



СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
RUSSIAN POWER SYSTEM OPERATOR



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Научно-практическая конференция имени В.Н. Ясникова

**Определение максимально допустимого перетока
мощности в контролируемом сечении «Выдача
мощности Богучанской ГЭС» с учётом эффективности
реализации управляющих воздействий для обеспечения
динамической устойчивости**

*Планирование и управление электроэнергетическими
системами*

Докладчик: Кутявин Виктор Витальевич

Организация: Томский политехнический университет

Руководитель: Кац И.М., к.т.н, доцент ОЭЭ ИШЭ

Кемерово,
7 декабря 2023 г.

Установленная
мощность ГЭС
Тип гидротурбин

2997 MBT

P075-B-750 (340 MBT)

Тип гидрогенераторов

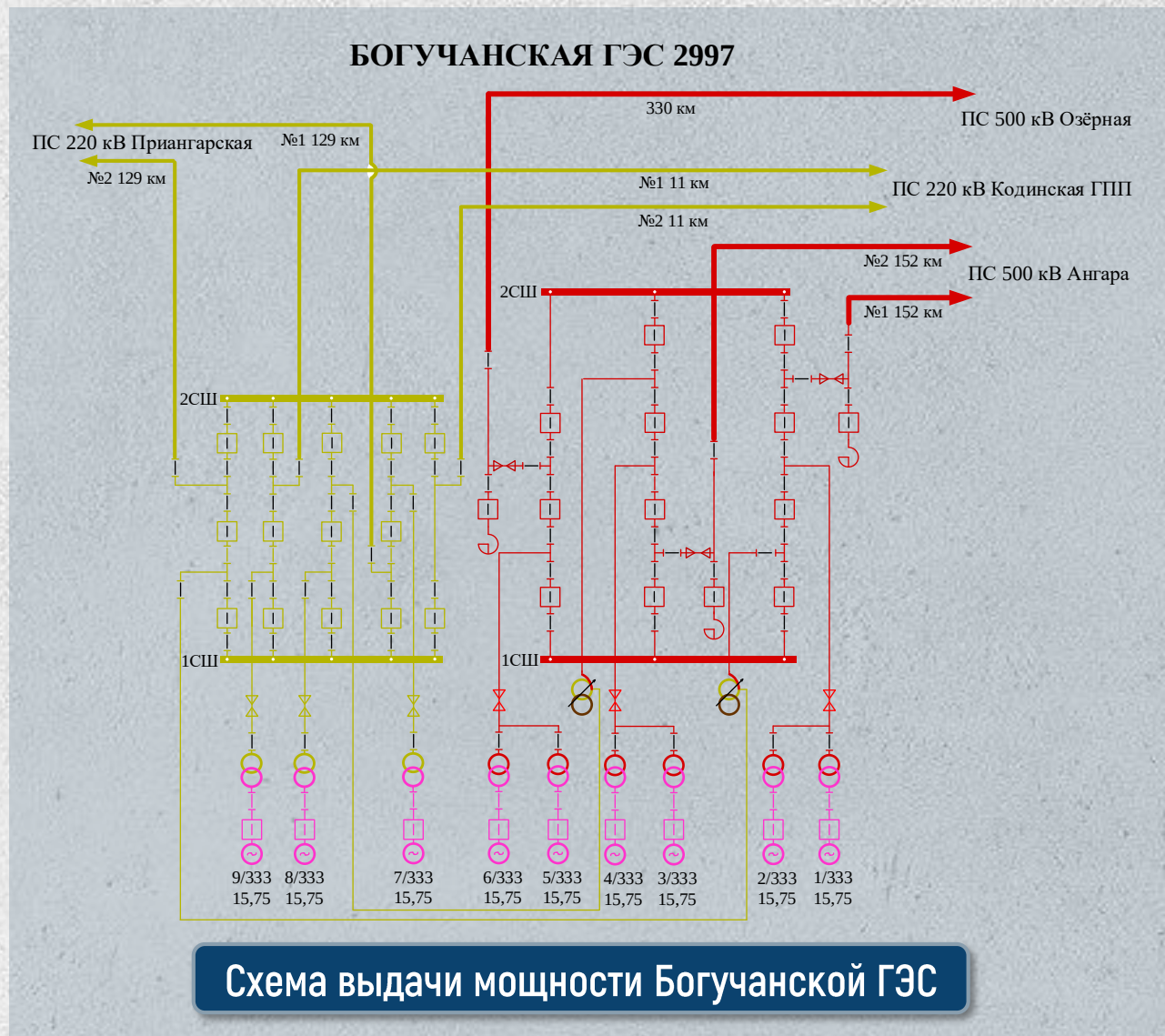
СВ 1548/203-66 УХЛ4
(333 МВТ)

Минимально допустимая
мощность генератора

270 MBT

Состав контролируемого сечения «Выдача мощности Богучанской ГЭС»:

- КВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Ангара №1
- КВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Ангара №2
- КВЛ 500 кВ Богучанская ГЭС – Озёрная
- ВЛ 220 кВ Богучанская ГЭС – Приангарская №1
- ВЛ 220 кВ Богучанская ГЭС – Приангарская №2



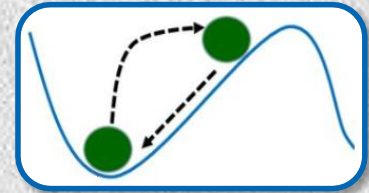


Проблема

Критерий назначения МДП



Обеспечение динамической устойчивости после нормативных возмущений



МДП с учётом действия ПА определяется соотношением:

$$P_{\text{МДП}}^{\text{с ПА}} = P_{\text{МДП}}^{\text{без ПА}} + \Delta P_{\text{ПА}}^{\text{ДУ}}$$

5 УВ

72 ремонтные схемы

7 составов генераторов

20 шагов утяжеления

20 нормативных возмущений

1,0 млн
расчётов

3,5 тыс. дней





ФТКЗ

Класс напряжения
сети

Аварийный сброс
мощности станции

Управляющие
воздействия

500 кВ

220 кВ

АРЗКЗ

4 ступени

АРБКЗ

6 ступеней

АРБКЗ

4 ступени

ОГ

ОН

$$dP1_{ST} = 1 - \frac{P1_{ST}}{P0_{ST}} = 1 - \frac{P_{220} \cdot n_{220} + P_{500} \cdot n_{500}}{P \cdot (n_{220} + n_{500})}$$

где $P1_{ST}$ – мощность Богучанской ГЭС в момент фиксации КЗ;
 $P0_{ST}$ – мощность Богучанской ГЭС в доаварийном режиме.



Влияющие факторы на величину МДП в КС «Выдача мощности Богучанской ГЭС»

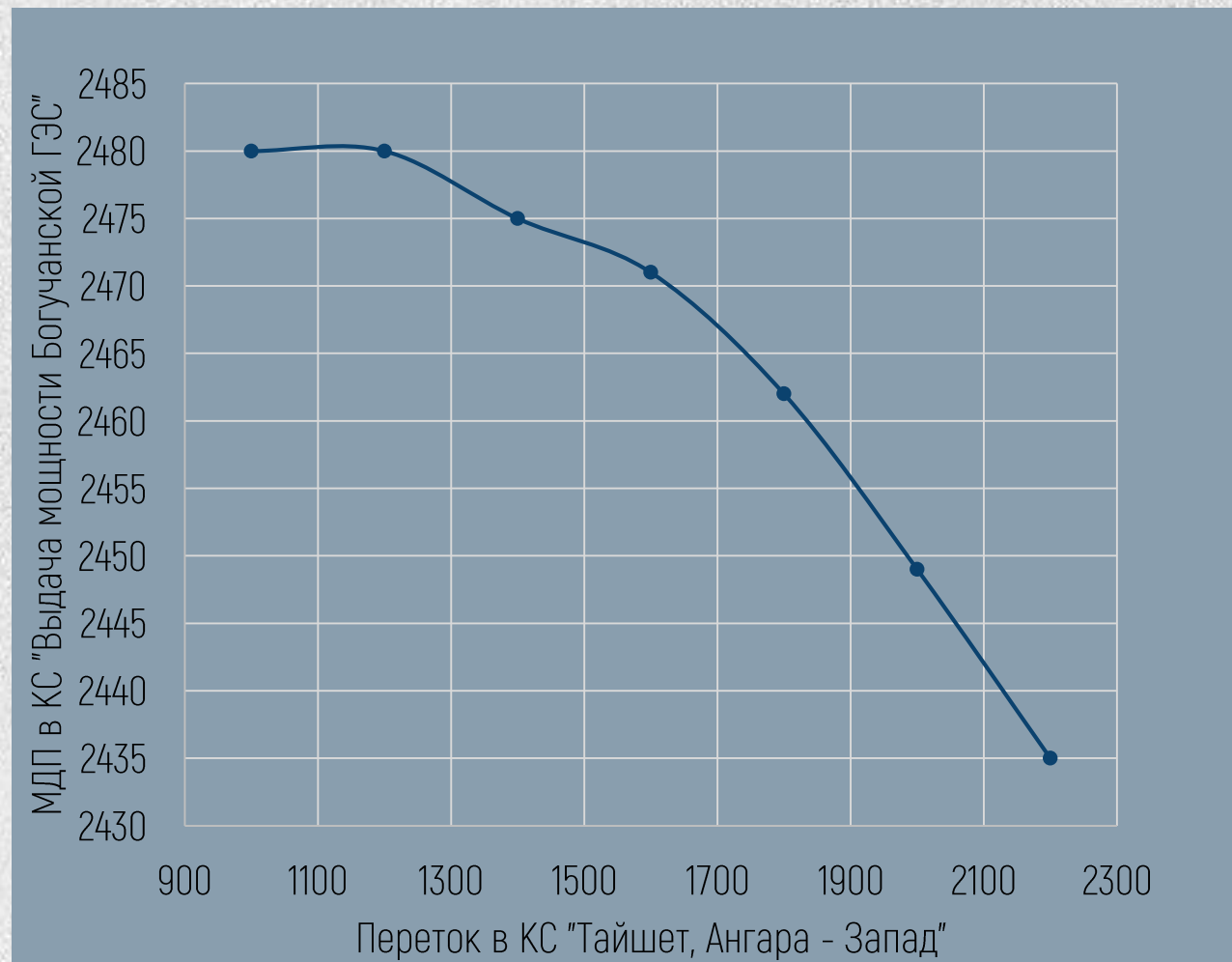
Перечень влияющих факторов на выдачу мощности Богучанской ГЭС:

1. Потребление Кодинской ГПП
2. Потребление Богучанского АЗ
3. Перетоки в КС «Тайшет, Ангара – Запад»
4. Уровень напряжения на шинах 500 кВ Богучанской ГЭС
5. Состояние СКРМ



Учёт влияющих факторов при расчётах:

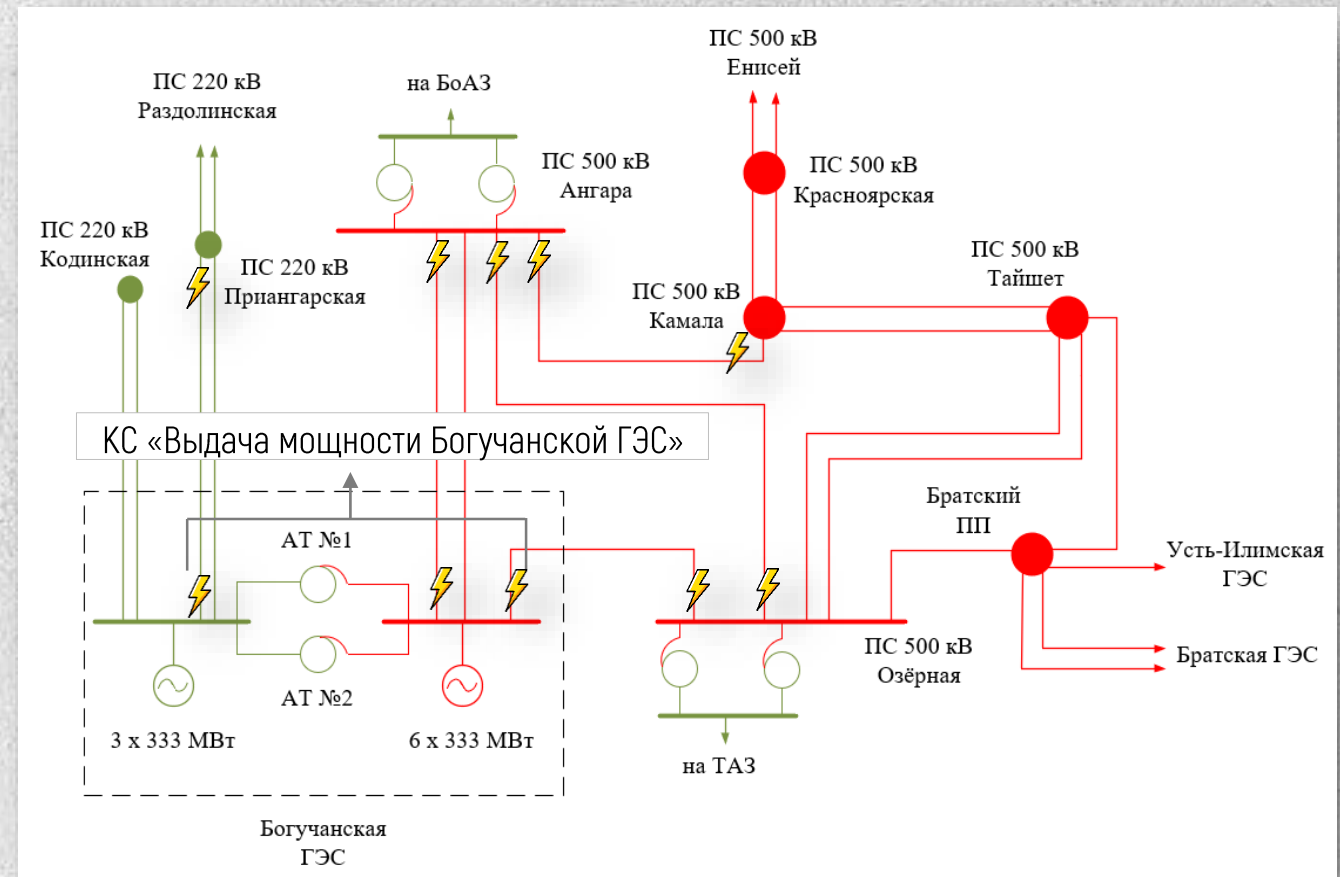
- ✓ Потребление ПС 220 кВ Кодинская ГПП – **55,1** МВт
- ✓ Потребление БоАЗ – **436** МВт
- ✓ Переток в в КС «Тайшет, Ангара – Запад» – **2200** МВт
- ✓ Уровень напряжения на СШ 500 кВ Богучанской ГЭС – **515** кВ, при ремонте двух и более элементов – **520** кВ
- ✓ СКРМ отключены





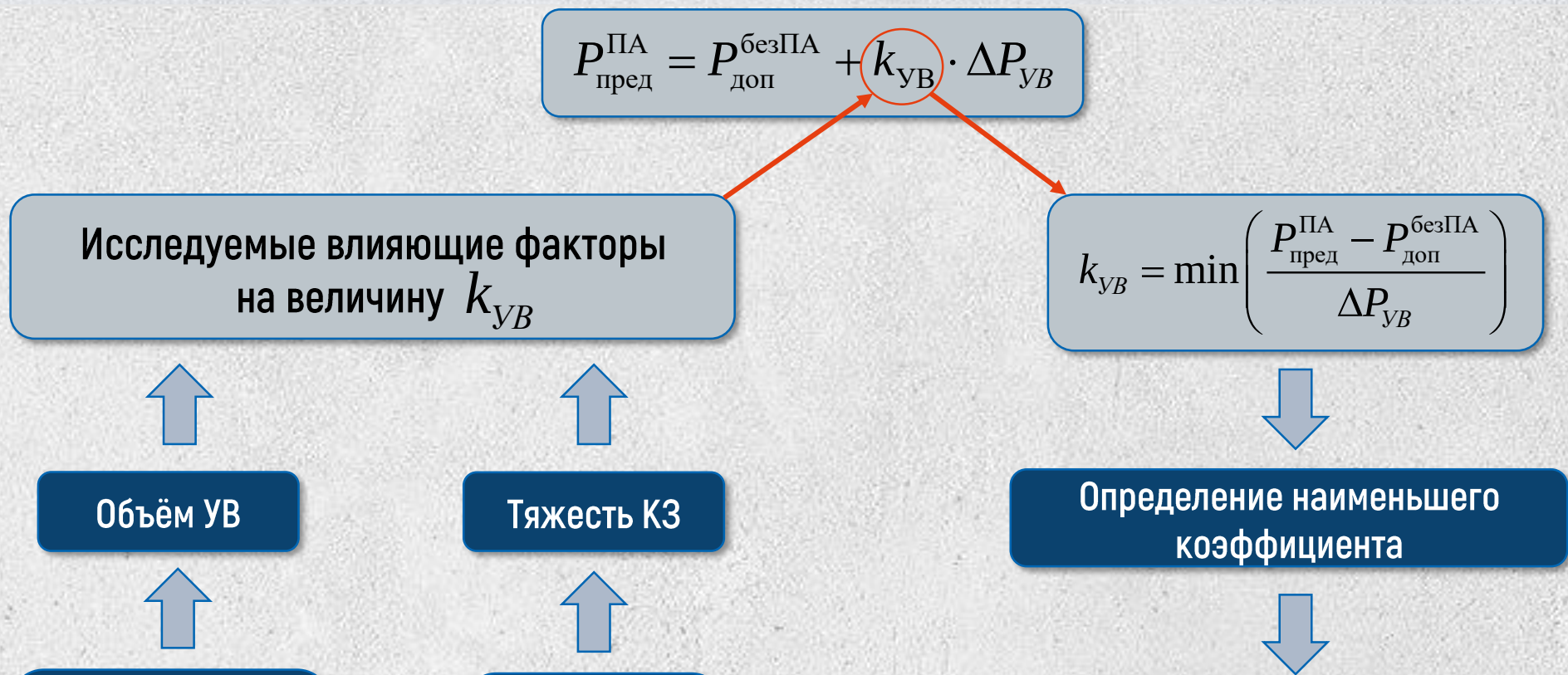
Нормативные возмущения

Группа	Рассматриваемые нормативные возмущения:
I	– Отключение сетевого элемента основной защитой при однофазном коротком замыкании с неуспешным АПВ
II	– Отключение сетевого элемента основной защитой при трехфазном КЗ с неуспешным АПВ
II	– Отключение сетевого элемента основной защитой при двухфазном КЗ на землю с неуспешным АПВ
III	– Отключение сетевого элемента основной защитой при однофазном КЗ с отказом одного выключателя





Методика определения коэффициентов эффективности УВ

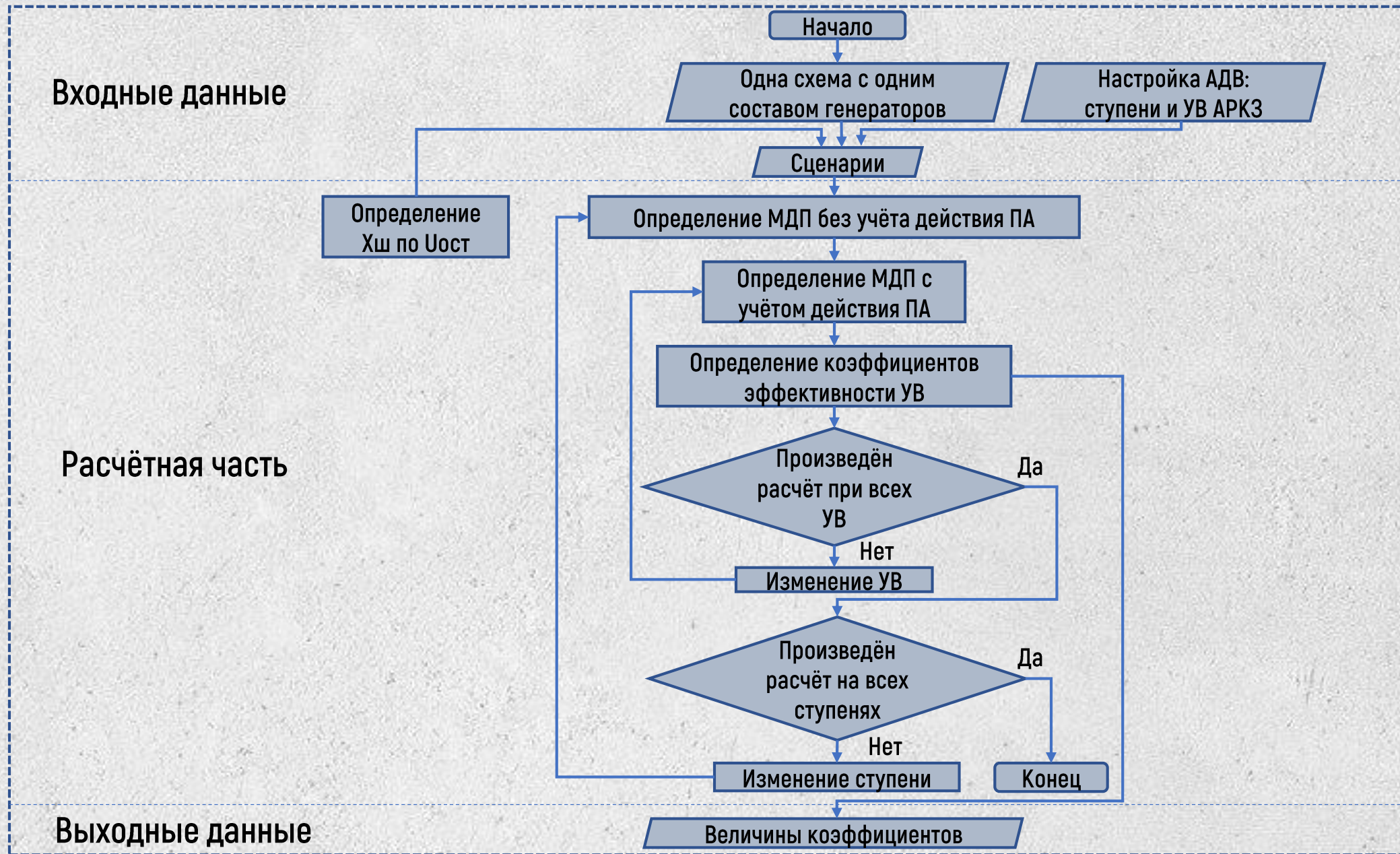


МДП с ПА						
9 ГТ	8 ГТ	7 ГТ	6 ГТ	5 ГТ	4 ГТ	3 ГТ
$2400 + k_{эф} \cdot P_{ог}^{БогГЭС}$	$2350 + k_{эф} \cdot P_{ог}^{БогГЭС}$	$2150 + k_{эф} \cdot P_{ог}^{БогГЭС}$	$1900 + k_{эф} \cdot P_{ог}^{БогГЭС}$	Без ограничений	Без ограничений	Без ограничений

Приложение к положению по управлению режимами работы ЭЭС



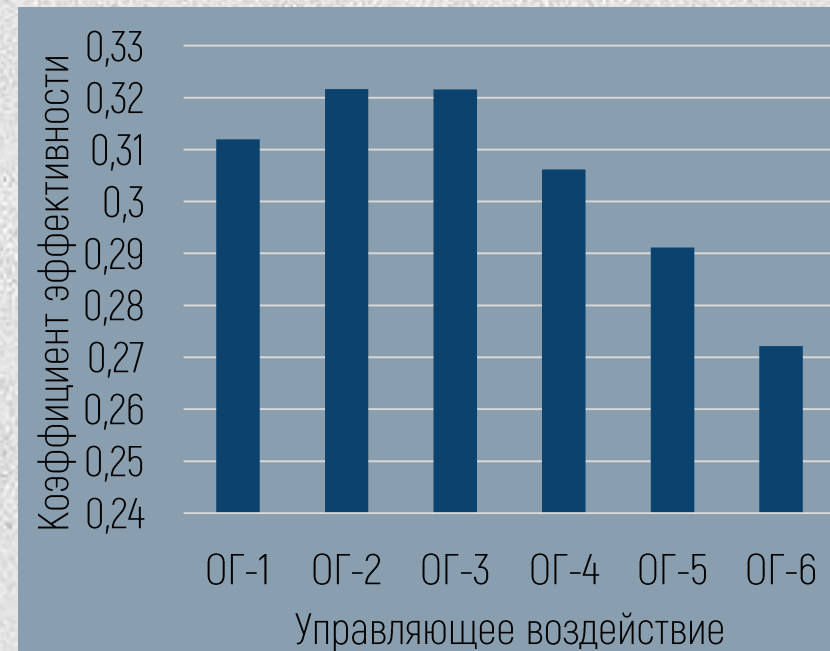
Алгоритм расчёта коэффициентов эффективности УВ





Влияние объёма управляющих воздействий на эффективность УВ в нормальной схеме

Степень АРЗКЗ	МДП без ПА, МВт	Управляющие воздействия	Загрузка генераторов при МДП с ПА, МВт	Загрузка генераторов 220 кВ в момент КЗ, МВт	Загрузка генераторов 500 кВ в момент КЗ, МВт	Тяжесть КЗ	МДП с ПА, МВт	Коэффициент эффективности
4	2435	ОГ-1 Бог	288.5	114.7	88.50	0.660	2525	0.312
		ОГ-2 Бог, ОН-2 Бр	300.0	119.2	92.50		2628	0.322
		ОГ-3 Бог, ОН-4 Бр	312.0	123.9	96.60		2736	0.321
		ОГ-4 Бог, ОН-4 Бр, ОН-1 Кр	322.5	128.1	100.2		2830	0.306
		ОГ-5 Бог, ОН-4 Бр, ОН-3 Кр	332.5	132.0	103.6		2919	0.291
		ОГ-6 Бог, ОН-4 Бр, ОН-4 Кр	340.5	135.1	106.5		2991	0.272

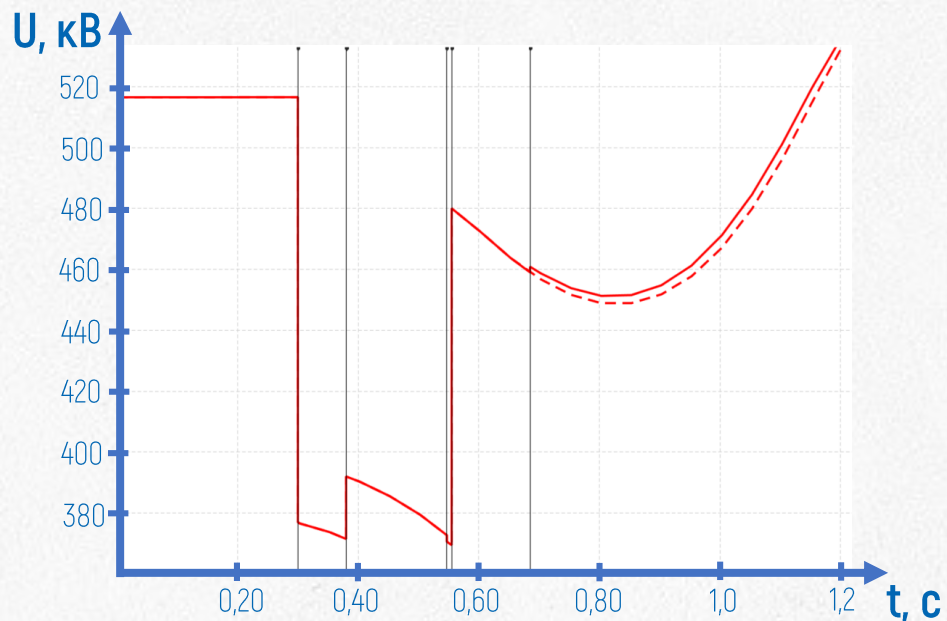


Уменьшение коэффициента эффективности

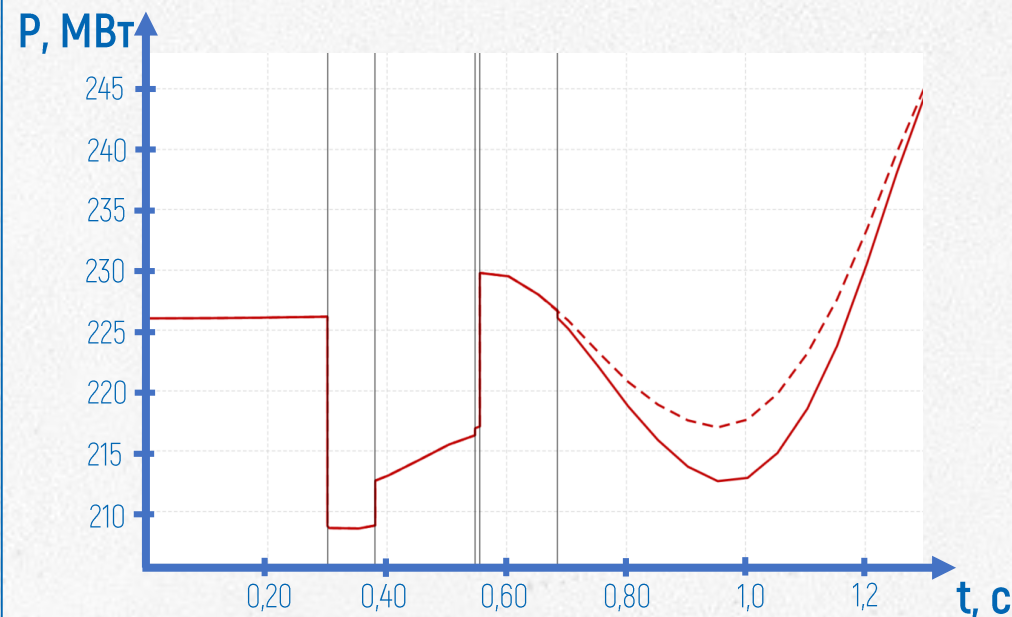
Увеличение объёма управляющих воздействий



Влияние УВ ОН на коэффициент эффективности УВ

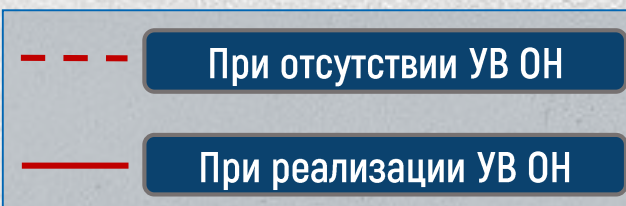


Напряжение на ПС 500 кВ Озёрная



Активная мощность генератора Усть-Илимской ГЭС

Место замера напряжения	Несбалансированное УВ, МВт	Реализация ОН-2 Бр, МВт	Приращение напряжения, кВ
ПС 500 кВ Озёрная	459,1	460,9	1,86
ПС 500 кВ Тайшет	459,2	461,0	1,82
ПС 500 кВ Ангара	377,0	378,3	1,33
Богучанская ГЭС	390,5	391,5	0,970
ПС 500 кВ Камала-1	447,6	448,2	0,670



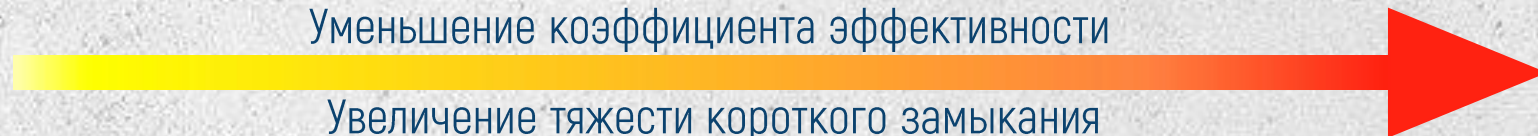


Влияние тяжести короткого замыкания на эффективность УВ в нормальной схеме

Степень АРЗКЗ	МДП без ПА, МВт	Управляющие воздействия	Загрузка генераторов при МДП с ПА, МВт	Загрузка генераторов 220 кВ в момент КЗ, МВт	Загрузка генераторов 500 кВ в момент КЗ, МВт	Тяжесть КЗ	МДП с ПА	Коэффициент эффективности
4	2435	ОГ-1 Бог	288.5	114.7	88.50	0.660	2525	0.312
		ОГ-2 Бог, ОН-2 Бр	300.0	119.2	92.50		2628	0.322
		ОГ-3 Бог, ОН-4 Бр	312.0	123.9	96.60		2736	0.321
		ОГ-4 Бог, ОН-4 Бр, ОН-1 Кр	322.5	128.1	100.2		2830	0.306
		ОГ-5 Бог, ОН-4 Бр, ОН-3 Кр	332.5	132	103.6		2919	0.291
		ОГ-6 Бог, ОН-4 Бр, ОН-4 Кр	340.5	135.1	106.5		2991	0.272
3	2547	ОГ-1 Бог	302.5	137.8	113.4	0.600	2650	0.340
		ОГ-2 Бог, ОН-2 Бр	315.0	143.5	118.5		2762	0.341
		ОГ-3 Бог, ОН-4 Бр	327.5	149.2	123.7		2874	0.333
		ОГ-4 Бог, ОН-4 Бр, ОН-1 Кр	338.5	154.2	128.2		2973	0.315
		ОГ-5 Бог, ОН-4 Бр, ОН-3 Кр	349.0	159	132.6		3067	0.298
2	2646	ОГ-1 Бог	314.0	157.3	134.3	0.550	2753	0.341
		ОГ-2 Бог, ОН-2 Бр	327.0	163.9	140.3		2870	0.343
		ОГ-3 Бог, ОН-4 Бр	340.6	170.7	146.6		2991	0.338
1	2744	ОГ-1 Бог	325.5	177.4	155.8	0.500	2856	0.344

Уменьшение коэффициента эффективности

Увеличение тяжести короткого замыкания





Результаты расчётов коэффициентов эффективности УВ в нормальной схеме

Количество генераторов	МДП без ПА, МВт	Степень АРЗКЗ	УВ	Загрузка генератора, МВт	Тяжесть КЗ	МДП с ПА, МВт	Коэффициент эффективности
9	2435	4	ОГ-1 Бог	288.5	0.660	2525	0.312
			ОГ-2 Бог ОН-2 Бр	300.0		2628	0.322
			ОГ-3 Бог ОН-4 Бр	312.0		2736	0.321
			ОГ-4 Бог ОН-4 Бр ОН-1 Кр	322.5		2830	0.306
			ОГ-5 Бог ОН-4 Бр ОН-3 Кр	332.5		2919	0.291
			ОГ-6 Бог ОН-4 Бр ОН-4 Кр	340.5		2991	0.272
	2547	3	ОГ-1 Бог	302.5	0.600	2650	0.340
			ОГ-2 Бог ОН-2 Бр	315.0		2762	0.341
			ОГ-3 Бог ОН-4 Бр	327.5		2874	0.333
			ОГ-4 Бог ОН-4 Бр ОН-1 Кр	338.5		2973	0.315
			ОГ-5 Бог ОН-4 Бр ОН-3 Кр	349.0		3067	0.298
	2646	2	ОГ-1 Бог	314.0	0.550	2753	0.341
			ОГ-2 Бог ОН-2 Бр	327.0		2870	0.343
			ОГ-3 Бог ОН-4 Бр	340.5		2991	0.338
	2744	1	ОГ-1 Бог	325.5	0.500	2856	0.344
8	2237	4	ОГ-1 Бог	300.0	0.670	2329	0.307
			ОГ-2 Бог ОН-2 Бр	313.5		2436	0.317
			ОГ-3 Бог ОН-4 Бр	327.0		2544	0.313
			ОГ-4 Бог ОН-4 Бр ОН-1 Кр	339.5		2644	0.300
	2365	3	ОГ-1 Бог	317.0	0.600	2464	0.312
			ОГ-2 Бог ОН-2 Бр	331.5		2580	0.324
			ОГ-3 Бог ОН-4 Бр	346.5		2699	0.321
	2456	2	ОГ-1 Бог	329.5	0.550	2564	0.328
			ОГ-2 Бог ОН-2 Бр	345.5		2691	0.340
7	2040	4	ОГ-1 Бог	314.0	0.680	2127	0.277
			ОГ-2 Бог ОН-2 Бр	328.5		2228	0.286
			ОГ-3 Бог ОН-4 Бр	343.5		2333	0.284
	2186	3	ОГ-1 Бог	337.0	0.600	2287	0.300
			ОГ-2 Бог ОН-2 Бр	353.5		2403	0.307
	2270	2	ОГ-1 Бог	350.5	0.550	2382	0.320
6	1804	4	ОГ-1 Бог	330.5	0.700	1912	0.327
			ОГ-2 Бог ОН-2 Бр	342.0		1981	0.259
	1972	3	ОГ-1 Бог	356.0	0.600	2064	0.258

$\min(k_{yB})$

для одной ступени
АРЗКЗ

$\min(k_{yB})$

для одного состава
генераторов

УВ при $\min(k_{yB})$

Наибольший объём УВ

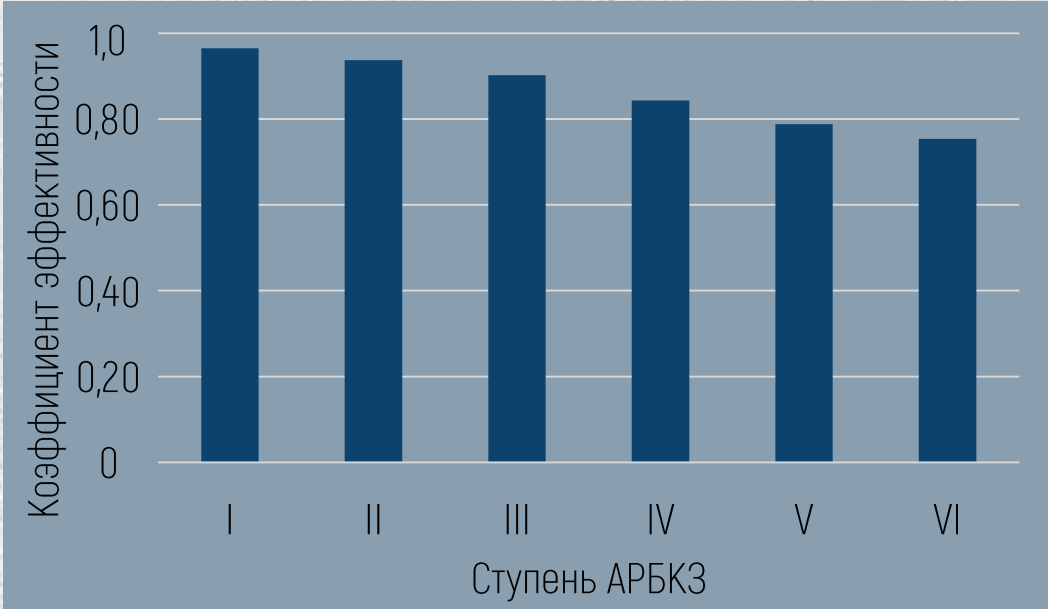
УВ при $\min(k_{yB})$

УВ ОГ-1



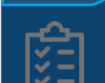
Влияние тяжести короткого замыкания на эффективность УВ в ремонтной схеме

Количество генераторов	МДП без учёта ПА, МВт	Степень АРБКЗ	УВ	Загрузка генератора, МВт	Тяжесть КЗ	МДП с учётом ПА, МВт	Коэффициент эффективности
8	2225	6	ОГ-1	317.0	0,750	2464	0,754
	2261	5		324.0	0,600	2516	0,788
	2297	4		331.0	0,490	2576	0,843
	2313	3		336.0	0,360	2616	0,902
	2325	2		340.0	0,230	2643	0,937
	2333	1		342.0	0,100	2663	0,965



Уменьшение коэффициента эффективности

Увеличение тяжести короткого замыкания



Уточненный алгоритм расчёта коэффициентов эффективности УВ

Минимальный коэффициент эффективности управляющих воздействий наблюдается при:

- наибольшей тяжести КЗ

- наибольшем
объёме управляющих
воздействий

- отсутствии
балансирующих
управляющих
воздействий (ОГ-1)

5 УВ

2 УВ

20 нормативных
возмущений

1 нормативное
возмущение

Количество расчётов сокращается в 50 раз

Одна схема сети с одним составом генерирующего оборудования

Выбор самого тяжёлого возмущения

Выбор наибольшего
объёма УВ

Выбор УВ ОГ-1

Определение МДП

Определение коэффициента эффективности

Заполнение Приложения 6.6 ПУР



Результаты:

1. Формализована в виде алгоритма методика определения коэффициентов эффективности управляющих воздействий при определении величин МДП по условию сохранения динамической устойчивости;
2. Алгоритм позволяет сократить объем расчётов, необходимый для определения коэффициентов эффективности управляющих воздействий средств противоаварийной автоматики.





СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
RUSSIAN POWER SYSTEM OPERATOR



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Научно-практическая конференция имени В.Н. Ясникова

Определение максимально допустимого перетока
мощности в контролируемом сечении «Выдача мощности
Богучанской ГЭС» с учётом эффективности реализации
управляющих воздействий для обеспечения
динамической устойчивости

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Докладчик: Кутявин Виктор Витальевич

Организация: Томский политехнический университет

Контактная информация:  kutyavin_v@mail.ru

 +7 933 336-46-82

Кемерово,
7 декабря 2023 г.