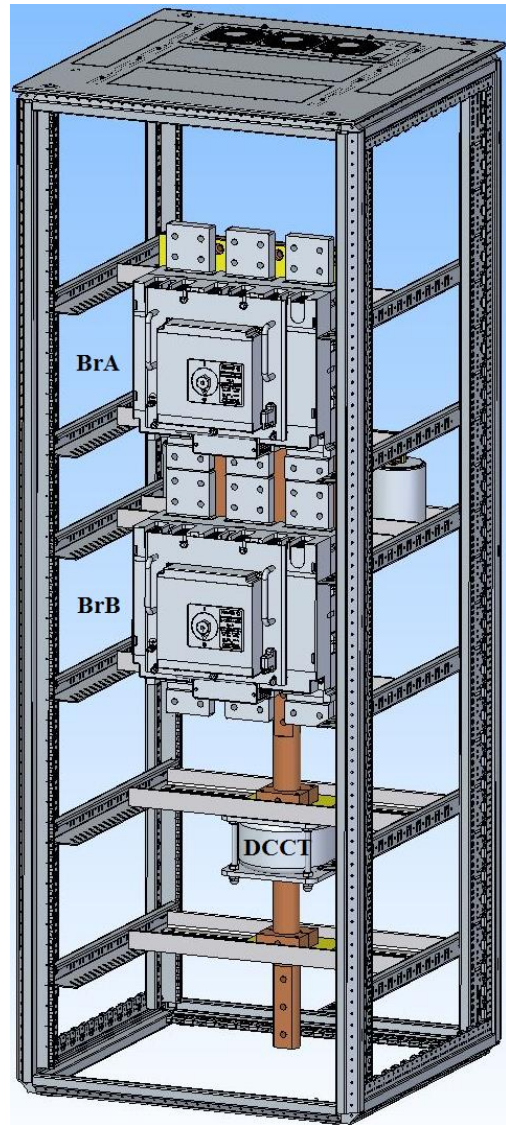


Voltage over the contacts while opening the circuit with $C_{snab} = 0$

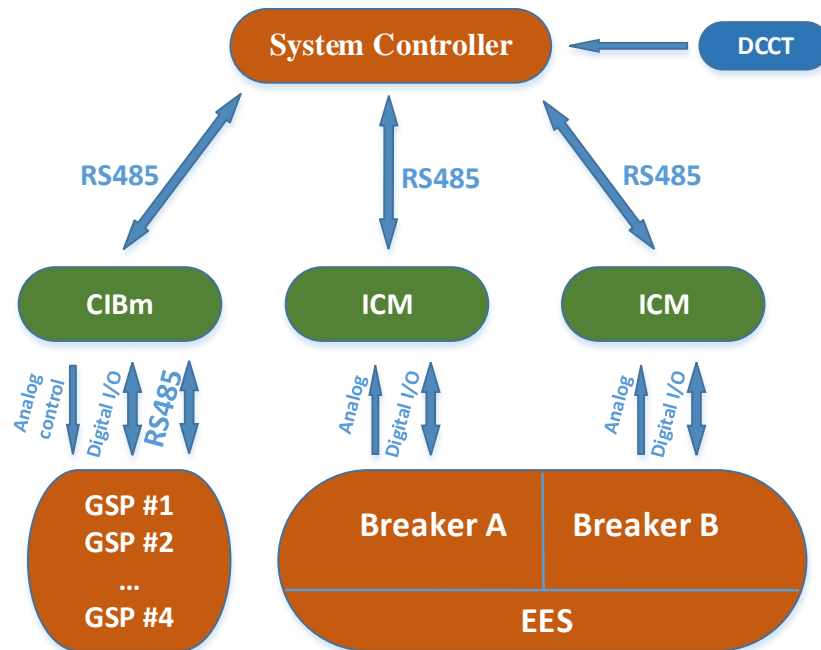


Voltage over the contacts while opening the circuit with $C_{snab} = 0.8 \text{ mF}$

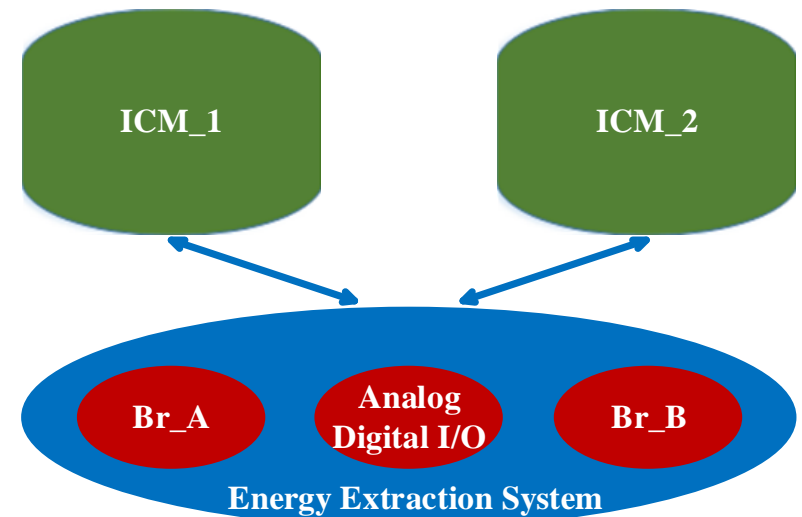
Energy Extraction System, 3D



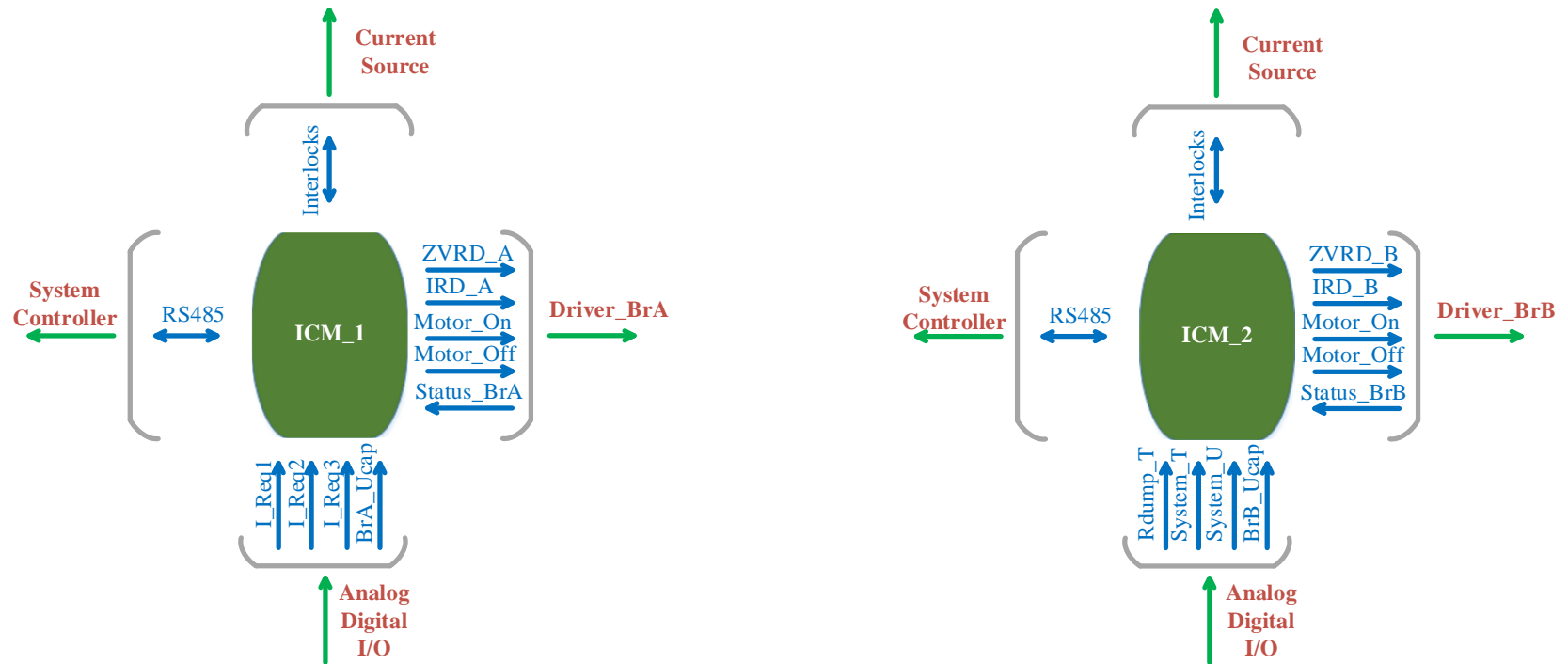
Energy extraction system control electronics



Energy extraction system for redundancy consists of two breakers, therefore, we need two undependable ICM modules to follow the redundancy principle of two breakers control. First ICM controls Breaker A, and second – Breaker B. Digitizing of analog signals is shared between to ICM modules.



Energy extraction system control electronics

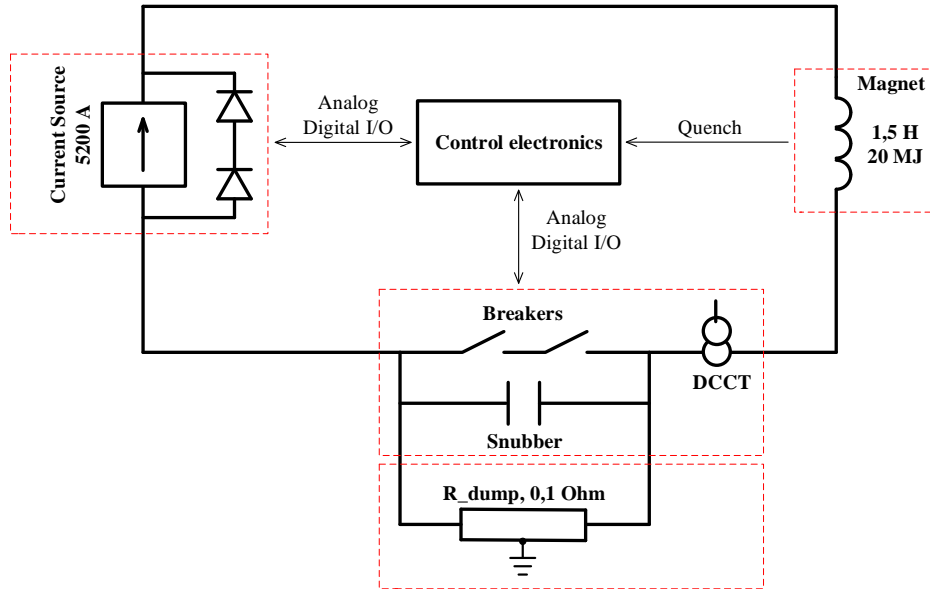


ICM#1 controls Breaker A by four digital signals: ZVRD_A (zero voltage release device, BrA), IRD_A (independent release device, BrA), Motor_ON_A, Motor_OFF_A (motor drives). Furthermore, ICM#1 receives statuses of Breaker A, digitizes current sharing analog signals and monitors the voltage of the buffer capacitor on the Breaker A driver board - U_cap_A.

ICM#2 controls Breaker B similar to ICM#1, but digitizes other analog signals: temperature of the dump resistor, energy extraction system voltage drop, temperature in the rack and monitors the voltage of the buffer capacitor on the Breaker B driver board.

Communication between ICM#1, ICM#2 and System Controller is provided by RS485 interface. It is important to mention that ICM transmits status of Breaker to CIBm board and receives Fast Power Abort signal.

Quench protection



The quench protection system (QPS) is designed to limit the peak temperature on the coil windings to 80 K and the peak voltage to ground to 500 V during any normally protected quench. The system relies on the monitoring of the resistive voltages associated to the normal zone spread and quench development via voltage taps installed on the coil modules as well as on the joints and bus bars.

To assess the quench performance of the SPD solenoid, quenches have been initiated at different locations in each of the three sub-coils (i.e. across the two layers as well as at the edges and center of the winding packs). The quench is initiated by rising the temperature of the selected turn above the critical value.

During a fast dump, independently from the location of origin of the quench, the current in the coils decays with a time constant of 17 s. The maximum voltage to ground is 260 V, well below the maximum design limit of 500 V. The hot spot temperature is limited to a very safe value of 80K.

Magnet protection

Пример - Контроллер сверхпроводящего вигглера (SCWC)

Данный контроллер предназначен для сбора сигналов от измерительных датчиков и вакуумметра и блокировки источников питания в случае необходимости. Состоит из:

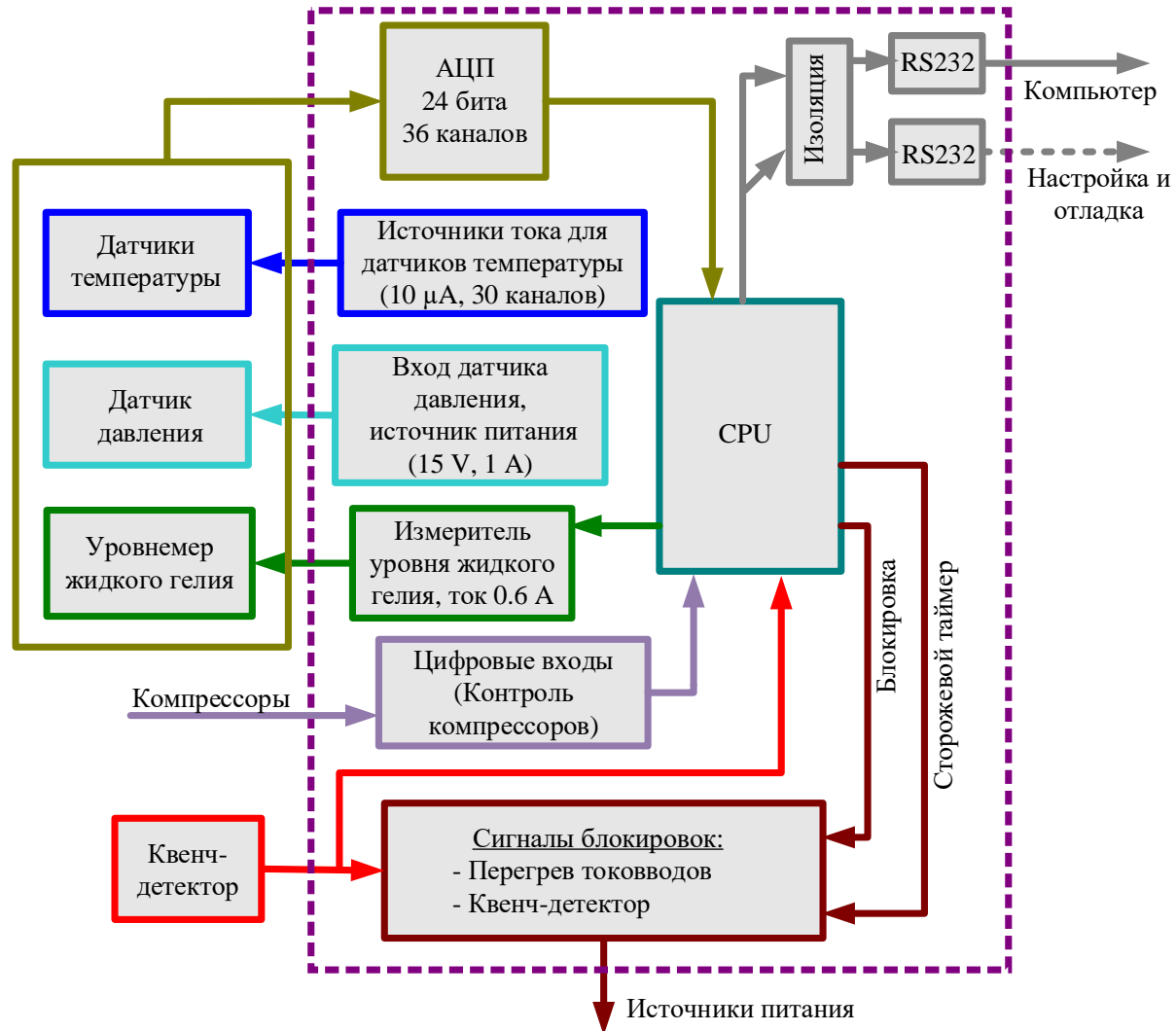
- АЦП (24 бит, 36 каналов);
- генераторы тока (10 мкА) для датчиков температуры;
- измеритель уровня жидкого гелия с генератором тока на 0.3А-0.6А;
- измеритель давления с блоком питания 15В;
- цифровые входы для контроля компрессоров и выходы для их дистанционного отключения;
- логика блокировки источников питания;
- разъемы для подключения всех необходимых датчиков и квенч-детектора;
- выход для блокировки источников питания;
- 2 RS-232 интерфейса для связи с управляющим компьютером и настройки.

Для безопасной и надежной работы сверхпроводящего вигглера обеспечивается мониторинг его основных параметров, а именно:

- Температура в критических местах;
- Давление и уровень жидкого гелия в резервуаре;
- Изоляционный вакуум;

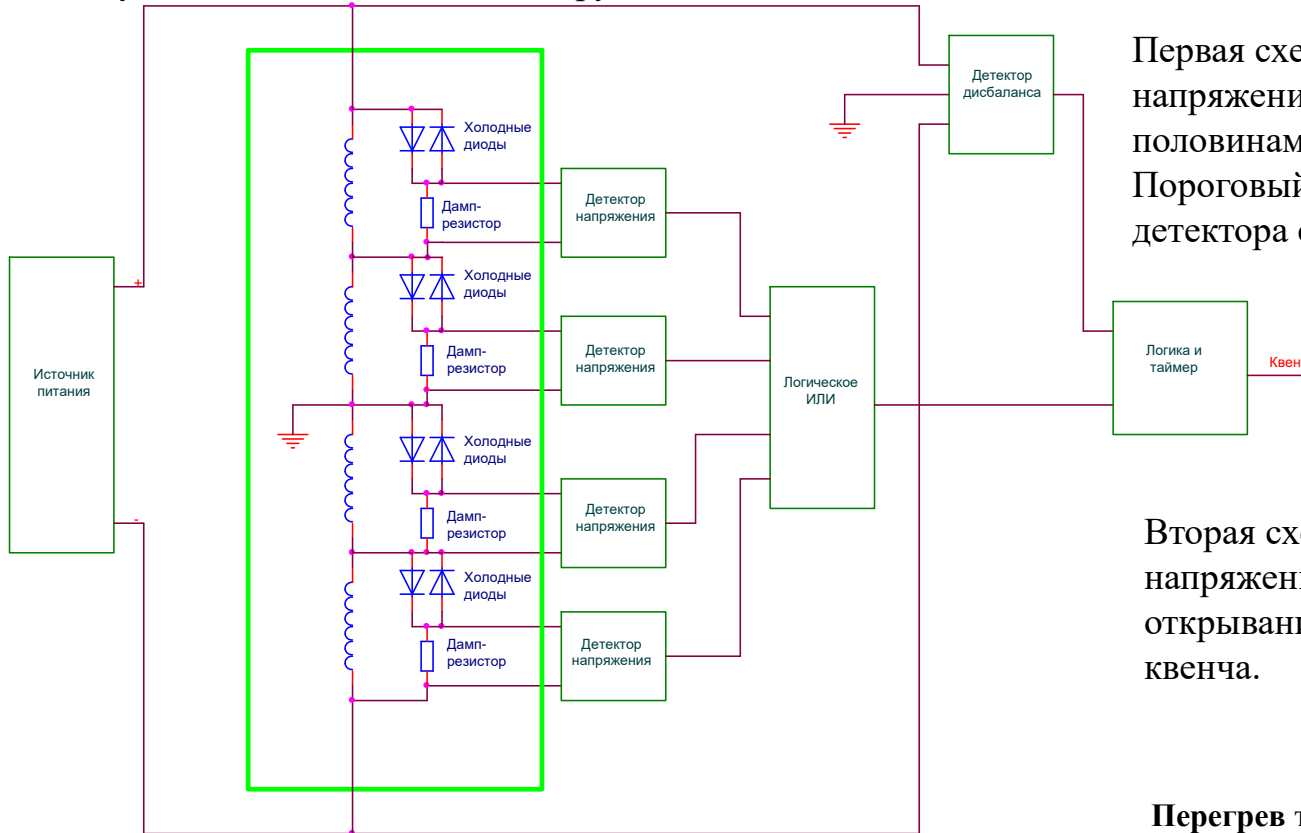
Все блокировки объединяются и имеют выход в виде 4 сухих контактов для блокировки источников питания. Также статус блокировок доступен для чтения программно через СОМ-порт.

Контроллер сверхпроводящего вигглера (SCWC), блок схема



Квенч-детектор

Квенч-детектор выполнен в виде отдельного блока и размещается на корпусе криостата. Он состоит из двух независимых блоков обнаружения.



Первая схема обнаруживает дисбаланс напряжений между верхней и нижней половинами вигглера в случае срыва. Пороговый дисбаланс для срабатывания детектора составляет около 5В.

Вторая схема обнаруживает появление напряжения на дам-резисторах при открывании холодных диодов в случае квенча.

Перегрев токовводов

Для предотвращения срыва сверхпроводимости в токовводах, выполненных из высокотемпературного сверхпроводника, который может привести к их неисправности, предусмотрена блокировка источников питания при их перегреве. SCWC производит аппаратную блокировку при температуре теплой стороны токовводов выше 70К или холодной стороны выше 6К.

SCWC



На передней панели SCWC:

- Зеленый светодиод “**Work**”. Индицирует работоспособность контроллера миранием. В состоянии блокировки это короткие вспышки, в рабочем состоянии – кратковременные затемнения.
- Кнопка “**Reset**”. Нажатие этой кнопки сбрасывает все ранее зафиксированные блокировки и разблокирует источники питания, если актуальные блокировки отсутствуют. Длительное нажатие этой кнопки в течение более 15 секунд в рабочем режиме вызывает эмуляцию детектирования квенча (для тестирования).
- Красный светодиод “**Quench**”. Непрерывное горение этого светодиода индицирует, что произошел квенч (сработал квенч-детектор). Мигание этого светодиода свидетельствует о том, что квенч-детектор не подключен, неисправен или условия, приведшие к срабатыванию детектора, сохраняются. В этом случае сброс невозможен.
- Красный светодиод “**Interlocks**”. Индицирует блокировку по температуре.
- Кнопка “**Li He meter**”. Короткое нажатие этой кнопки инициирует немедленное однократное измерение уровня жидкого гелия. Удержание этой кнопки нажатой более 3 секунд принудительно включает запрограммированный режим измерения (подробности см. в приложении А).
- Синий светодиод “**Li He meter**”. Мигание этого индикатора индицирует измерение уровня гелия. Короткие вспышки этого индикатора означают, что задано измерение уровня гелия раз в 5 минут или чаще.
- Утопленная кнопка “**Reboot**”. Служит для принудительной перезагрузки контроллера.
- Разъем “**COM2**”. Этот разъем RS-232 дублирует аналогичный, расположенный на задней панели контроллера.

SCWC



На задней панели:

Разъем сетевого питания с предохранителем (1А). Входное напряжение 100-240В, частота 50/60Гц. “COM1” и “COM2” порты RS-232.

Блок из 32 разъемов RJ-45. В том числе:

“PS1” и “PS2” выходы блокировок источников питания;

“Cmpr1”..“Cmpr4” для мониторинга компрессоров;

“QD” для подключения квенч-детектора;

“He” для подключения уровнемера жидкого гелия;

Нумерованные каналы АЦП для подключения датчиков, в том числе:

каналы 0..4 для измерения напряжений – используются для датчиков давления и вакуумметра

каналы 6..35 с источниками тока 10мкА для датчиков температуры.

Квенч-детектор

Квенч-детектор выполнен в виде отдельного блока и размещен непосредственно на корпусе вигглера. Принцип его работы описан в разделе, посвященном блокировкам.

Мониторинг криостата

Для обеспечения безопасной и надежной работы производится мониторинг основных параметров криостата, а именно:

Температуры в критических точках;

Уровень жидкого гелия в гелиевом баке;

Давление гелия в гелиевом баке;

Изоляционный вакуум.