



СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
RUSSIAN POWER SYSTEM OPERATOR

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКИХ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СТУПЕНЧАТЫХ ЗАЩИТ

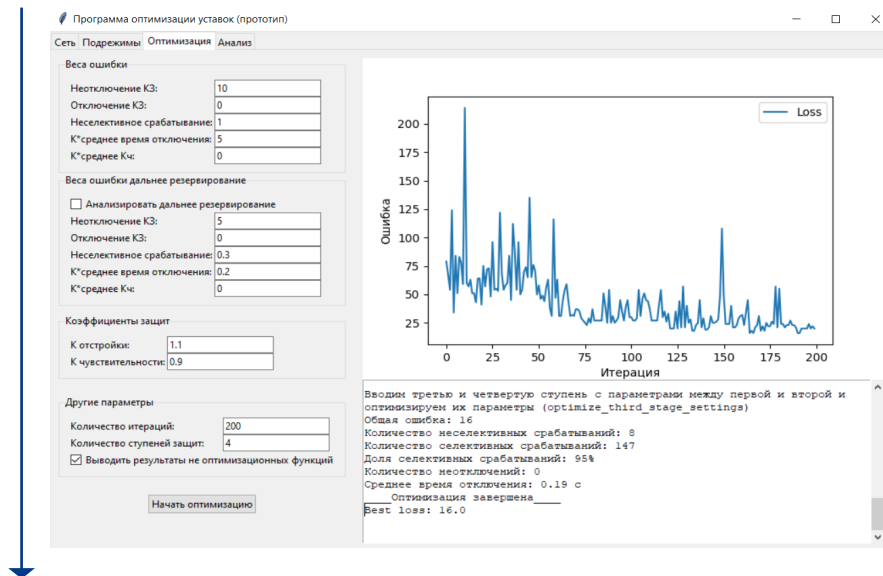
Клемент Артур Робертович
Ведущий специалист ОРПНУРЗА
Филиал АО «СО ЕЭС» Приморское РДУ
Россия



Цель: Протестировать эффективность алгоритмов оптимизации и разработать программу подбора уставок защит с относительной селективностью

ЗАДАЧИ ИССЛЕДУЕМОЙ РАБОТЫ

- Проанализировать инструменты машинного обучения, подходящих для подбора параметров РЗ
- Разработать программу для анализа и оценки срабатывания защит в множестве режимов сети
- Протестировать выбранные алгоритмы оптимизации на эффективность с помощью разработанной программы оценки
- Разработать оболочку программы для пользователей и дальнейшее усовершенствование алгоритма оптимизации





ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

- Попытки автоматизировать расчет ступенчатых защит через алгоритмическую реализацию МУ и другой нормативной документации не приводят к полной автоматизации
- Существует более одного набора уставок удовлетворяющего требованиям
- Нормативная документация не всегда полностью описывает все спорные ситуации
- В итоге методы автоматизации нацелены на ускорение рутины и увеличение продуктивности расчетчика, под руководством его экспертизы

ПС 500 кВ № / 92 (500)		ВЛ 500 кВ / 92-974		ТЗНП [521]	ТЗНП	Кол. ступеней: 4	
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ				Ступень 1	1683.41 ≤ 3300.00 ≤ -		
Таблица диапазонов				Ступень 2	1436.40 ≤ 1500.00 ≤ 3022.79		
				Ступень 3	? ≤ 560.00 ≤ 231.72		
				Ступень 4	? ≤ 160.00 ≤ 231.72		
▼ Отстройка							
От К1, К1.1 на шинах ПС, примаыкающей к противоположному концу ЛЭП				<input checked="" type="checkbox"/>	Обяз	1.3	547.68 -
От К1, К1.1 на шинах ПС в месте установки РЗ				<input checked="" type="checkbox"/>	Обяз	1.3	1447.95 -
От К1, К1.1 на линиях, связанных взаимоиндукцией с защищаемой и не имеюц.				<input checked="" type="checkbox"/>	Обяз	1.3	1683.41 -
От К1, К1 в неполнофазном режиме при одновременности замыкания фаз в				<input type="checkbox"/>	Обяз	1.3	- -
От К1, К1 в неполнофазном режиме при одновременности замыкания фаз в				<input type="checkbox"/>	Обяз	1.3	- -
▼ Ступень 2 Ⓞ							1500.00
▼ Отстройка							
① От К1, К1.1 на шине смежного напряжения предыдущего автотрансформаторо				<input checked="" type="checkbox"/>	Обяз	1.3	1436.40 3.16
> Согласование							
▼ Обеспечение чувствительности							
② РТ при К1, К1.1 в каскаде в конце защищаемой ЛЭП				<input checked="" type="checkbox"/>	Обяз	1.5	3022.79 -
При К1, К1.1 на шинах противоположной ПС				<input type="checkbox"/>	Обяз	1.5	231.72 -
▼ Ступень 3 ⚠							560.00
▼ Согласование							
Со 2 ступенью защиты предыдущей ЛЭП				<input type="checkbox"/>	Обяз	1.1	- -
С 1 ступенью защиты предыдущего АТ				<input type="checkbox"/>	Обяз	1.1	- -
Со 2 ступенью защиты предыдущего АТ				<input type="checkbox"/>	Альт	1.1	- -
▼ Обеспечение чувствительности							
При К1, К1.1 на шинах противоположной ПС				<input checked="" type="checkbox"/>	Обяз	1.5	231.72 -
РТ при К1, К1.1 в каскаде в конце защищаемой ЛЭП				<input checked="" type="checkbox"/>	Обяз	1.5	3022.79 -



ИДЕЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОДБОРА УСТАВОК

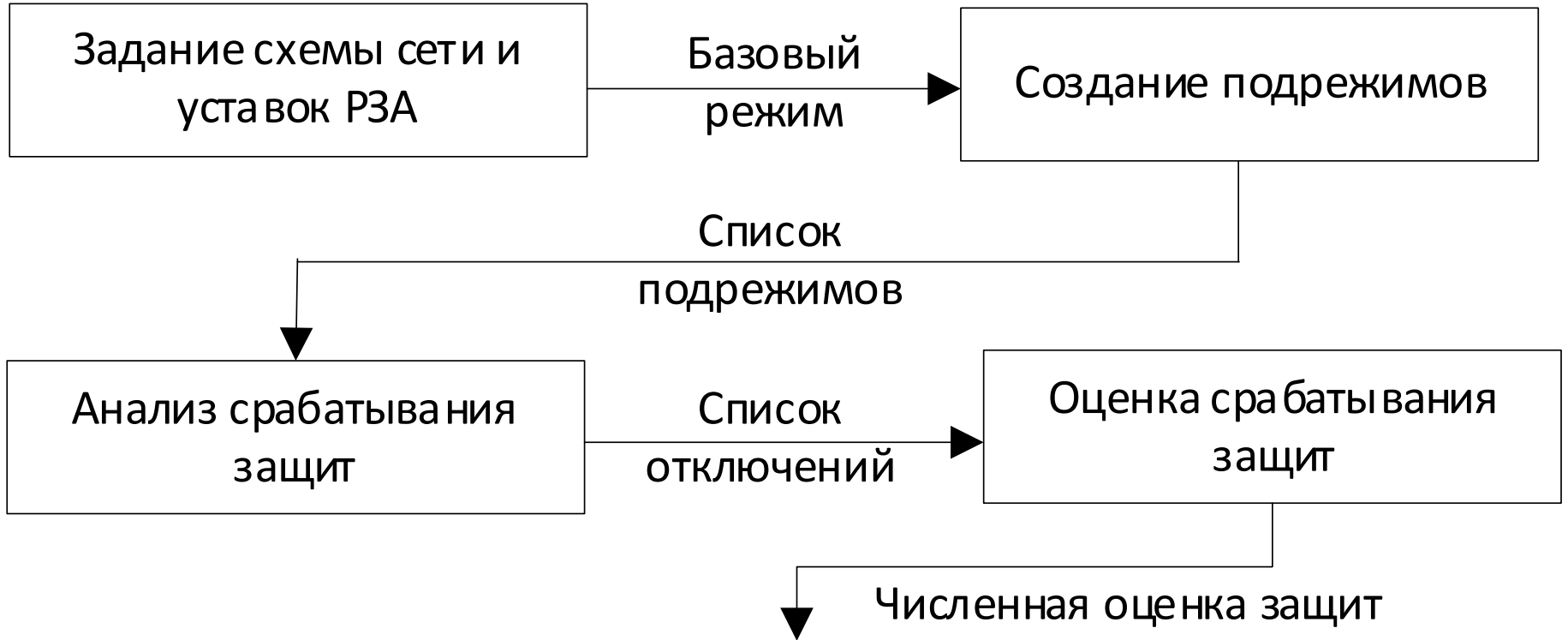
**На основании опыта предыдущих разработчиков:
Автоматизировать аналитически расчет уставок
ступенчатых защит – чрезвычайно сложно**



**Оценка качества уже заданных уставок – задача проще в
реализации и поддается анализу**



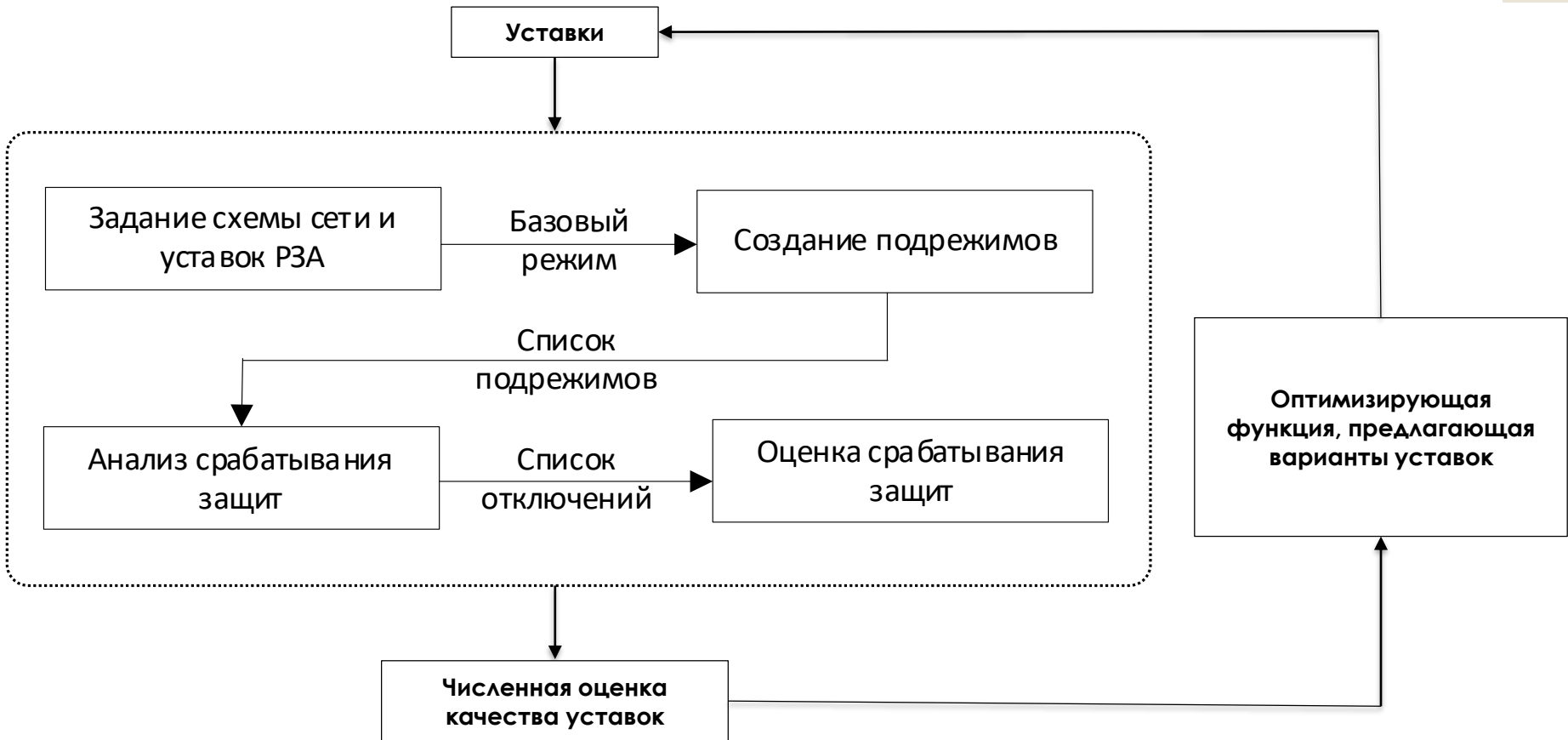
**Методы анализа качества заданных уставок дает
возможность использовать инструментарий машинного
обучения для подбора уставок с лучшей оценкой**





ПРОГРАММА ОПТИМИЗАЦИИ УСТАВОК

ОБЩАЯ СХЕМА

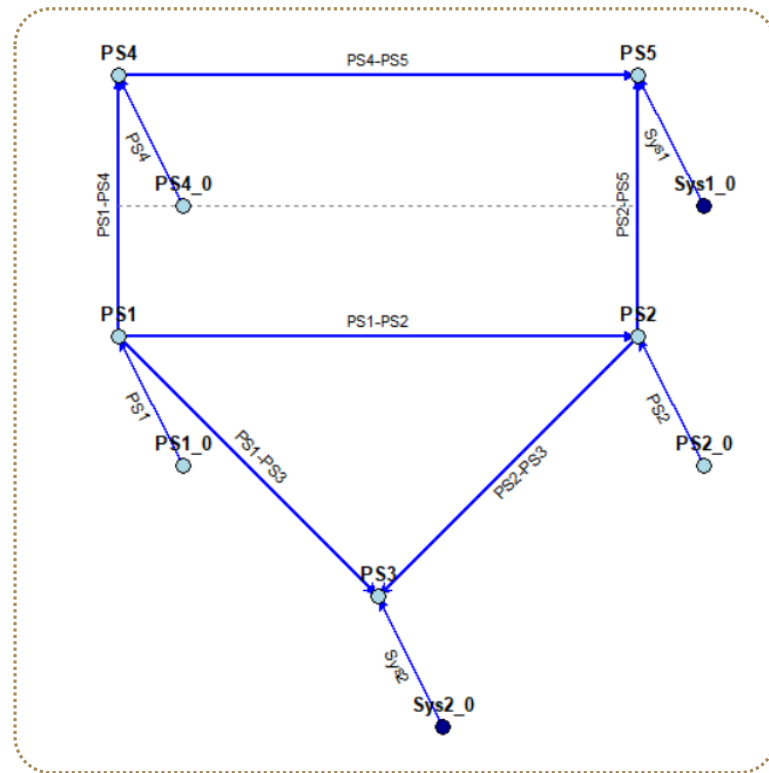




Задание схемы сети и уставок РЗА

- Введение сети
- Редактирование сети
- Визуализация сети
- Расчет токов КЗ для данной сети

↓
Базовый режим





ПРОГРАММА ОЦЕНКИ ЗАЩИТ СОЗДАНИЕ ПОДРЕЖИМОВ

Базовый режим

Создание подрежимов

Перебор:

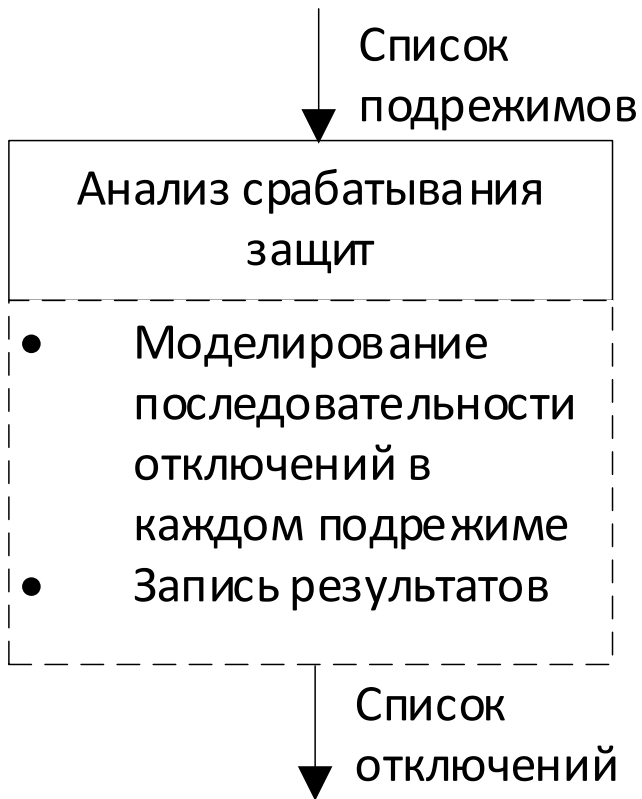
- Линий КЗ
- Отключений
- Мест КЗ на линии
- Типов КЗ

Список
подрежимов

	id	line_kz	kz_type	percent	p_off
100	100	PS1-PS2	A0	0.8	(PS1-PS3,)
101	101	PS1-PS2	A0	0.0	(PS1,)
102	102	PS1-PS2	A0	0.2	(PS1,)
103	103	PS1-PS2	A0	0.4	(PS1,)
104	104	PS1-PS2	A0	0.6	(PS1,)
...
196	196	PS2-PS3	A0	0.0	(Sys2,)
197	197	PS2-PS3	A0	0.2	(Sys2,)
198	198	PS2-PS3	A0	0.4	(Sys2,)
199	199	PS2-PS3	A0	0.6	(Sys2,)
200	200	PS2-PS3	A0	0.8	(Sys2,)



ПРОГРАММА ОЦЕНКИ ЗАЩИТ АНАЛИЗ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТ

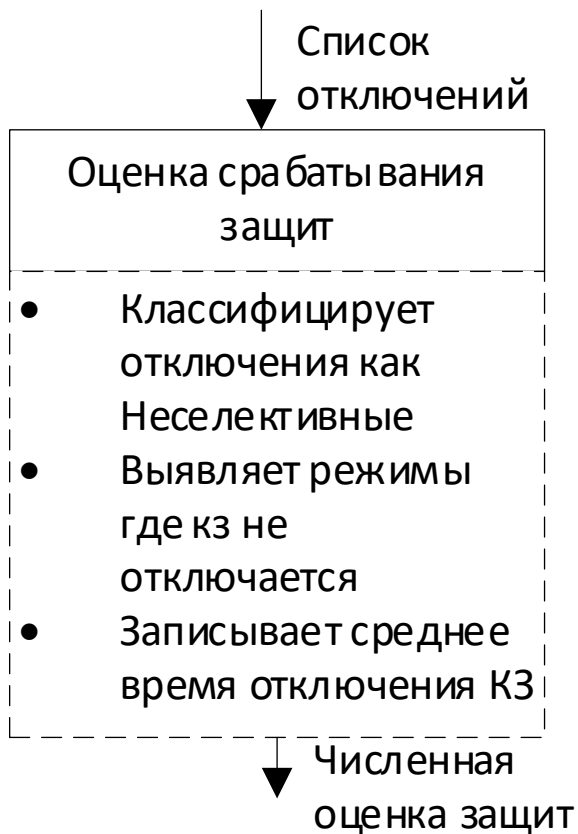


id	t	submdl_id	p_off	k_ch	line_kz	line	I0_line	
30	12	0.2	13	(q1-kz.)	134956.3679	PS1-PS2	kz-q2	[740.9802186901081, 88.59682459691159]
31	-7	0.2	13	(q1-kz, kz-q2)	0	PS1-PS2	0	0
32	10	0	14	()	53868.341747	PS1-PS2	kz-q2	[1856.3778976228568, 88.78288370609701]
33	9	0	14	(kz-q2.)	0.994176	PS1-PS2	q1-kz	[854.4592443978532, -91.33708045567442]
34	-7	0	14	(kz-q2, q1-kz)	0	PS1-PS2	0	0
35	9	0	15	()	0.57826	PS1-PS2	q1-kz	[1469.034220602025, -91.68911300015327]
36	10	0	15	(q1-kz.)	110869.356	PS1-PS2	kz-q2	[901.9624773507344, 89.14447243580382]



ПРОГРАММА ОЦЕНКИ ЗАЩИТ

ОЦЕНКА СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТ



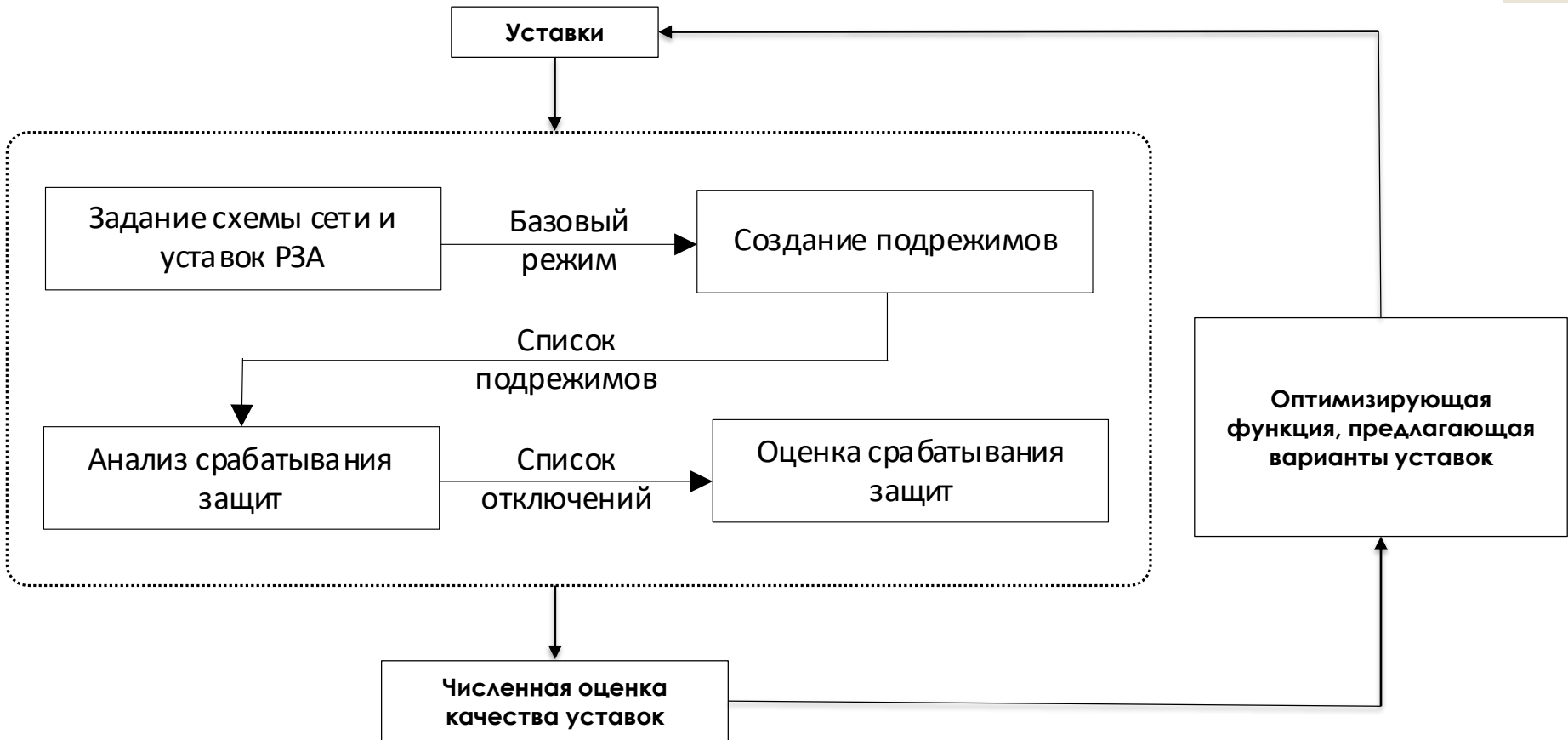
```
extended_def_score(submdl,prot_work)
```

```
Неселективное отключение 3 | Sys1 PS2-PS5  
{'id': 47, 't': 0.0, 'submdl_id': 3, 'p_off':  
2525580999969}}  
Неселективное отключение 4 | Sys1 PS2-PS5  
{'id': 47, 't': 0.0, 'submdl_id': 4, 'p_off':  
0755376005966}}  
Неселективное отключение 61 | PS4-PS5 PS1-PS4  
{'id': 37, 't': 0.0, 'submdl_id': 61, 'p_off':  
90.52255403981167}}  
Неселективное отключение 64 | PS4-PS5 PS2-PS5  
{'id': 47, 't': 0.0, 'submdl_id': 64, 'p_off':  
92.3226908448138}}  
Неселективное отключение 67 | PS4-PS5 PS1-PS4  
{'id': 37, 't': 0.0, 'submdl_id': 67, 'p_off':  
91.15610943894237}}  
Неселективное отключение 84 | PS4 PS1-PS4  
{'id': 37, 't': 0.0, 'submdl_id': 84, 'p_off':  
0872706341771}}  
Общая ошибка: -72  
Количество неселективных срабатываний: 6  
Количество селективных срабатываний: 141  
Количество неотключений: 0  
Среднее время отключения: 0.2666666666666666
```



ПРОГРАММА ОПТИМИЗАЦИИ УСТАВОК

ОБЩАЯ СХЕМА





Эвристические методы оптимизации

Обучение с подкреплением

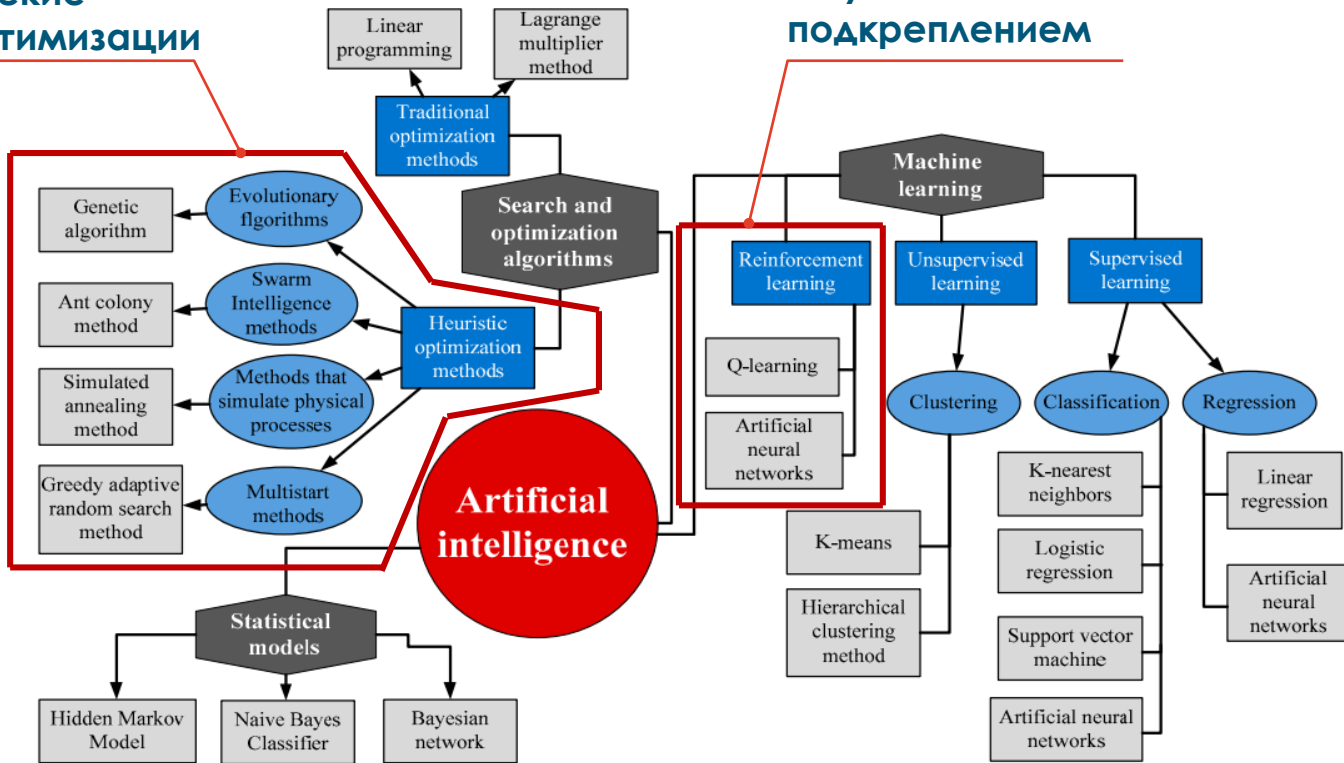
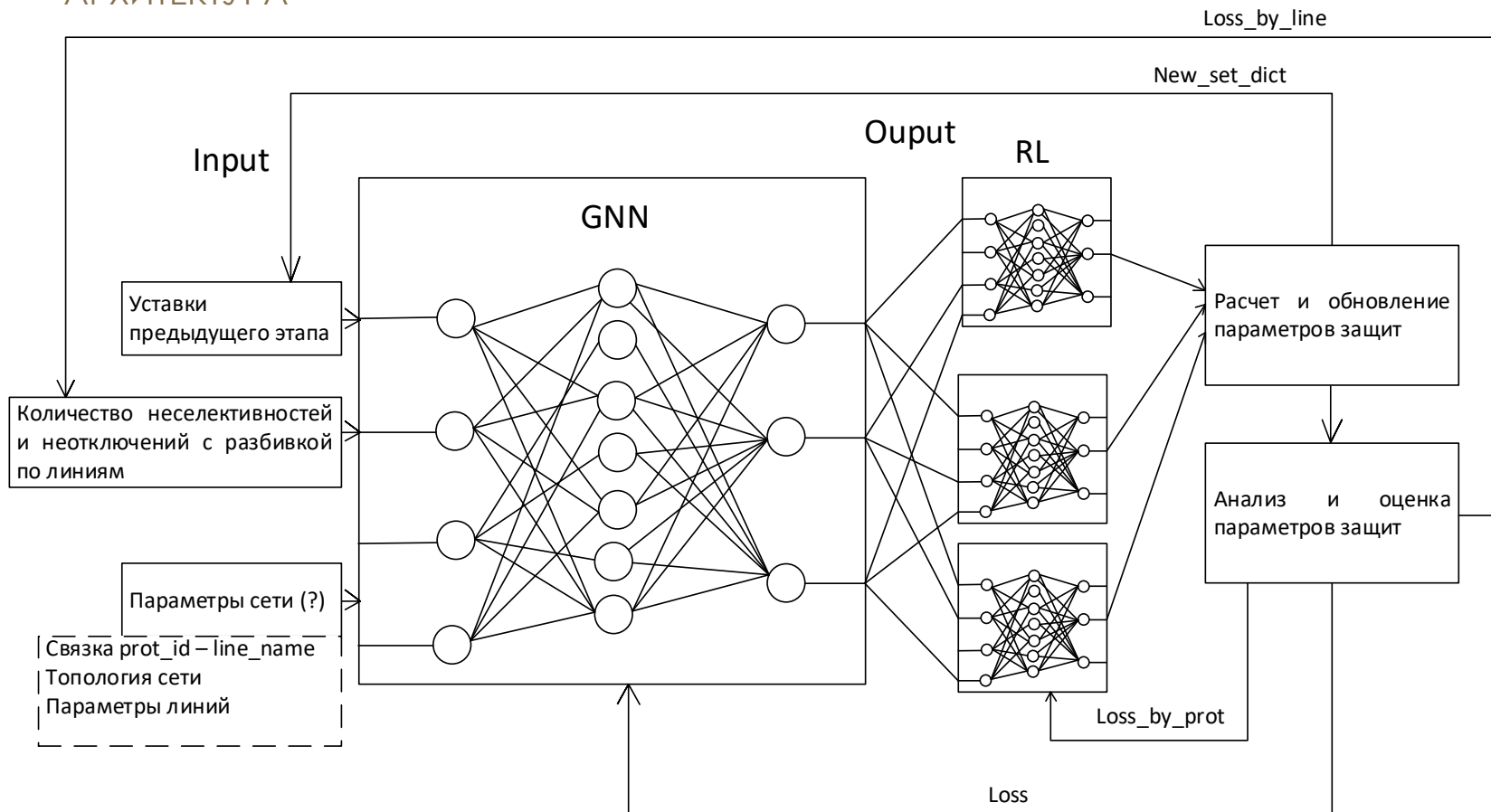


Figure 1. The main directions and methods of artificial intelligence.

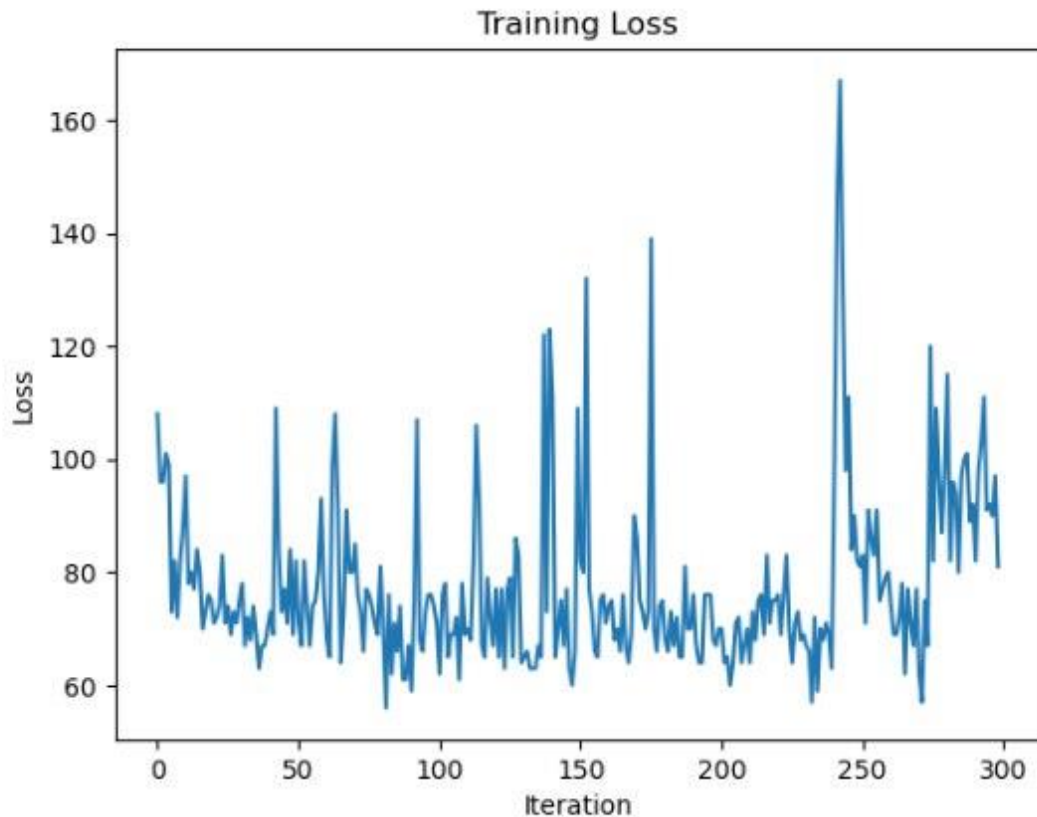


ОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ АРХИТЕКТУРА





ЭТО (КАК МИНИМУМ ПОКА) НЕ ОЧЕНЬ РАБОТАЕТ

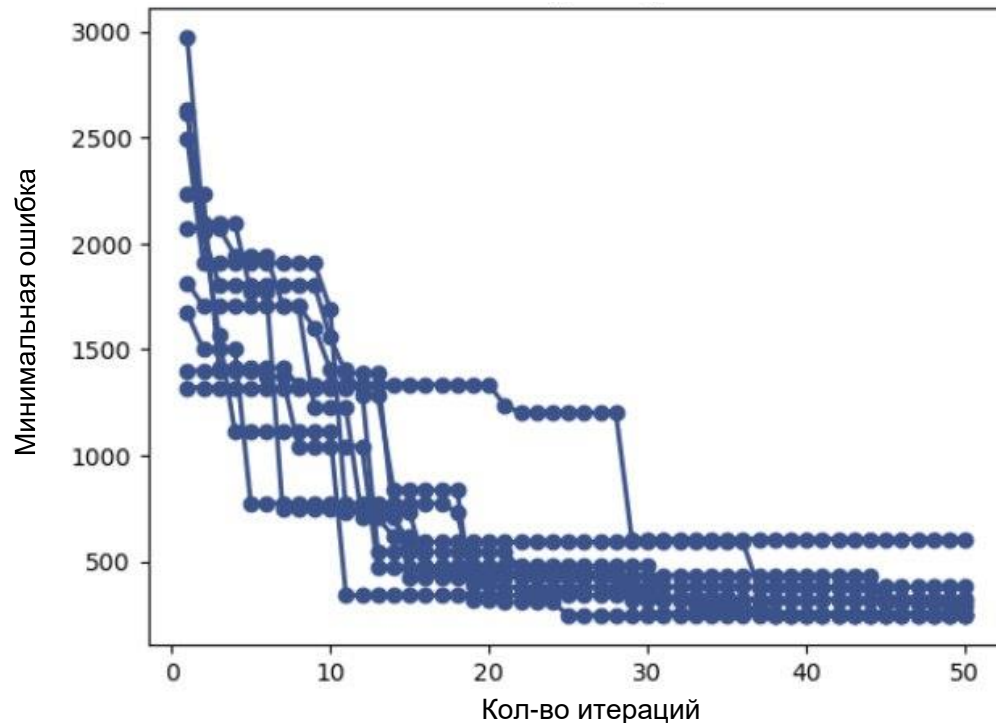




СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ

Алгоритм оптимизации	Среднее минимальное значение ошибки	Минимальная ошибка
Байесовская оптимизация	430	217
Генетический алгоритм	1010	320
Алгоритм роя	1279	391

График минимальной ошибки в результате за 10 тестов
(Байесовская оптимизация)





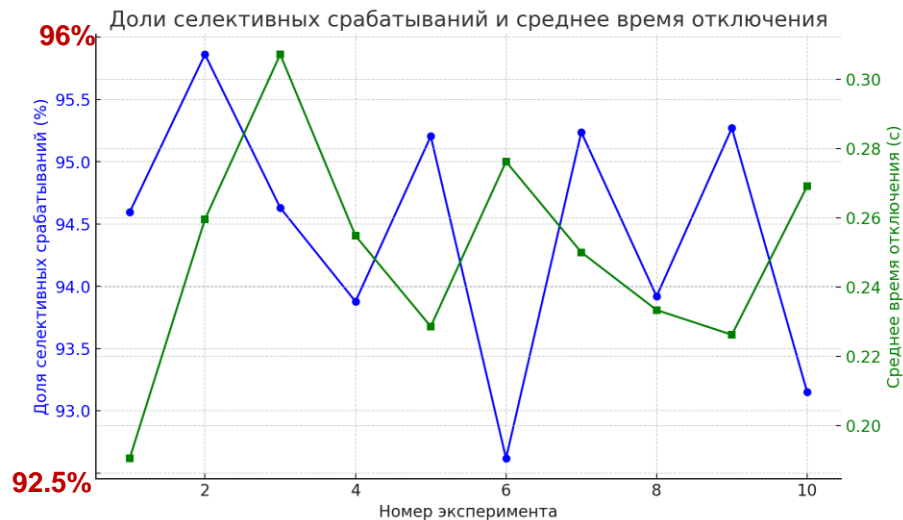
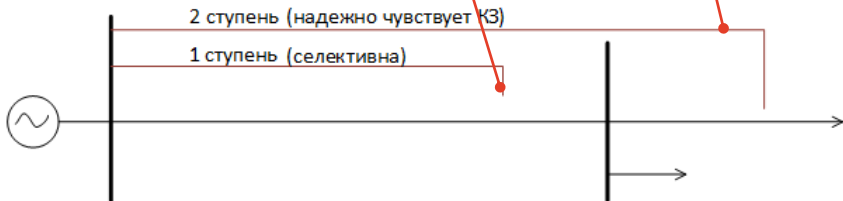
- Оптимизация линия за линией
- Оптимизация ступени за ступенью
- Оптимизация с предварительным аналитическим расчетом

-
- Первые два подхода показали лучший результат, чем оптимизация всех уставок сразу, но результат также был не впечатляющим.
 - Наилучших результатов на данный момент достиг третий вариант, который мы рассмотрим подробнее



Верхняя граница – надежно чувствует КЗ на защищаемой линии во всех подрежимах

Нижняя граница – абсолютно селективные защиты, полностью отстроенные от КЗ вне линии



➔ После нахождения уставок 1 и 2 степени вводятся дополнительные ступени защит (3-4), и для них подбираются уставки между этими границами.

ГРАФИЧЕСКИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ ИНТЕРФЕЙС

Сеть Подрежимы Оптимизация Анализ

Загрузка из файла Сохранение в файл Очистка сети

Узлы ▾

Название	X	Y	Y1	Y2	Y0	J1
----------	---	---	----	----	----	----

Добавить Удалить Тестовая модель

ЭТО
ВИДЕО
->



Потенциальные проблемы

- 1) Подводные камни скрытые за сыростью реализации
- 2) Вычислительная сложность и комбинаторный взрыв
- 3) Интерпретируемость

Потенциальные решения

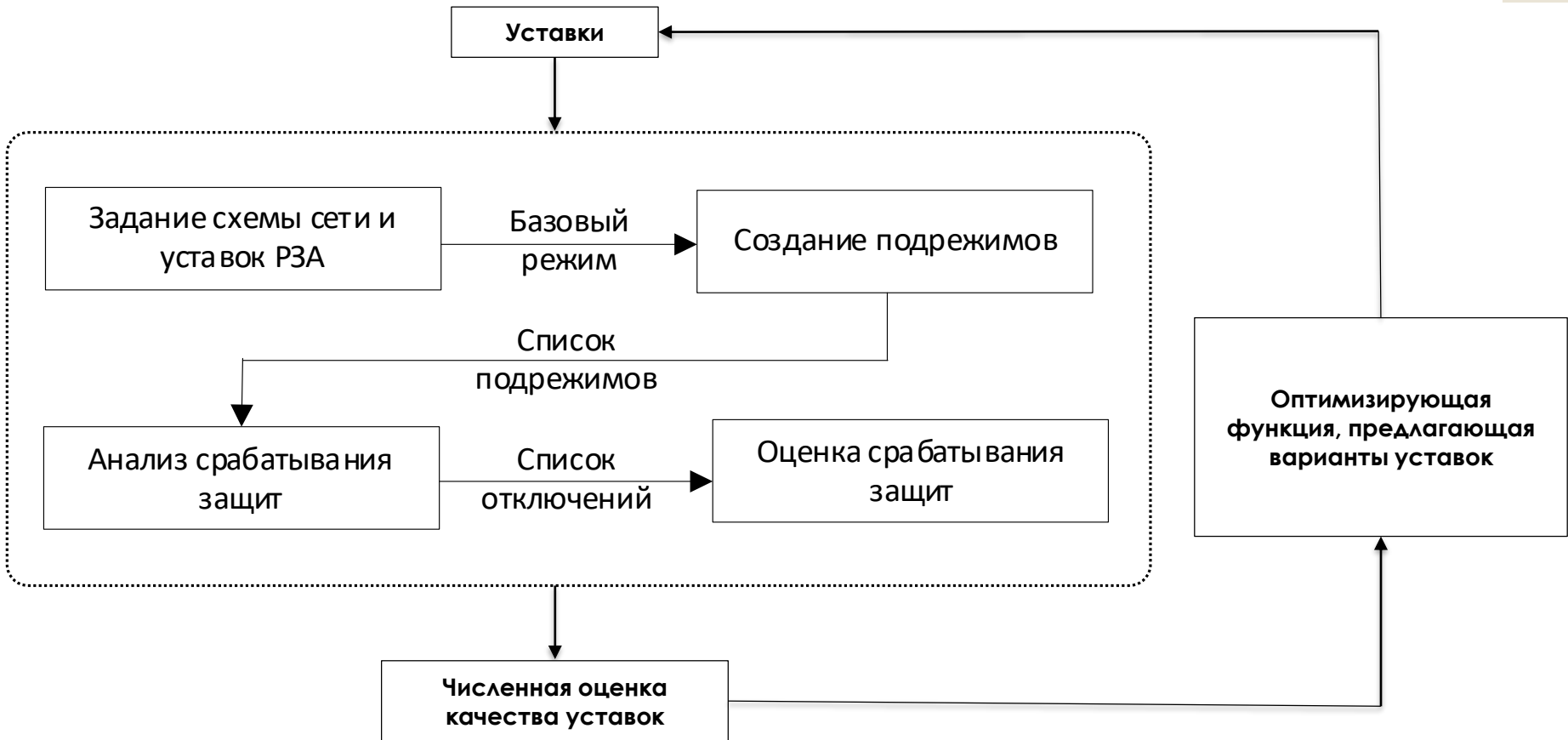
- 1) Двигаться дальше
- 2) Оконная реализация вычислений и поиск новых эвристик
- 3) Более свободная настройка составляющих оценки, понятный выходной файл





ПРОГРАММА ОПТИМИЗАЦИИ УСТАВОК

ОБЩАЯ СХЕМА





СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
RUSSIAN POWER SYSTEM OPERATOR

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Ведущий специалист
СРЗА Приморского РДУ
Клемент Артур

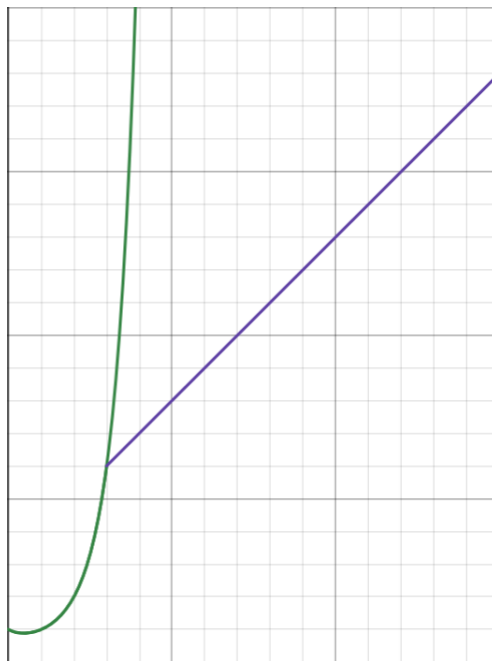
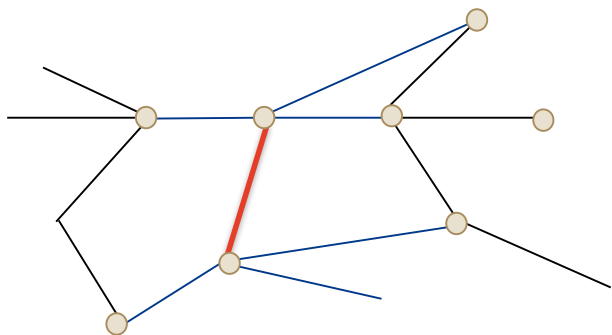


@DIONISLESS

По вопросам сотрудничества можете обращаться:
Клемент Артур Робертович telegramm: @Dionisless



Проблема комбинаторного взрыва



Сеть Подрежимы Оптимизация Анализ

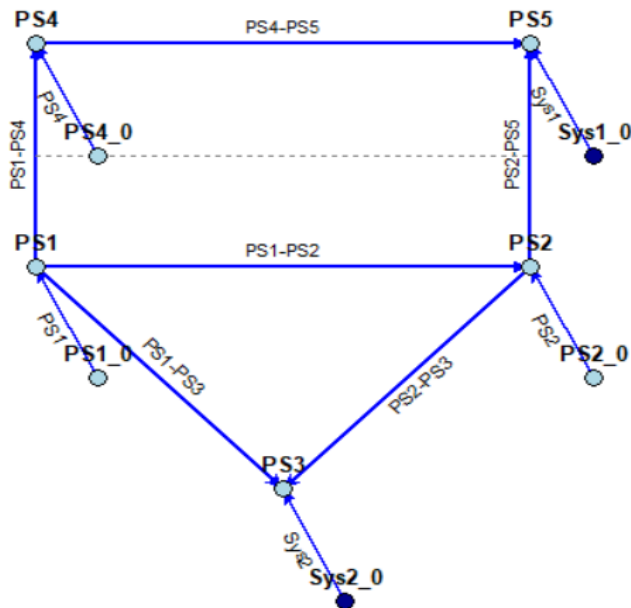
Загрузка из файла

Сохранение в файл

Очистка сети

Линии

Названи	От узла	К узлу	Z1	Z2	Z0	E1	E2	E0	B1	B2	BC
Sys1	0	PS5	2j	2j	3j	(65000+					
Sys2	0	PS3	2j	2j	3j	(65000+					
PS1-PS2	PS1	PS2	10j	10j	30j						
PS1-PS3	PS1	PS3	10j	10j	30j						
PS2-PS3	PS2	PS3	10j	10j	30j						
PS1-PS4	PS1	PS4	10j	10j	30j						
PS2-PS5	PS2	PS5	10j	10j	30j						
PS4-PS5	PS4	PS5	10j	10j	30j						
PS1	0	PS1	(500+0j)	200j	30j						
PS2	0	PS2	(500+0j)	200j	30j						
PS4	0	PS4	(500+0j)	200j	30j						



Добавить

Удалить

Тестовая модель

Сеть Подрежимы Оптимизация Анализ

(ПОЯС [1] +ИНДУКЦ) *ТИПКЗ [A0] *ЛИНИИКЗ [ВСЕ] *ШАГ [0.999] *ПЕРЕБОР [1]

Выполнить

ПОЯС[int]

ИНДУКЦ

ОБЪЕКТЫ[line1,line2]

МАКСТОК[int]

ЛИНИИКЗ[line1,line2]

ПЕРЕБОР[int]

ТИПКЗ[ABC,A0]

ШАГ[0.2]

Подрежимов: 88, Расчетное время: 4.36 с.

Уточнить расчет

Подрежим 1:

```

id: 1
line_kz: Sys1
kz_type: A0
percent: 0.0
p_off: ('PS2-PS5',)

```

Подрежим 2:

```

id: 2
line_kz: Sys1
kz_type: A0
percent: 0.99
p_off: ('PS2-PS5',)

```

Подрежим 3:

```

id: 3
line_kz: Sys1
kz_type: A0
percent: 0.0
p_off: ('PS4-PS5',)

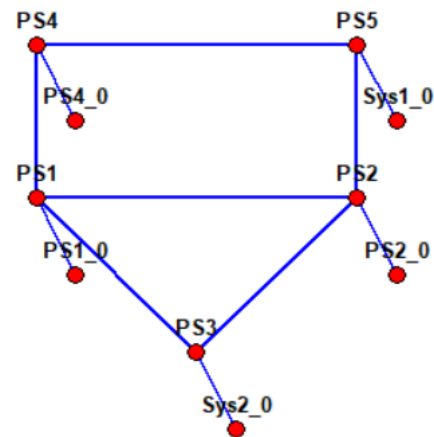
```

Подрежим 4:

```

id: 4

```



Сеть Подрежимы **Оптимизация** Анализ

Весы ошибки

Неотключение КЗ:	10
Отключение КЗ:	0
Неселективное срабатывание:	1
К*среднее время отключения:	5
К*среднее Кч:	0

Весы ошибки дальнее резервирование

<input type="checkbox"/> Анализировать дальнее резервирование	
Неотключение КЗ:	5
Отключение КЗ:	0
Неселективное срабатывание:	0.3
К*среднее время отключения:	0.2
К*среднее Кч:	0

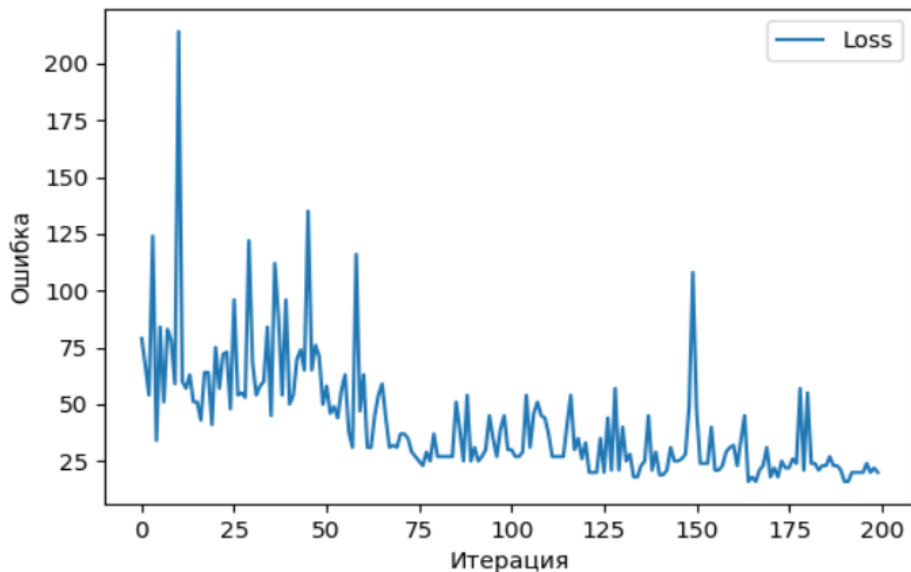
Коэффициенты защит

К отстройки:	1.1
К чувствительности:	0.9

Другие параметры

Количество итераций:	200
Количество ступеней защит:	4
<input checked="" type="checkbox"/> Выводить результаты не оптимизационных функций	

Начать оптимизацию



Вводим третью и четвертую ступень с параметрами между первой и второй и оптимизируем их параметры (optimize_third_stage_settings)

Общая ошибка: 16

Количество неселективных срабатываний: 8

Количество селективных срабатываний: 147

Доля селективных срабатываний: 95%

Количество неотключений: 0

Среднее время отключения: 0.19 с

Оптимизация завершена

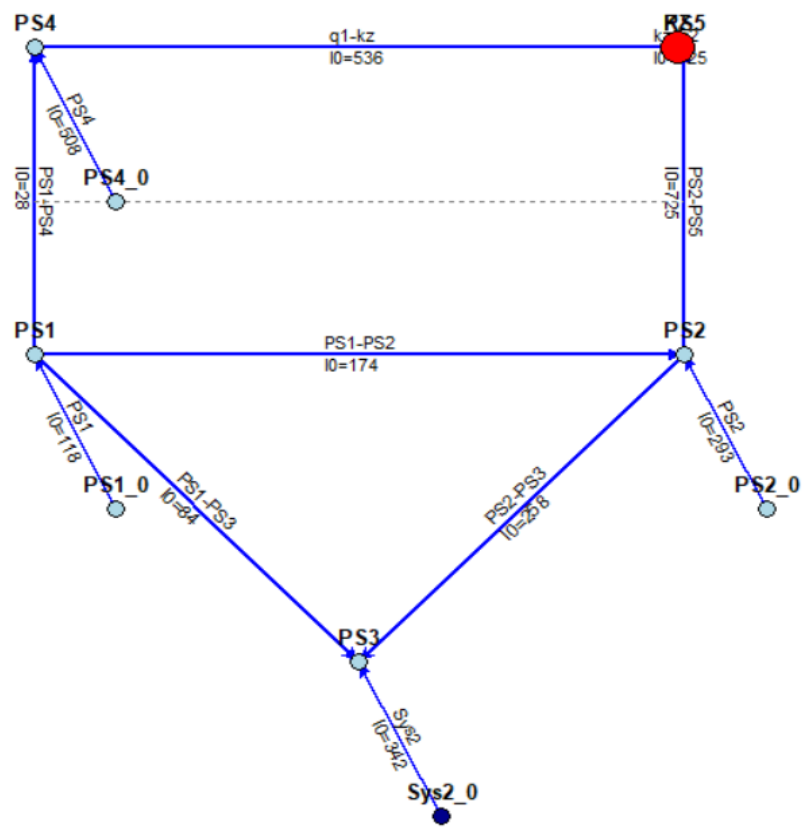
Best loss: 16.0

Сеть Подрежимы Оптимизация Анализ

Неоткл КЗ Неселект Неоткл КЗ: 0 Неселект: 8

Тип	DI	Линия КЗ	Тип КЗ	Место КЗ	Откл линии
Неселект	3	Sys1	A0	0.0	PS4-PS5
Неселект	4	Sys1	A0	0.99	PS4-PS5
Неселект	35	PS2-PS3	A0	0.0	Sys2
Неселект	36	PS2-PS3	A0	0.99	Sys2
Неселект	66	PS4-PS5	A0	0.99	Sys1
Неселект	69	PS4-PS5	A0	0.0	PS4
Неселект	82	PS2	A0	0.99	PS2-PS5
Неселект	88	PS4	A0	0.99	PS4-PS5

id	IO сраб	t сраб	Линия	ПС	Степень
1	110.000000000	0	Sys1	PS5	1
2	532.1	1.4	Sys1	PS5	2
3	457.3	0.8	Sys1	PS5	3
4	531.1	1.2	Sys1	PS5	4
5	110.000000000	0	Sys2	PS3	1
6	623.6	1.4	Sys2	PS3	2
7	581.9	0.0	Sys2	PS3	3
8	577.1	0.0	Sys2	PS3	4
9	849.483135558	0	PS1-PS2	PS1	1
10	888.986493400	0	PS1-PS2	PS2	1
11	446.6	1.4	PS1-PS2	PS1	2
12	472.3	1.4	PS1-PS2	PS2	2



Пересчет

Время: До КЗ

Назад

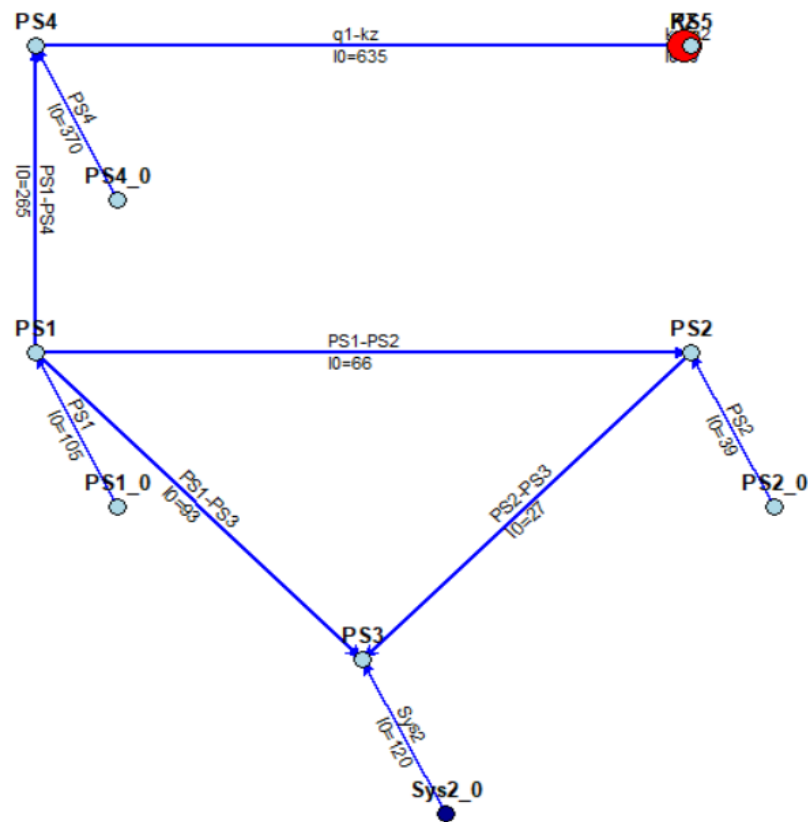
Вперед

Сеть Подрежимы Оптимизация **Анализ**

Неоткл КЗ Неселект Неоткл КЗ: 0 Неселект: 8

Тип	DI	Линия КЗ	Тип КЗ	Место КЗ	Откл линии
Неселект	3	Sys1	A0	0.0	PS4-PS5
Неселект	4	Sys1	A0	0.99	PS4-PS5
Неселект	35	PS2-PS3	A0	0.0	Sys2
Неселект	36	PS2-PS3	A0	0.99	Sys2
Неселект	66	PS4-PS5	A0	0.99	Sys1
Неселект	69	PS4-PS5	A0	0.0	PS4
Неселект	82	PS2	A0	0.99	PS2-PS5
Неселект	88	PS4	A0	0.99	PS4-PS5

id	IO сраб	t сраб	Линия	ПС	Степень
1	110.000000000	0	Sys1	PS5	1
2	532.1	1.4	Sys1	PS5	2
3	457.3	0.8	Sys1	PS5	3
4	531.1	1.2	Sys1	PS5	4
5	110.000000000	0	Sys2	PS3	1
6	623.6	1.4	Sys2	PS3	2
7	581.9	0.0	Sys2	PS3	3
8	577.1	0.0	Sys2	PS3	4
9	849.483135558	0	PS1-PS2	PS1	1
10	888.986493400	0	PS1-PS2	PS2	1
11	446.6	1.4	PS1-PS2	PS1	2
12	472.3	1.4	PS1-PS2	PS2	2



Пересчет

Время: 0.0

Назад

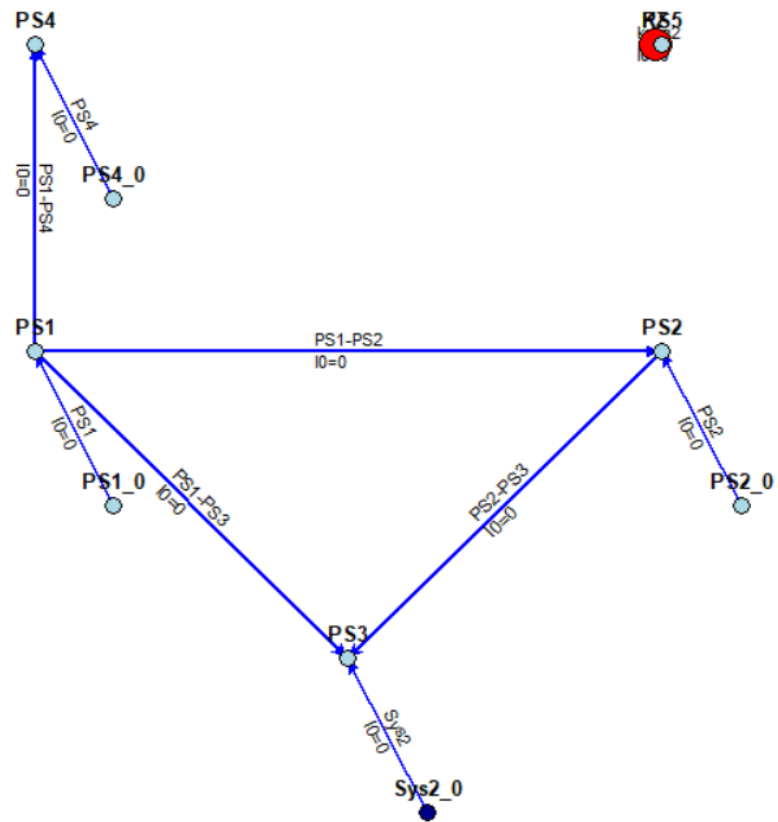
Вперед

Сеть Подрезимы Оптимизация **Анализ**

Неоткл КЗ Неселект Неоткл КЗ: 0 Неселект: 8

Тип	DI	Линия КЗ	Тип КЗ	Место КЗ	Откл линии
Неселект	3	Sys1	A0	0.0	PS4-PS5
Неселект	4	Sys1	A0	0.99	PS4-PS5
Неселект	35	PS2-PS3	A0	0.0	Sys2
Неселект	36	PS2-PS3	A0	0.99	Sys2
Неселект	66	PS4-PS5	A0	0.99	Sys1
Неселект	69	PS4-PS5	A0	0.0	PS4
Неселект	82	PS2	A0	0.99	PS2-PS5
Неселект	88	PS4	A0	0.99	PS4-PS5

id	l0 сраб	t сраб	Линия	ПС	Ступень
1	110.000000000	0	Sys1	PS5	1
2	532.1	1.4	Sys1	PS5	2
3	457.3	0.8	Sys1	PS5	3
4	531.1	1.2	Sys1	PS5	4
5	110.000000000	0	Sys2	PS3	1
6	623.6	1.4	Sys2	PS3	2
7	581.9	0.0	Sys2	PS3	3
8	577.1	0.0	Sys2	PS3	4
9	849.483135558	0	PS1-PS2	PS1	1
10	888.986493402	0	PS1-PS2	PS2	1
11	446.6	1.4	PS1-PS2	PS1	2
12	472.3	1.4	PS1-PS2	PS2	2



Пересчет

Время: 0.2

Назад

Вперед



СХЕМА ВЫПОЛНЕНИЯ ФУНКЦИЙ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ МЕЖДУ БЛОКАМИ ПРОГРАММЫ

