



# **Управляемые шунтирующие реакторы в высоковольтных электрических сетях РФ и других стран**

**Докладчик:**

**Д.т.н. профессор Брянцев Александр Михайлович**

**Председатель наблюдательного совета ООО «ЭСКО»**



Согласно требованию отраслевого стандарта организации ПАО «ФСК ЕЭС»:

УШР класса напряжения 110-500 кВ предназначенные для регулирования и стабилизации напряжения в точке присоединения к узлам нагрузки электрических сетей, подстанций путем плавного регулирования своей реактивной мощности в ручном или автоматическом режиме.

УШР имеют два типа исполнения:

Управляемый тиристорными вентилями шунтирующий реактор (УШРт)

Управляемый подмагничиванием шунтирующий реактор (УШРп)

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ  
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»



СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ  
ОАО «ФСК ЕЭС»

СТО 56947007-  
29.180.03.198-2015

Управляемые шунтирующие реакторы  
для электрических сетей напряжением 110-500 кВ.  
Типовые технические требования

Стандарт организации

Дата введения: 23.01.2015

ОАО «ФСК ЕЭС»  
2015

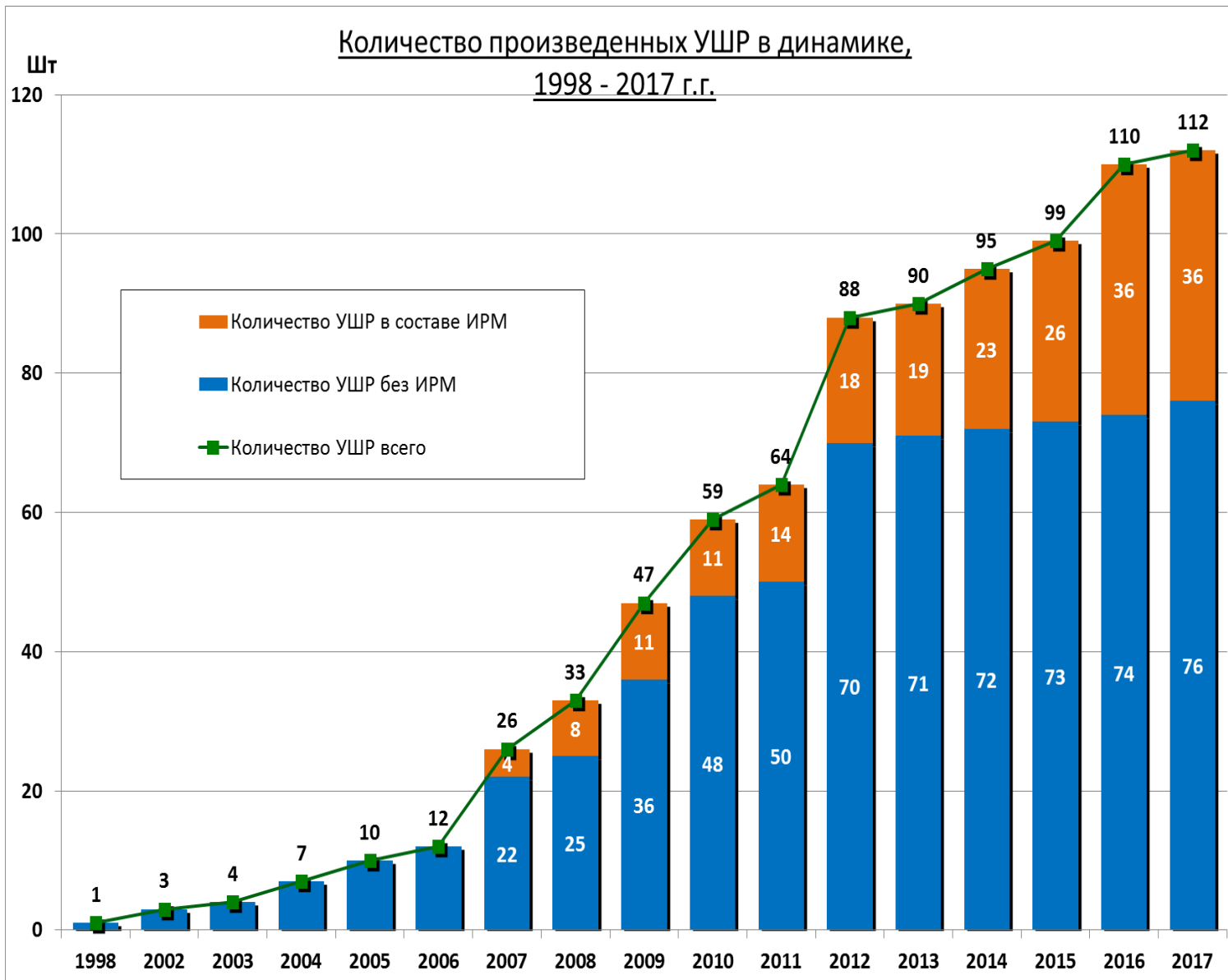


На начало 2018г. в оперативном управлении АО «СО ЕЭС» находились УШР класса напряжения 110-500 кВ следующих производителей:

Тип	Завод-производитель	Страна	Впервые установлен	Кол-во эксплуатируемых
УШР с подмагничиванием	Запорожтрансформатор	Украина	1998	59
	Электрозавод	РФ	2012	1
УШР с тиристорным управлением	Тольятинский Трансформатор	РФ	2014	7
	Белоозерский энергомеханический завод	Белоруссия	2009	4

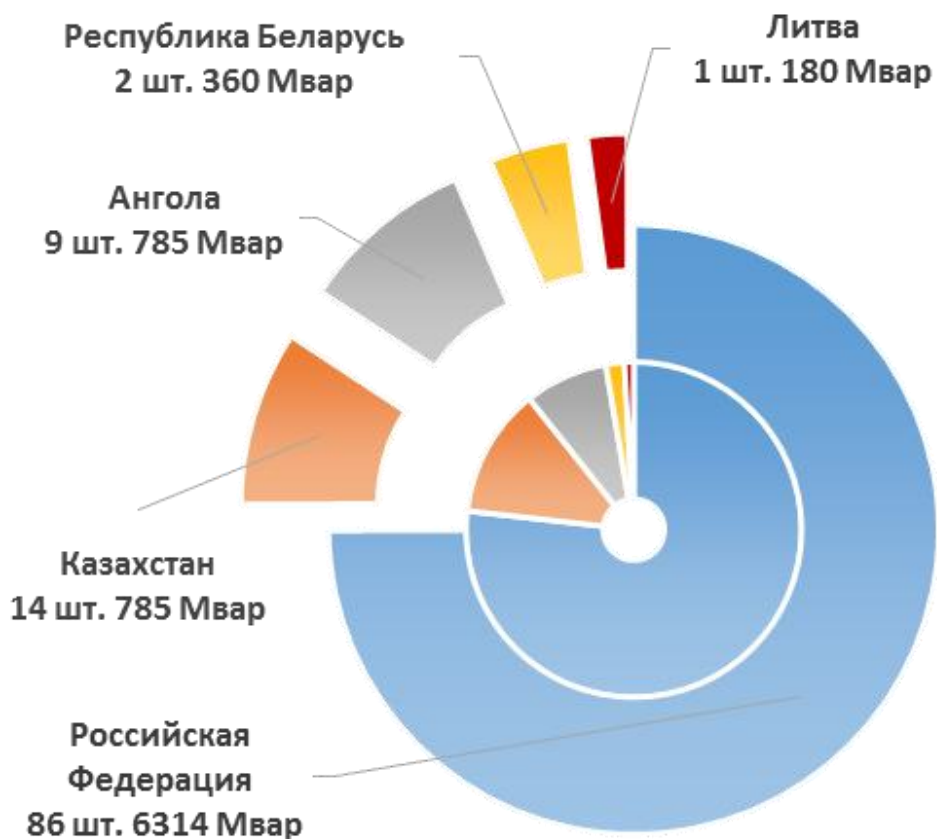
По заключению специалистов АО «СО ЕЭС» все вышеуказанные УШР показали удовлетворительные эксплуатационные характеристики.

Количество произведенных УШР в динамике,  
1998 - 2017 г.г.





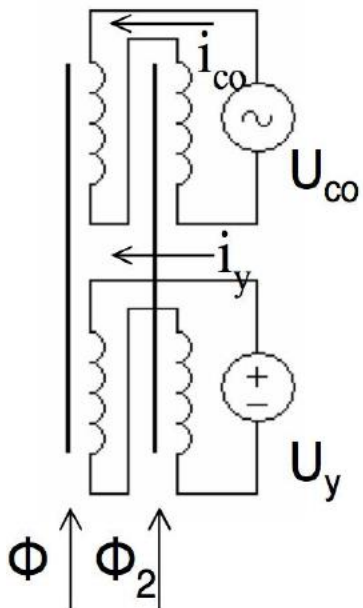
За последние годы УШР и ИРМ подтвердили свою эффективность на 87 объектах (от Заполярья до экватора)



Тип УШР	Класс напряжения	Всего УШР		УШР в составе ИРМ	
	кВ	шт	Мвар	шт	Мвар
10 000/10	10	6	60	6	60
10 000/35	35	4	40	4	40
25 000/35	35	11	275	5	125
25 000/110	110	31	775	10	250
63 000/110	110	1	63	-	-
25 000/220	220	2	50	1	25
63 000/220	220	1	60	-	-
63 000/220	220	7	441	1	60
100 000/220	220	20	2 000	1	100
180 000/330	330	4	720	1	180
100 000/400	400	7	700	7	700
180 000/500	500	18	3 240	-	-
<b>ИТОГО:</b>		<b>112</b>	<b>8 424</b>	<b>36</b>	<b>1 540</b>

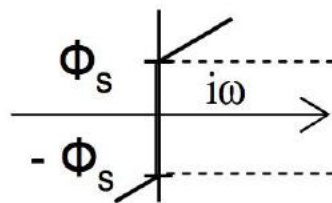


Принципиальная схема фазы:



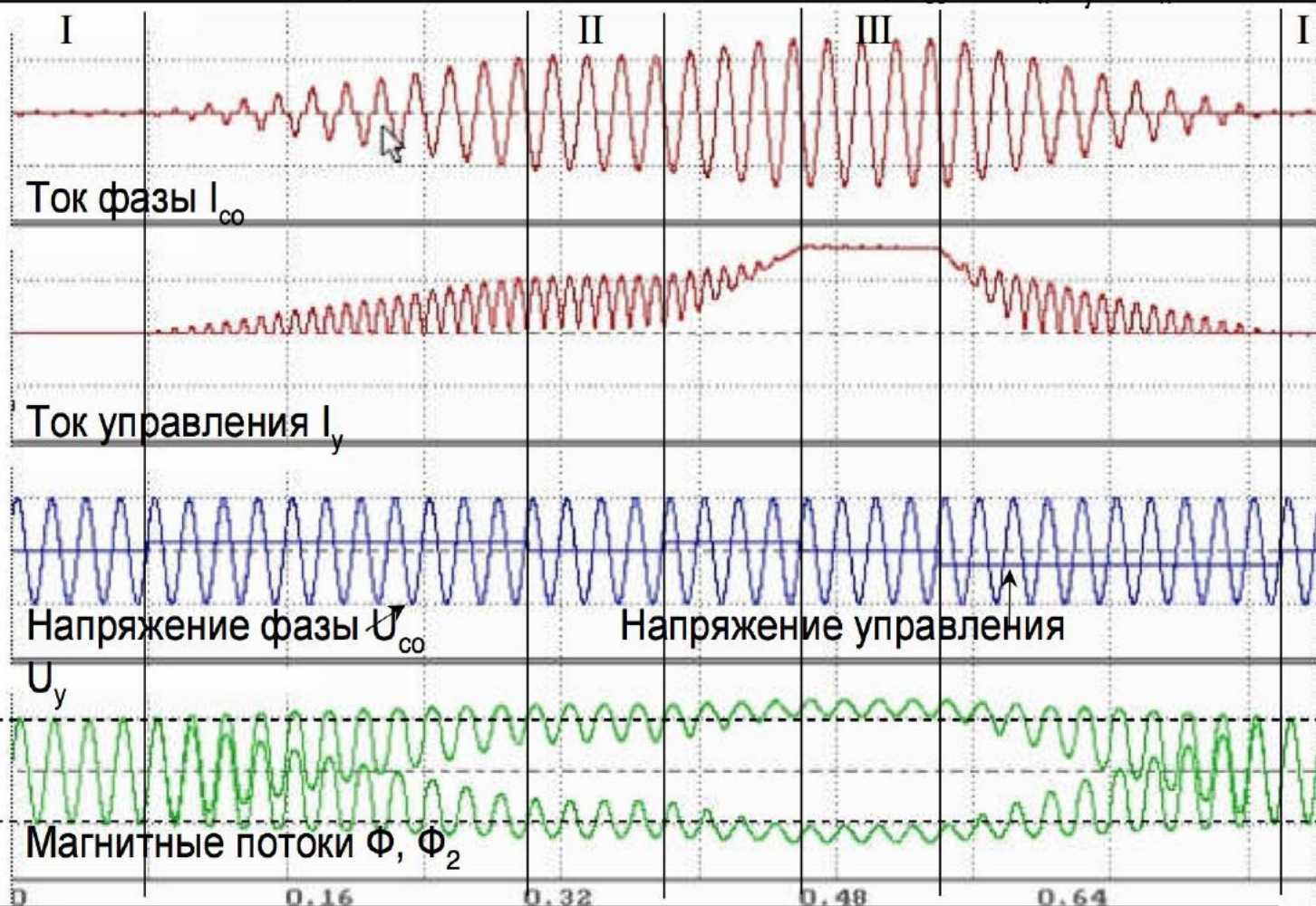
$$U_y = (0,01 \dots 0,03) U_{co}$$

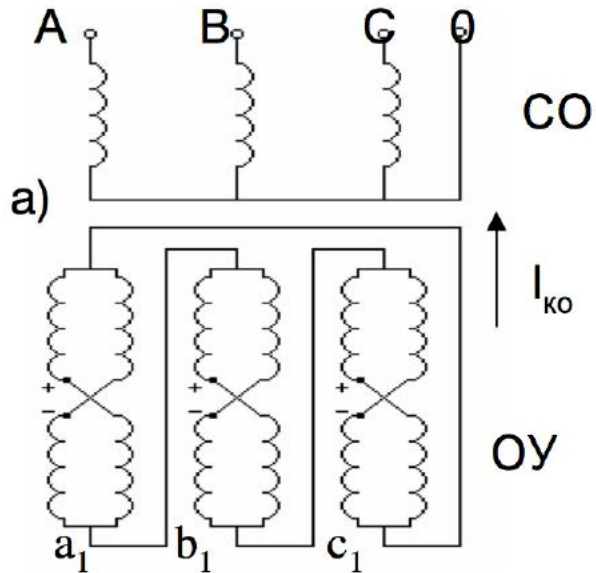
$$\tau = (0,1 \dots 1) \text{с}$$



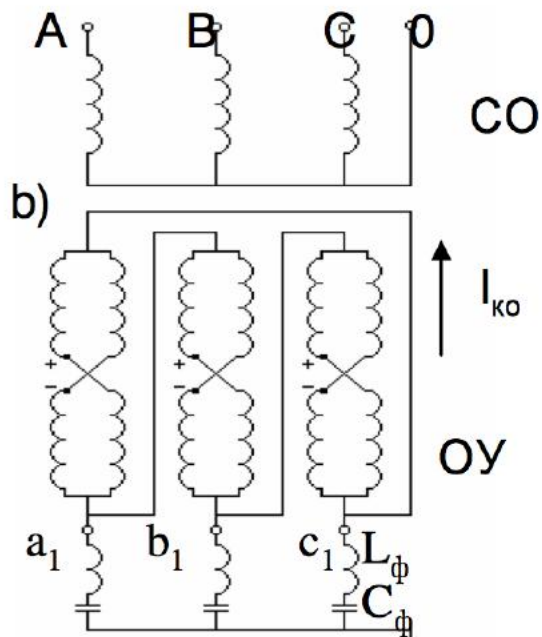
Характерные режимы:

I. Холостой ход (не насыщенный режим) $I_{co} = I_y \approx 0$	II. Номинальный режим (полупериодное насыщение) $I_{co} = I_y = I_H$	III. Максимальный режим (полнопериодное насыщение) $I_{co} = 1,3 I_H ; I_y \approx 2 I_H$
---	---	--



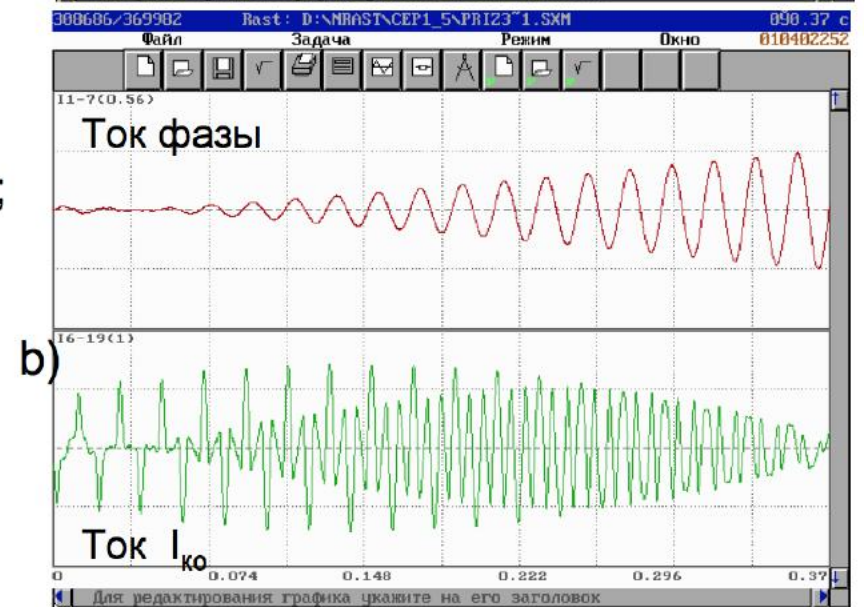
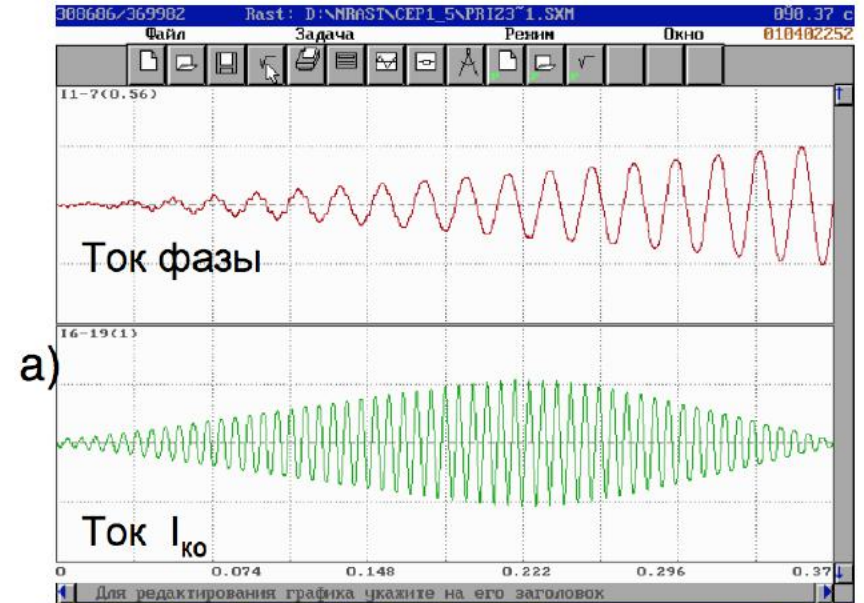


$$a) I_{иск} \leq 0,04 I_H$$



$$b) Q_{\phi} = (0,03 \dots 0,05) Q_H;$$

$$I_{иск} \leq 0,02 I_H$$





## Назначение:

Сетевые испытания: регулировочные, динамические, вибро-шумовые, коммутационные характеристики, нелинейные искажения тока, резонансные явления)

## Основные технические данные:

Номинальное напряжение	525/ $\sqrt{3}$ кВ
Номинальная мощность	60 Мвар
Диапазон изменения мощности	0,2÷81 Мвар
Время изменения мощности	0,3 с
Потери:	
- холостого хода	90 кВт
- номинальные	465 кВт
Мощность управления	1,8 МВА
Полная масса	138 т



## Заключение Заказчика «Дальние Электрпередачи»:

Опытно-промышленный образец фаза управляемого реактора РОДЦУ-60/525/ $\sqrt{3}$  успешно прошел испытания и может быть принят за прототип при создании головного образца





## Назначение:

Стабилизация напряжения в точке подключения и оптимизация перетоков реактивной мощности в прилегающей сети.

Подключен в параллель с ШКБ 42 Мвар

## Основные технические данные:

Номинальное напряжение	121 кВ
Номинальная мощность	25 Мвар
Диапазон изменения мощности	0,25÷30 Мвар
Время изменения мощности	2,0 с
Потери:	
- холостого хода	200 кВт
- номинальные	25 кВт
Мощность управления	160 КВА
Высшие гармоники	<4%
Полная масса	69 т



## Заключение Заказчика. Решение выездного семинара РАО «ЕЭС России» на месте установки:

1. Колебания напряжения ограничены до 1,5%
2. В часы максимума нагрузки потери энергии в прилегающей сети снижена до 2,5 МВт
3. За счет повышения пропускной способности транзита строительство дополнительной линии 220 кВ отнесено на 10-15 лет.



## Назначение:

Стабилизация напряжения в точке подключения и разгрузка генераторов по реактивной мощности

## Основные технические данные:

Номинальное напряжение	220 кВ
Номинальная мощность	100 Мвар
Диапазон изменения мощности	-2,5÷113 Мвар
Время изменения мощности	0,4 с
Потери:	
- холостого хода	87,7 кВт
- номинальные	558 кВт
Мощность управления	1 МВА
Высшие гармоники	<2%
Полная масса	183 т



## Заключение Заказчика. Решение НТС РАО «ЕЭС России» от 29.12.2003г:

Рекомендовать ПАО «ФСК ЕЭС» применение аналогичных управляемых реакторов в сети 110-330 кВ.



## Назначение:

Стабилизация напряжения в точке подключения, разгрузка генераторов по реактивной мощности

## Основные технические данные:

Номинальное напряжение	347 кВ
Номинальная мощность	180 Мвар
Диапазон изменения мощности	-5÷195 Мвар
Время изменения мощности	0,7 с
Потери:	
- холостого хода	138 кВт
- номинальные	753 кВт
Мощность управления	1 МВА
Высшие гармоники	<2%
Полная масса	320 т



## Заключение Заказчика. Технический совет «Белэнергосетьпроект»:

Рекомендовать «Белэнерго» применение в сети 330 кВ исключительно управляемые шунтирующие реакторы

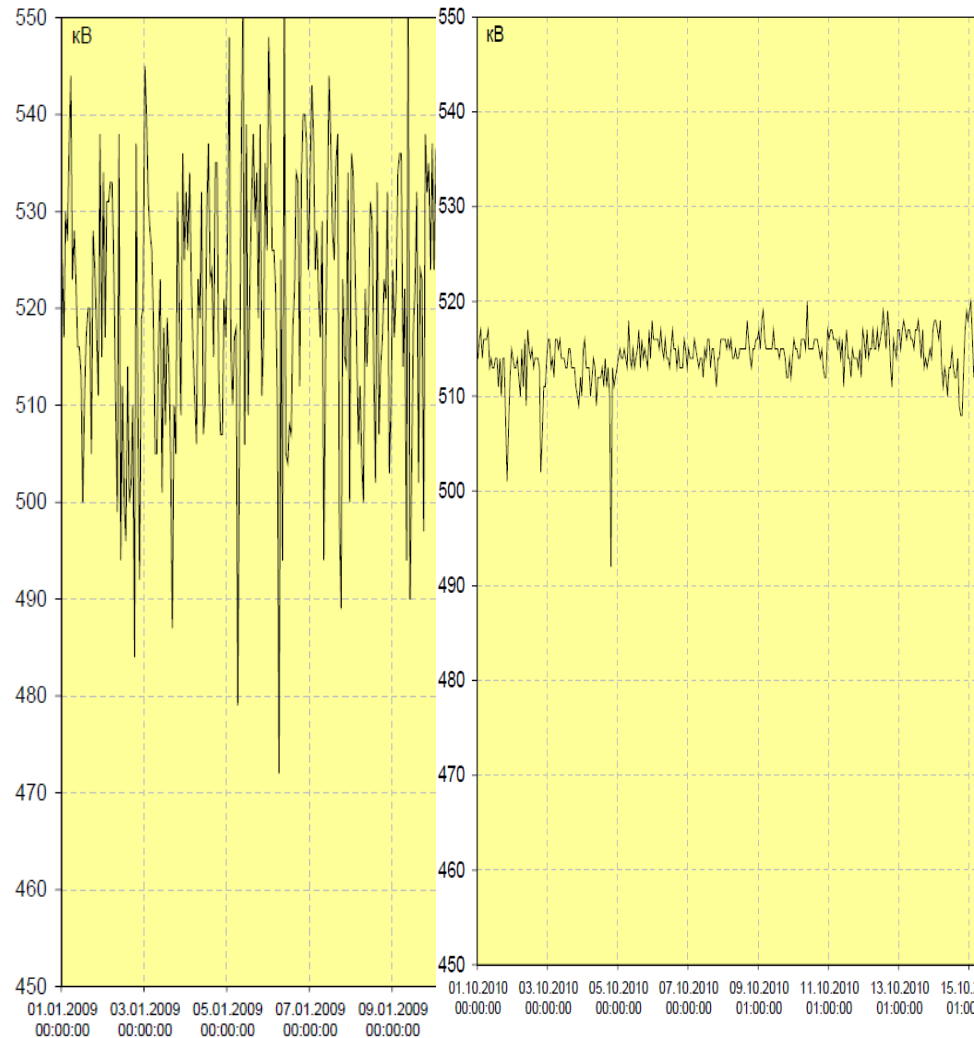


В апреле 2005 г. АО КЕГОС успешно проведено испытание инновационного оборудования в рамках реализации проекта «Строительство второй линии электропередачи 500 кВ транзита Север-Юг».

**УШР позволяют:**

- оптимизировать режимы работы электрических сетей транзита «Север-Юг Казахстана»
- снизить нормативные потери при транспортировке и распределении электроэнергии
- в десятки раз уменьшает интенсивность износа коммутационного оборудования

В рамках реализации проекта на подстанциях 500 кВ «ЮКГРЭС» и «Агадырь» было установлено 3 единицы УШР 500 кВ производства «Запорожтрансформатор».



*(без УШР)*

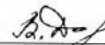

*(с внедрением УШР)*





Опыт эксплуатации первых промышленных образцов УШР положительно сказался на признании инновации одной из крупнейших электросетевых компаний – ПАО «ФСК ЕЭС».

Так, в 2004 году на серию реакторов УШР в установленном порядке дополнительно были разработаны и согласованы технические условия ТУ 3411-001-53950285-2004 «Реакторы управляемые трехфазные масляные тип РТУ мощностью от 32000 до 180000 квар классов напряжения 110, 220, 330 и 500 кВ».



ОКП 34 1127 ГР от  
Группа Е 64

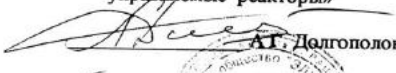

«СОГЛАСОВАНО»  
Зам. Председателя Правления  
ОАО «ФСК ЕЭС»  
  
В.В. Дорофеев  
«06»  2004 г.

«УТВЕРЖДАЮ»  
Генеральный директор  
ОАО «Электрические  
управляемые реакторы»  
  
А.М. Бранцев  
«07»  2004 г.

**РЕАКТОРЫ УПРАВЛЯЕМЫЕ ТРЕХФАЗНЫЕ МАСЛЯНЫЕ ТИПА РТУ  
МОЩНОСТЬЮ ОТ 32000 ДО 180000 КВА  
КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ 110, 220, 330 И 500 КВ**

ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ  
ТУ 3411-001-53950285-2004  
Вводятся впервые  
Срок действия:  
с 07.2004 по 07.2007 г.

«СОГЛАСОВАНО»  
Первый заместитель генерального  
директора – главный инженер  
ОАО «Институт Энергосетьпроект»  
  
А.В. Орлов  
«14»  2004 г.

«РАЗРАБОТАНО»  
Технический директор  
ОАО «Электрические  
управляемые реакторы»  
  
А.Т. Долгополов  
«5»  2004 г.

2004 г.



## ОСНОВНЫЕ:

1. Регулируется автоматически или с помощью оператора значение потребляемой мощности в диапазоне от 0,01 до 1,2 номинальной с неограниченным ресурсом возможных изменений.

2. Гарантированная скорость плавного изменения мощности от одного установившегося значения к другому 0,3÷0,5 с.

3. Действующее значение тока искажения, потребляемого из сети, во всем диапазоне регулирования не более 5% от номинального тока основной гармоники.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ:

4. Сохранение работоспособности в несимметричном и неполнофазном режимах.

5. Быстрый, не более чем за 0,02 с, переход из любого текущего значения в режим повышенного потребления мощности, с последующим возвратом в исходное состояние.

6. Корректировка формы потребляемого тока с уменьшением тока искажения до 2 % от номинального значения основной гармоники.

7. Отбор мощности на стороне низкого напряжения.



1. Основные технико-экономические показатели УШР серии РТУ 110 – 500 кВ:
  - удельная полная масса 1,5 – 3 кг/КВАр;
  - удельные потери:
    - холостого хода 0,5 – 1,0 Вт/КВАр;
    - номинальные 4 – 8 Вт/КВАр.
2. Эксплуатационные показатели:
  - полностью автоматический режим эксплуатации;
  - издержки эксплуатации, надежность, текущее обслуживание аналогично обычным шунтирующим реакторам.
3. Функциональные показатели:
  - в полном объеме выполняют функции обычных шунтирующих реакторов, ступенчато регулируемых реакторов, тиристорно-реакторных групп;
  - в сочетании с батареями конденсаторов выполняют функции синхронных или тиристорных компенсаторов.



Оборудование источники реактивной мощности (IPM) на базе УШР и БСК полностью соответствует электротехническим требованиям, признано научным сообществом и внесено в Справочник по проектированию электрических сетей (под редакцией Д.Л. Файбисовича) в качестве устройств «Стабилизации напряжения и управления перетоками реактивной мощности» с указанием номенклатуры и схем IPM для классов напряжения 6÷500 кВ.

Сегодня выпускаемые промышленно IPM являются по существу первым отечественным оборудованием для FACTS-технологии – комплекса технических и информационных средств автоматического управления параметрами линий электропередачи.

## Справочник по проектированию электрических сетей

стр. 276-280 (под редакцией Д.Л. Файбисовича)

Таблица 5.48

Источники реактивной мощности на базе управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов 6–500 кВ, фильтрокомпенсирующих устройств и батарей статических конденсаторов (БСК)

Наименование	Схема*	$U_{ном}$ , кВ**	$Q_p$ , Мвар**	QФКУ, Мвар	QБСК, Мвар***
ИРМ–6/3,6 (6,3)/3,6		6	3,6	–	3,6 (6,3)
ИРМ–6/6,3 (12,6)/6,3		6	6,3	–	6,3 (12,6)
ИРМ–6/10 (20)/10		6	10	–	10 (20)
ИРМ–10/3,6 (6,3)/3,6		10	3,6	–	3,6 (6,3)
ИРМ–10/6,3 (12,6)/6,3		10	6,3	–	6,3 (12,6)
ИРМ–10/10 (20)/10		10	10	–	10 (20)
ИРМ–35/10 (20)/10		35	10	–	10 (20)
ИРМ–35/16 (32)/16		35	16	–	16 (32)
ИРМ–35/25 (50)/25		35	25	–	25 (50)
ИРМ–110/25 (50)/25			110	25	2,5
ИРМ–110/50 (100)/50	110		50	5	50 (100)
ИРМ–220/30/100	220		100	10	30****
ИРМ–220/50 (100)/100	220		100	10	50 (100)
ИРМ–220/100 (200)/100	220		100	10	100 (200)
ИРМ–330/10/100		330	100	10	–
ИРМ–330/50/100		330	100	10	до 50****
ИРМ–330 (500)/18/180		330; 500	180	18	–
ИРМ–330 (500)/90/180		330; 500	180	18	до 90****

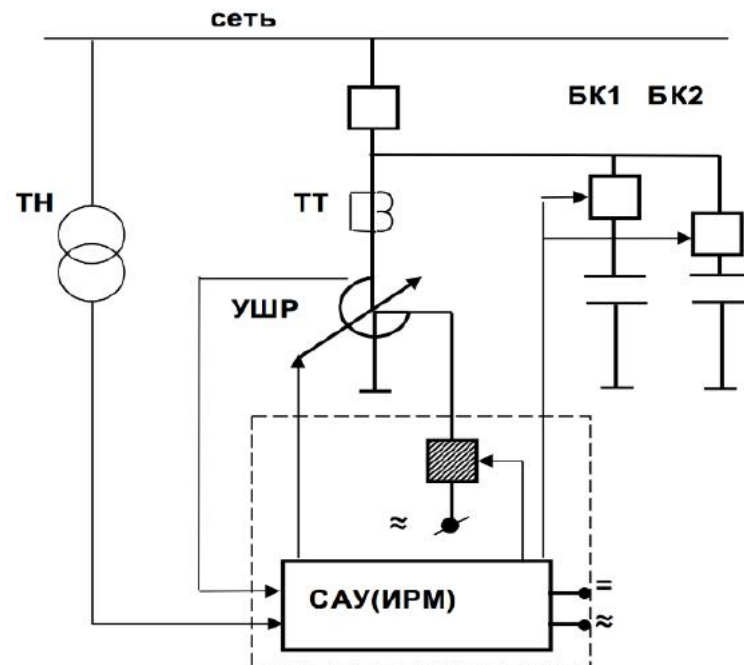
\* Возможно применение других схем IPM

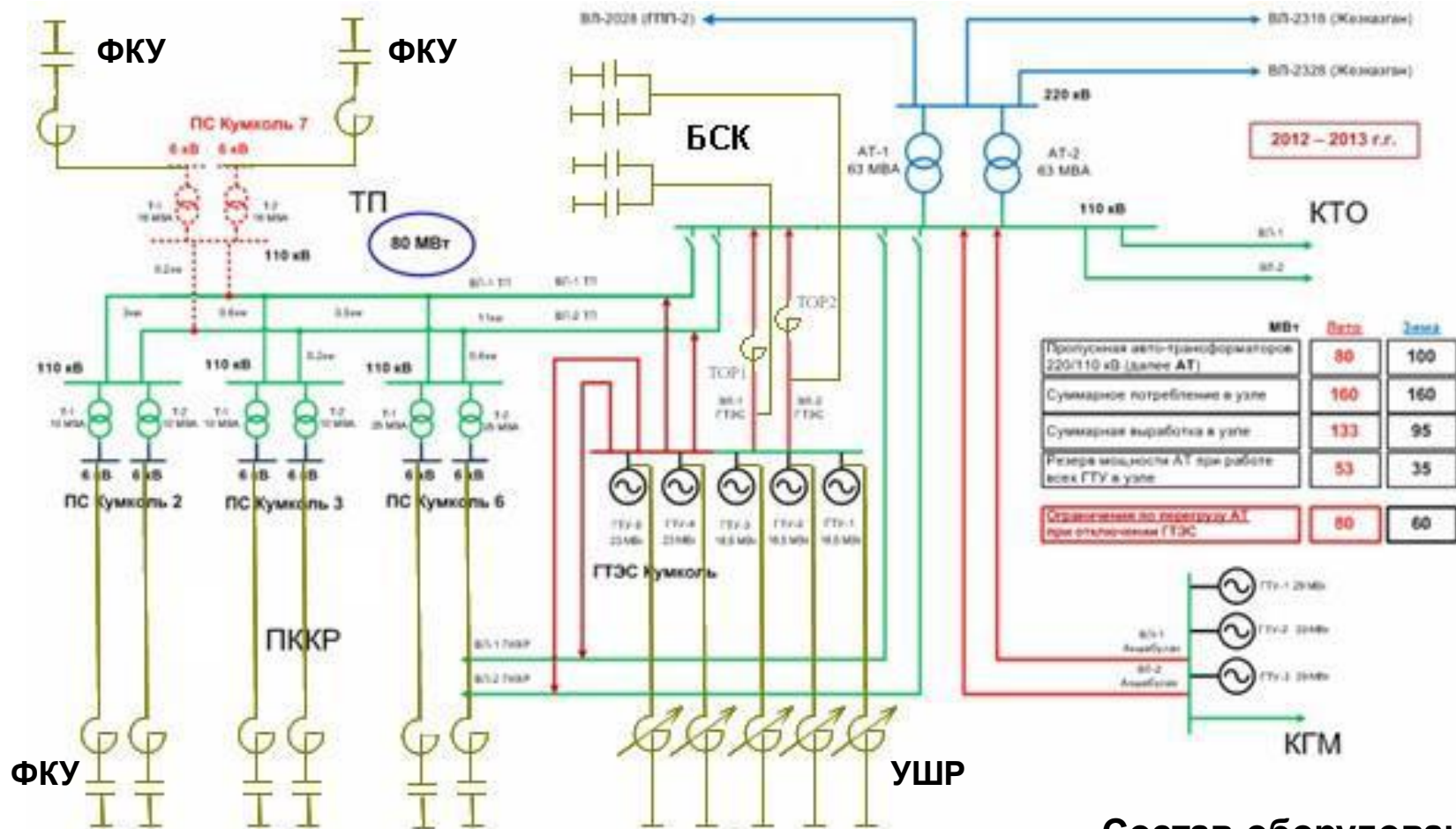




Применение ИРМ позволяет превратить электрическую сеть из «пассивного» устройства транспорта электроэнергии в **«активный»** элемент управления режимами работы и обеспечивает:

- регулирование напряжения в точке подключения в диапазоне  $\pm 15\%$  от номинального напряжения
- автоматическую стабилизацию напряжения по заданной уставке с точностью  $\pm 0,5\%$
- повышение пропускной способности прилегающей сети до 1,5 раз
- снижение удельных потерь в сети вплоть до 30%
- снижение уровня высших гармоник напряжения сети до требования ГОСТ
- снижение предпосылок развития аварий из-за локальных аварийных возмущений в сети
- устойчивую работу генераторов с оптимальным  $\cos \varphi$





**Схема компенсации реактивной мощности в электрической сети 110/11/6 кВ АО «Тургай-Петролеум»**

### Состав оборудования ИРМ:

- 5 УШР 11 кВ по 10 Мвар
- 4 БСК 110 кВ по 25 Мвар
- 8 ФКУ 6,3 кВ суммарно 32 Мвар
- 6 ТОР 110 кВ по 40 Ом



### **Без ИРМ:**

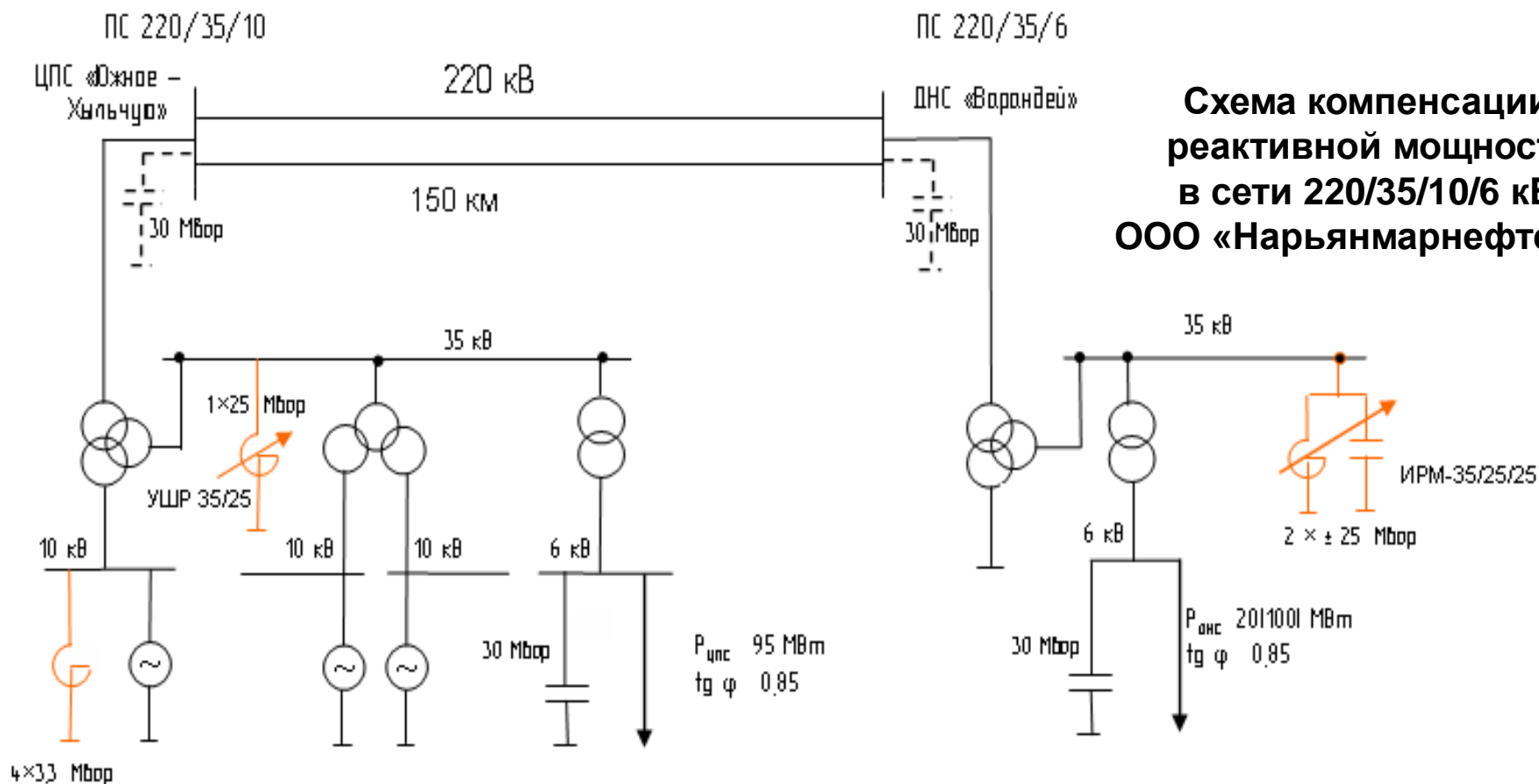
- Нарушения электроснабжения в сетях АО «КЕГОС»
- Ограничения со стороны КЕГОС из-за низкой пропускной способности АТ 220/110 кВ в ремонтный период
- Низкий уровень напряжения (105 кВ) и рост электропотребления
- Непокрытие потребности ТП и ПККР за счет собственной генерации
- Снижение добычи

### **С внедрением ИРМ:**

1. Стабилизация напряжения 110 кВ с точностью  $\pm 0,5 \%$  при колебаниях напряжения в сети 220/110 кВ до  $\pm 15\%$  от номинального
2. Устойчивость работы сети 110/6 кВ при коротких замыканиях в сети 220/110 кВ, глубоких кратковременных провалах напряжения (до 30%) и асинхронном ходе в сети 220 кВ АО «КЕГОС»
3. Обеспечение устойчивости работы ГТУ в стабильном режиме с заданным  $\cos \varphi$  (диапазон 0,98-0,9) с максимальной выработкой активной мощности
4. Повышение пропускной способности собственной сети 110/6 кВ на 25 %
5. Уменьшение потерь на 15-20 % за счет снижения  $\operatorname{tg} \varphi$  нагрузки и стабилизации напряжения шин 110 кВ
6. Исключение работы РПН трансформаторов в нормальных режимах



## Изолированная энергосистема



**Схема компенсации реактивной мощности в сети 220/35/10/6 кВ ООО «Нарьянмарнефтегаз»**

### Без ИРМ:

1. Несбалансированные перетоки реактивной мощности
2. Нестабильное электроснабжение
3. Отключения ГТУ при подключении ВЛ 220 кВ

### С внедрением ИРМ:

1. Стабилизация уровней напряжения
2. Надежное электроснабжение потребителей во всех режимах



## Основные исходные данные для разработки схемы компенсации реактивной мощности электрической сети 35/220 кВ ООО «Нарьянмарнефтегаз»

1. Общая однолинейная схема электроснабжения на напряжение 220,35,10,6 кВ (разработчик ОАО «Гипровостокнефть» - чертежи №9957-000-PSS-002\_4, №9957-000-PSS-0034) прилагается.
  2. Номинальная мощность передачи:
    - сеть 220 кВ- 20 МВт (с перспективой увеличения мощности до 100 МВт);
    - сеть 35 кВ (ЦПС + кусты) - 95 МВт.
  3. Диапазон изменения мощности в нормальных режимах от 85 МВт (летний период) до 115 МВт (зимний период), в том числе:
    - суточный 95-100%
    - недельный 98-100%
  4. Расчетный тангенс нагрузки  $\operatorname{tg} \phi = 0,85$
  5. Расчетный ремонтный режим сети 220 кВ - отключение одной из цепей 220 кВ.
  6. Послеаварийный (пусковой) режим-подключение электрической сети 35/220кВ при нулевой нагрузке.
  7. Требования к качеству напряжения в сети 35/220 кВ, обеспечиваемые средствами компенсации реактивной мощности ( при среднем положении РПН трансформаторов 220/35 и номинальном напряжении на шинах генераторов)
    - 7.1 В нормальных режимах:
      - автоматическая стабилизация напряжения 35/220 кВ в диапазоне  $(36,5 \pm 0,35 / 230 \pm 2,5)$  кВ
      - 7.2 В ремонтном режиме:
        - автоматическая стабилизация напряжения 35 кВ в диапазоне  $35 \div 36$  кВ
        - автоматическая стабилизация напряжения 220 кВ в диапазоне  $220 \div 225$  кВ
      - 7.3 В после аварийном режиме (пусковом) - автоматическая стабилизация напряжения в диапазоне  $35 \div 36$  кВ и  $220 \div 225$  кВ
      - 7.4 Гарм. состав напряжений 35/220 кВ - в соответствии с требованиями ГОСТ 131 09-97
      - 7.5 Требования к ограничению перетоков реактивной мощности: - в соответствии с приказом Минпромэнерго РФ №49 от 22.02.2007г.
      - 7.6 Во всех режимах работы сети режима нагрузки генераторов - активно-индуктивный с  $\cos \phi \leq 0,96$ .
    8. При включении трансформатора 63 МВ А 35/6 кВ толчком от шин генератора происходит останов генераторов. На данный момент с институтом отрабатывается реализация схемы синхронизации на стороне 35 кВ для плавного включения цепи генератор-трансформатор.
- Примечания:
- на сегодняшний день схема укомплектована:
    - БСК-6 кВ (кусты) - 23,7 Мвар с подключением к ячейкам ПС 35/6 кВ кустов;
    - БСК-10 кВ (ЦПС) - 3,6 Мвар с подключением к ячейкам РУ 10 кВ.
  - планируется закупка шунтирующих реакторов 3,3 Мвар 10 кВ -4шт., и 3,3 МВАР 6кВ 2шт.



**ОПЫТ применения компенсирующих устройств на ПС-110кВ. «Игольская» и «Двуреченская» для электроснабжения нефтяных месторождений ОАО «Томскнефть» (Октябрь 2004г.- март 2005г.)**

1. К исходу 2003года на нефтяных месторождениях Южного Васюгана ОАО «Томскнефть» возникла кризисная ситуация. **Пропускная способность** электропередачи 110 кВ «Парабель-Лугинецкая-Игольская-Крапивинская» была исчерпана, а уровни напряжения на ПС-110 «Крапивинская» **не превышали 85 % номинального.**

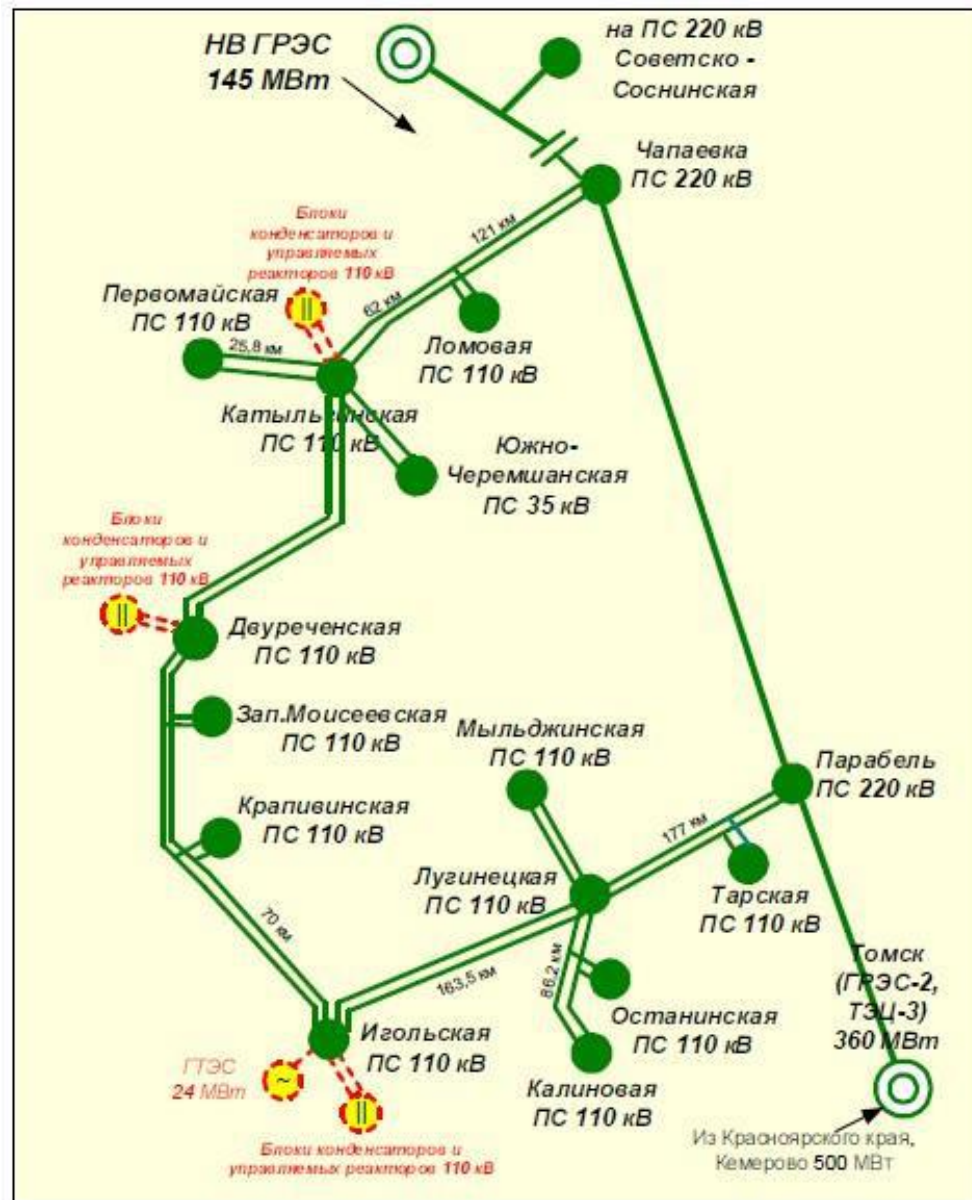
2. И только в августе-октябре 2004года после ввода на ПС-110 «Игольская» батареи статических конденсаторов (БСК) 23МВАР, управляемого шунтирующего реактора (УШР) 25МВАР и ПС-110 «Двуреченская» с БСК-23 и УШР-25 ситуация изменилась коренным образом в лучшую сторону. **Пропускная способность выросла на 30-50% , уровни напряжения достигли 105-110% номинального и могут регулироваться в широком диапазоне в зависимости от режимов.**

3. Даже непродолжительный период эксплуатации реакторов РТУ- 25000/110-У1 позволяет отметить, что реакторы совместно с батареями статических конденсаторов:

**3.1. Обеспечивают оптимальные потоки реактивной мощности позволяющие довести передаваемую мощность до предельно допустимой по сечению проводов.** По состоянию нагрузок на март 2005г обеспечивается 100% взаимное резервирование эл.нагрузок электропередачи «Парабель - Двуреченская - Чапаевка»(Таблица 3). Необходимость перевода региона на напряжение 220кВ потеряло свою актуальность.

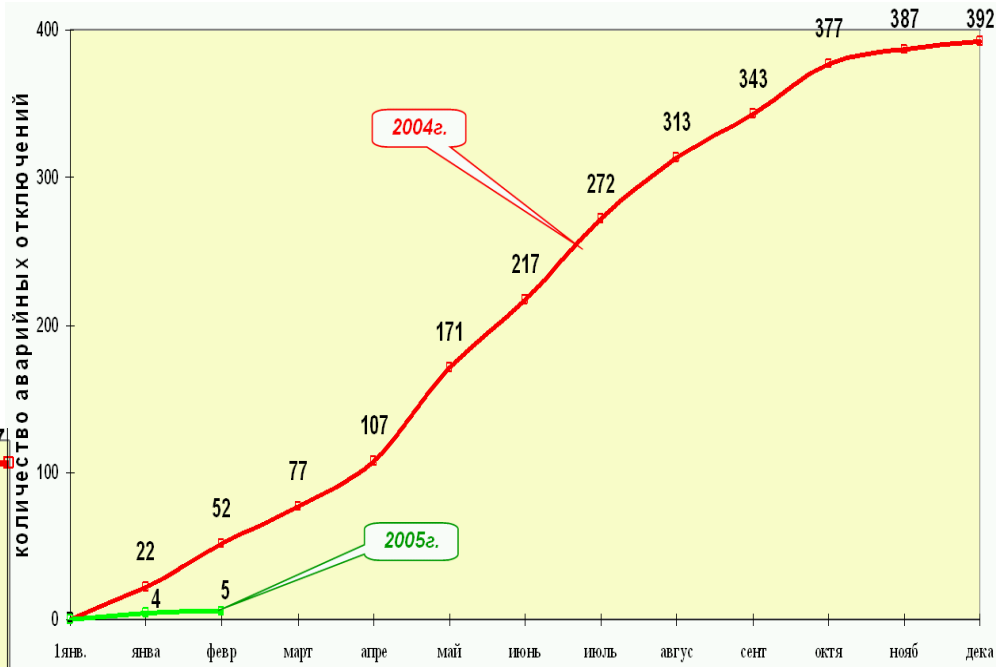
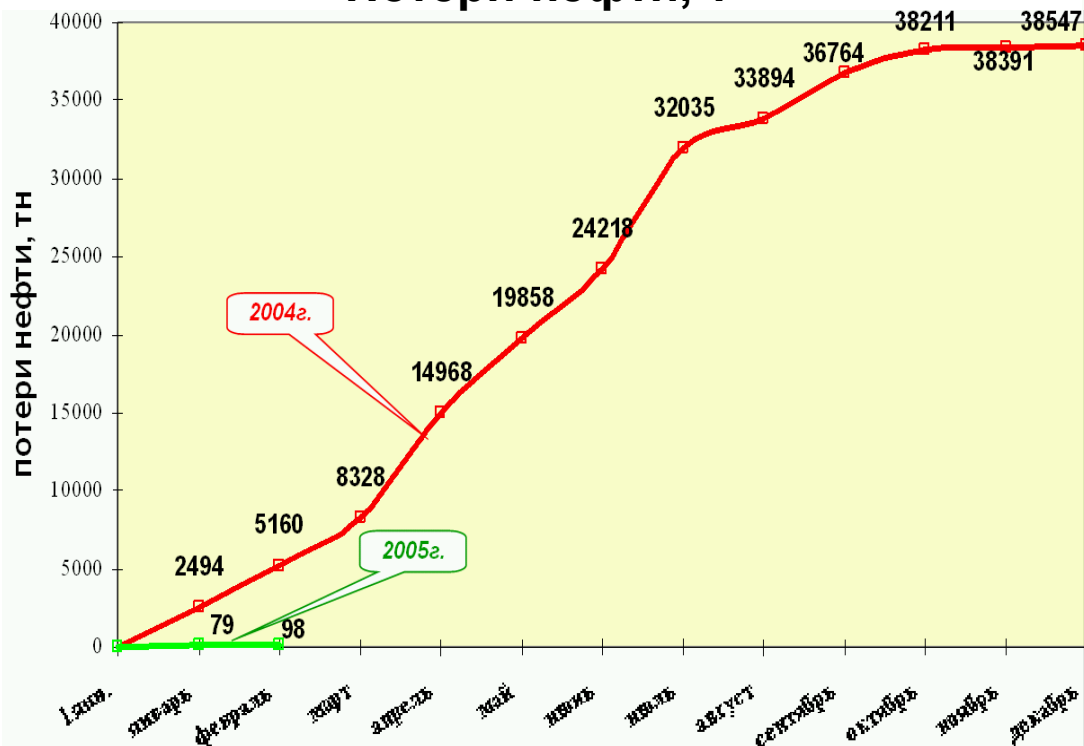
**3.2. Снижают потери активной мощности** в проводах ВЛ-110кВ. При нагрузке 72 МВт потери составляют 7,5 МВт против 11,9 МВт, в том числе в сетях ООО «ЭнергонефтьТомск» 1.8 МВт против 2,9 МВт.

**3.3. Обеспечивают плавную автоматическую стабилизацию заданных уровней напряжения в установившихся режимах,** при сокращении числа коммутаций БСК и РПН в десятки раз.





### Потери нефти, т



### Количество аварийных отключений