

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

**Управление нормальными режимами
энергосистем и электрических сетей**

Общие положения

Нормальный режим работы энергосистемы - режим, при котором обеспечивается электроснабжение всех потребителей и качество электрической энергии (качество частоты и напряжения в установленных пределах). К основным параметрам нормального режима относятся:

- частота переменного тока в системе;
- напряжения, токи, величины активной и реактивной мощности в узлах энергосистемы;
- токи, перетоки активной и реактивной мощности в ветвях схемы сети (в линиях и трансформаторах);
- активная и реактивная мощность электростанций;
- реактивная мощность компенсирующих устройств.

Общие положения

Управление *напряжением и реактивной мощностью*:

- поддержание напряжения у электроприемников в соответствии с нормами качества электроэнергии;
- обеспечение экономичности режима электрической сети с учетом технических ограничений по ее элементам;

Управление *частотой и активной мощностью*:

- регулирование частоты с целью поддержания номинальной частоты;
- обеспечение экономичности режима за счет оптимального распределения активной мощности между электростанциями системы и между агрегатами внутри электростанций;
- обеспечение надежности путем ограничения перетоков мощности;

Общие положения

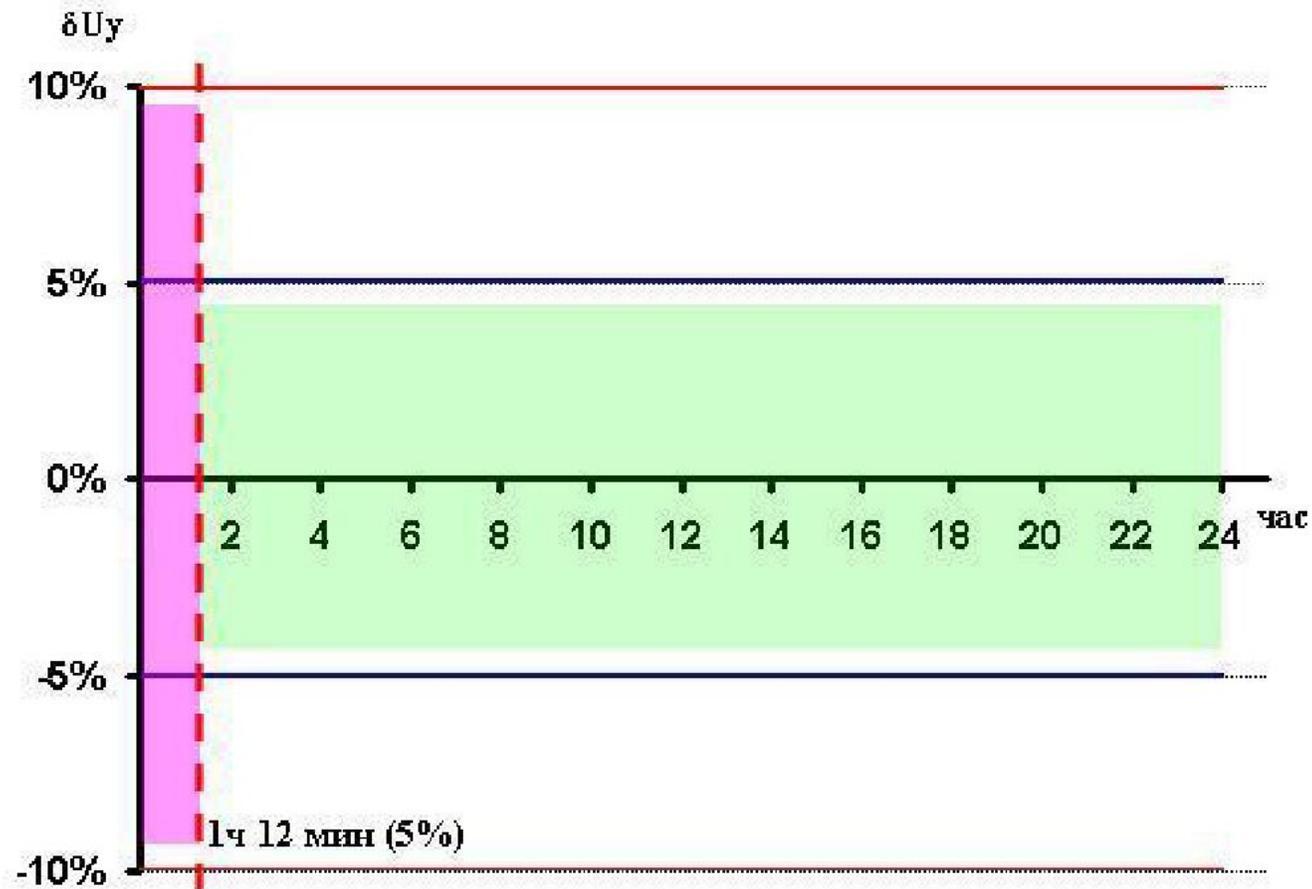
Управление режимами для обеспечения **системной надежности**:

- оперативный контроль параметров режима (перетоков активной мощности, напряжений в основных узлах системы) и принятие мер в случае выхода их за пределы, допустимые по условию надежности;
- оценка ожидаемых ремонтных и возможных аварийных режимов, принятие мер по корректировке режима, изменению схемы сети, состава включенного оборудования для предотвращения возможных недопустимых послеаварийных режимов;
- обеспечение оперативного резерва мощности;
- автоматическое ограничение перетоков мощности по транзитным и межсистемным линиям электропередачи.



РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Требования к качеству напряжения



Примечание: 1 ч 12 мин (5%) - интегральная продолжительность по времени в сутках, когда отклонение напряжения превышает допустимое ($\pm 5\%$), но не превышает предельно допустимое ($\pm 10\%$).

Баланс реактивной мощности в энергосистеме



$$Q_{Г} + Q_{зар} + Q_{СК} + Q_{БСК} + Q_{пер}^{+} = Q_{Н} + Q_{ШР} + \Delta Q + Q_{пер}^{-} .$$

- Составляющие левой части уравнения баланса (генерация):

$Q_{Г}$ - реактивная мощность генераторов электрических станций;

$Q_{зар} = b_{с} \cdot U^2$ - зарядная мощность линий электропередачи;

$Q_{СК}$ - реактивная мощность синхронных компенсаторов или генераторов работающих в режиме СК;

$Q_{БСК} = b_{БСК} \cdot U^2$ - реактивная мощность батарей статических конденсаторов;

$Q_{пер}^{+}$ - перетоки реактивных мощностей из смежных энергосистем;

- Составляющие правой части уравнения баланса (нагрузка):

$Q_{Н}$ - реактивная мощность потребителей, в том числе и собственные нужды электрических станций и подстанций;

$Q_{ШР} = b_{ШР} \cdot U^2$ - реактивная мощность, потребляемая шунтирующими реакторами;

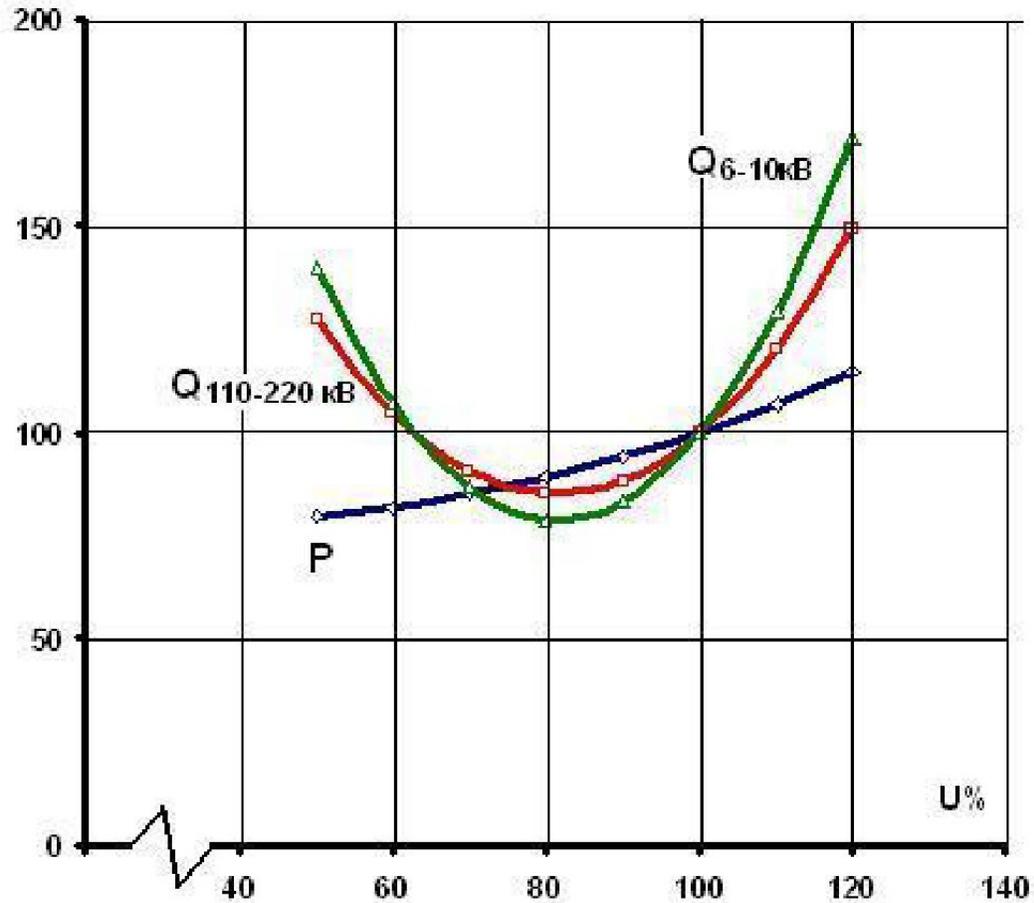
потери реактивной мощности в элементах электрической сети –

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U^2}$$

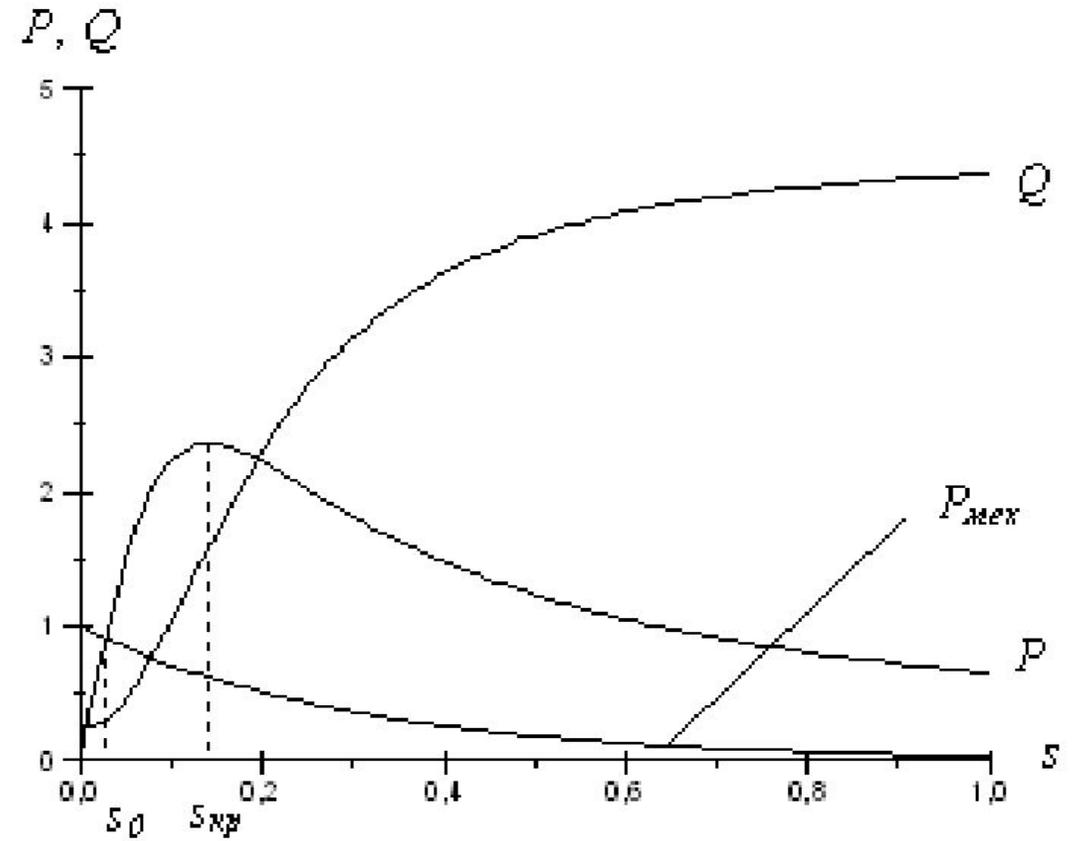
$Q_{пер}^{-}$ – перетоки реактивных мощностей в смежные энергосистемы.

Статические характеристики нагрузки

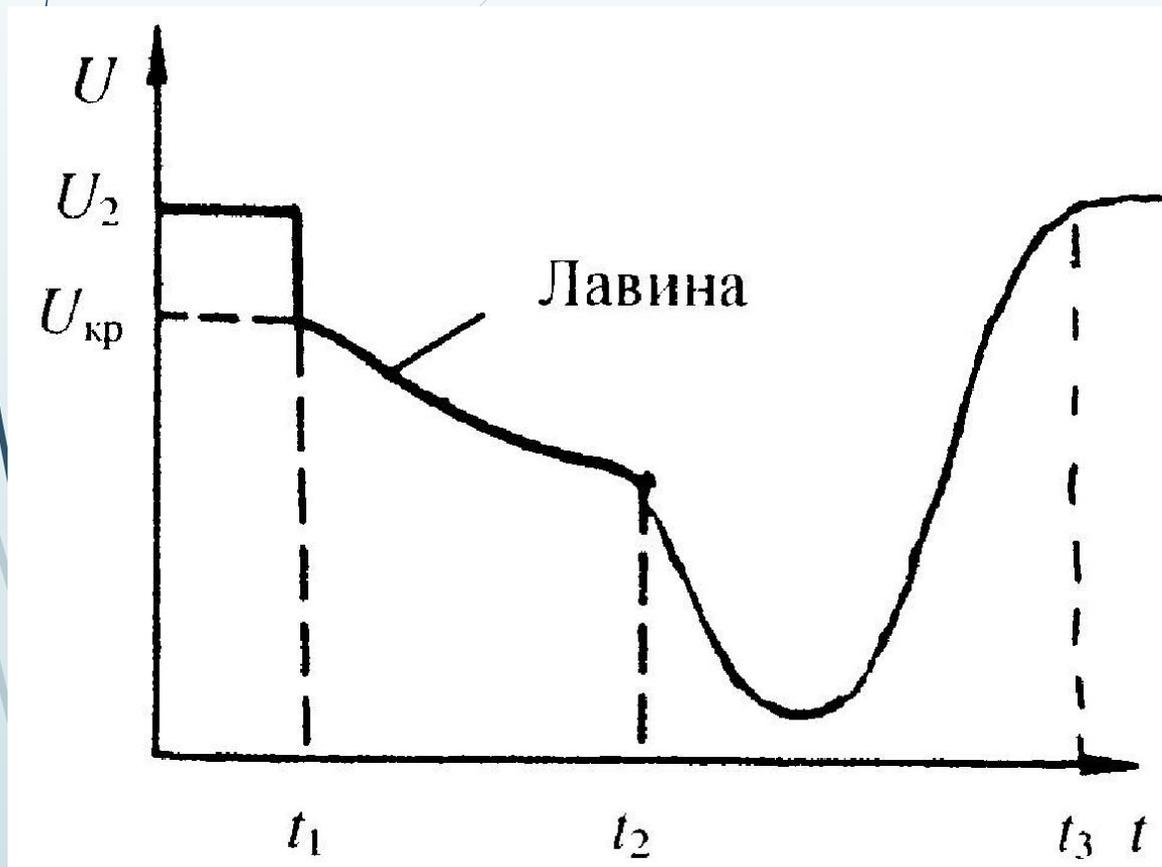
Статические характеристики смешанной нагрузки крупного узла энергосистемы $P, Q\%$



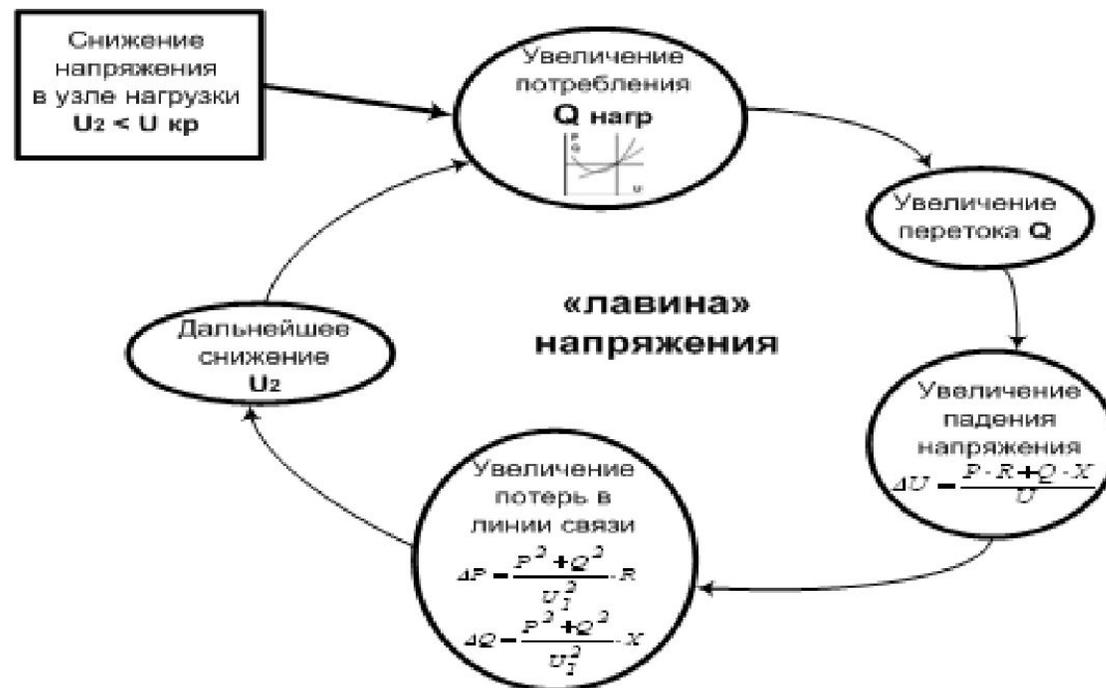
Характеристики мощности АД



«Лавина напряжения»



Динамика развития «лавина» напряжения



Мониторинг уровней напряжения

Соединение Экспорт Помощь										
С		По		Отчет по:		Класс напряжения		Показать		
10.07.2009		14.07.2009		часам						
Класс	Энергообъект	ТИ	Наименование ТИ	Час	ВПП	ВАП	Umax, кВ	НПП	НАП	Umin, кВ
Нарушения за период 10.07.2009 - 14.07.2009 по классам напряжения 110 кВ, 150 кВ, 220 кВ, 330 кВ, 400 кВ, 500 кВ, 750 кВ, 800 кВ, 1150										
РУ -110- ГЭС-2 ОРУ-110										
110 кВ	СШ -I ГЭС-2 110 кВ				00:29:00	00:14:00	114	00:00:00	00:00:00	109
		ТИ52	ГЭС-2 U110 I cш (52) U	10.7.2009 14:00 - 14:59	00:06:00	00:03:00	114	00:00:00	00:00:00	112
				11.7.2009 16:00 - 16:59	00:08:00	00:08:00	112	00:00:00	00:00:00	109
				12.7.2009 19:00 - 19:59	00:12:00	00:02:00	114	00:00:00	00:00:00	112
				13.7.2009 19:00 - 19:59	00:03:00	00:01:00	113	00:00:00	00:00:00	110
РУ -110- НГРЭС ЗРУ-110										
110 кВ	СШ -I НГРЭС 110 кВ				00:24:00	00:18:00	120	00:00:00	00:00:00	113
		ТИ158	НГРЭС U110 I cш (158) U	10.7.2009 14:00 - 14:59	00:05:00	00:05:00	117	00:00:00	00:00:00	115
				10.7.2009 16:00 - 16:59	00:08:00	00:07:00	114	00:00:00	00:00:00	113
				10.7.2009 19:00 - 19:59	00:06:00	00:02:00	115	00:00:00	00:00:00	113
				10.7.2009 21:00 - 21:59	00:02:00	00:01:00	117	00:00:00	00:00:00	116
				11.7.2009 01:00 - 01:59	00:03:00	00:03:00	120	00:00:00	00:00:00	118
РУ -330- Машук ОРУ-330										
330 кВ	СШ -II Машук				00:05:00	00:02:00	335	00:00:00	00:00:00	328
		ТИ84	Машук-330 U330 Л-330-04 Uаб	14.7.2009 16:00 - 16:59	00:05:00	00:02:00	335	00:00:00	00:00:00	328

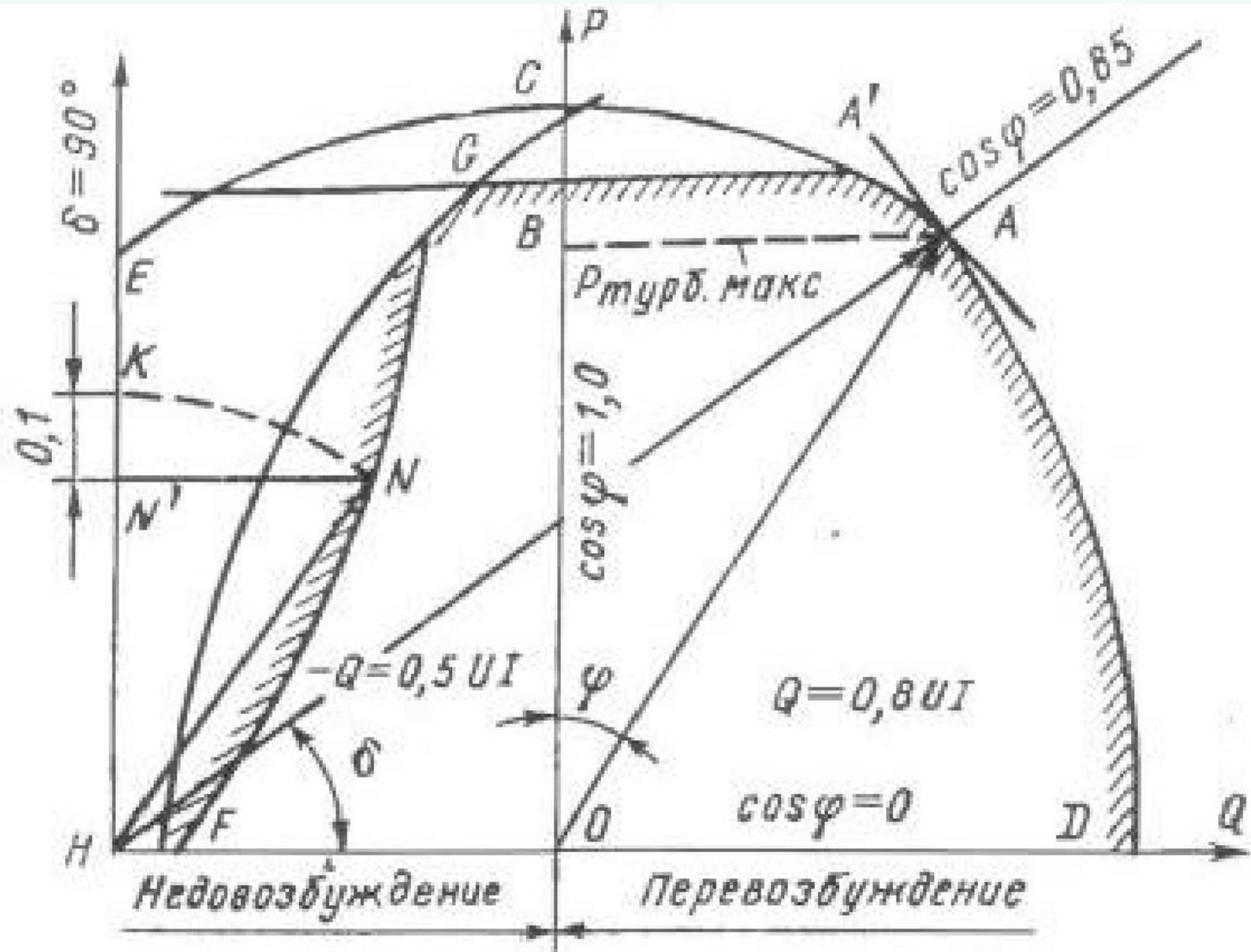
Мониторинг уровней напряжения

Фильтр по классу напряжения: Все <input type="button" value="v"/> кВ		Фильтр по статусу: Показывать все <input type="button" value="v"/>		<input type="checkbox"/> Время с датой	
Контрольная точка	Класс	Утек	Отдых изоляции	Нарушения	
+ ТЭС Тестовая-2 500кВ(I2118)	500	600	00:00:00 / 00:00:10	↑!5 (600-627) Авария	00:39:21 с 14.05.2010 10:40
+ ТЭС Тестовая-4 110кВ(I2114)	110	146	00:00:00 / 00:00:00	↑!7 (145) Авария	00:39:41 с 14.05.2010 10:40
+ ТЭС Тестовая-2 500кВ(I2119)	500	626	00:00:12 / 00:00:20	↑!4 (586-600) Превышение	00:25:39 / 00:00:30 с 14.05.2010 10:40
+ ГЭС Тестовая-1 330кВ(I2117)	330	380	00:00:02 / 00:00:10	↑!6 (414-432) Превышение	00:00:09 / 00:00:10 с 14.05.2010 11:20
+ ТЭЦ Тестовая-3 750кВ(I2120)	750	750	00:00:00 / 00:00:30	↑!2 (830-850) Превышение	00:00:38 / 00:00:50 с 14.05.2010 11:19
- ТЭС Тестовая-4 110кВ(I2115)	110	135	00:00:00 / 00:00:00	↑ 7 (145) ОК	00:00:00 / 00:00:00
			00:00:00 / 00:00:10	↑ 6 (139-145) ОК	00:00:00 / 00:00:10
			00:00:00 / 00:00:10	↑ 5 (133-139) ОК	00:00:00 / 00:00:20
			00:00:00 / 00:00:20	↑ 4 (130-133) ОК	00:00:00 / 00:00:30
			00:00:03 / 00:00:30	↑!3 (127-130) Превышение	00:00:10 / 00:00:40 с 14.05.2010 11:19
			00:00:03 / 00:00:30	↑ 2 (124-127) Превышение	00:00:15 / 00:00:50 с 14.05.2010 11:19
			00:00:03 / 00:00:30	↑ 1 (121-124) Превышение	00:00:15 / 00:01:00 с 14.05.2010 11:19
- ГЭС Тестовая-1 330кВ(I2116)	330	330	00:00:00 / 00:00:00	↑ 7 (432) ОК	00:00:00 / 00:00:00
			00:00:00 / 00:00:10	↑ 6 (414-432) ОК	00:00:00 / 00:00:10
			00:00:00 / 00:00:10	↑ 5 (396-414) ОК	00:00:00 / 00:00:20
			00:00:00 / 00:00:20	↑ 4 (387-396) ОК	00:00:00 / 00:00:30
			00:00:00 / 00:00:30	↑!3 (378-387) Превышение	00:00:15 / 00:00:40 с 14.05.2010 11:20
			00:00:00 / 00:00:30	↑ 2 (369-378) Превышение	00:00:15 / 00:00:50 с 14.05.2010 11:20
			00:00:00 / 00:00:30	↑ 1 (360-369) Превышение	00:00:15 / 00:01:00 с 14.05.2010 11:20
+ ТЭЦ Тестовая-3 750кВ(I2121)	750	750	00:00:00 / 00:00:30	↑ 1 (810-830) ОК	00:00:00 / 00:01:00

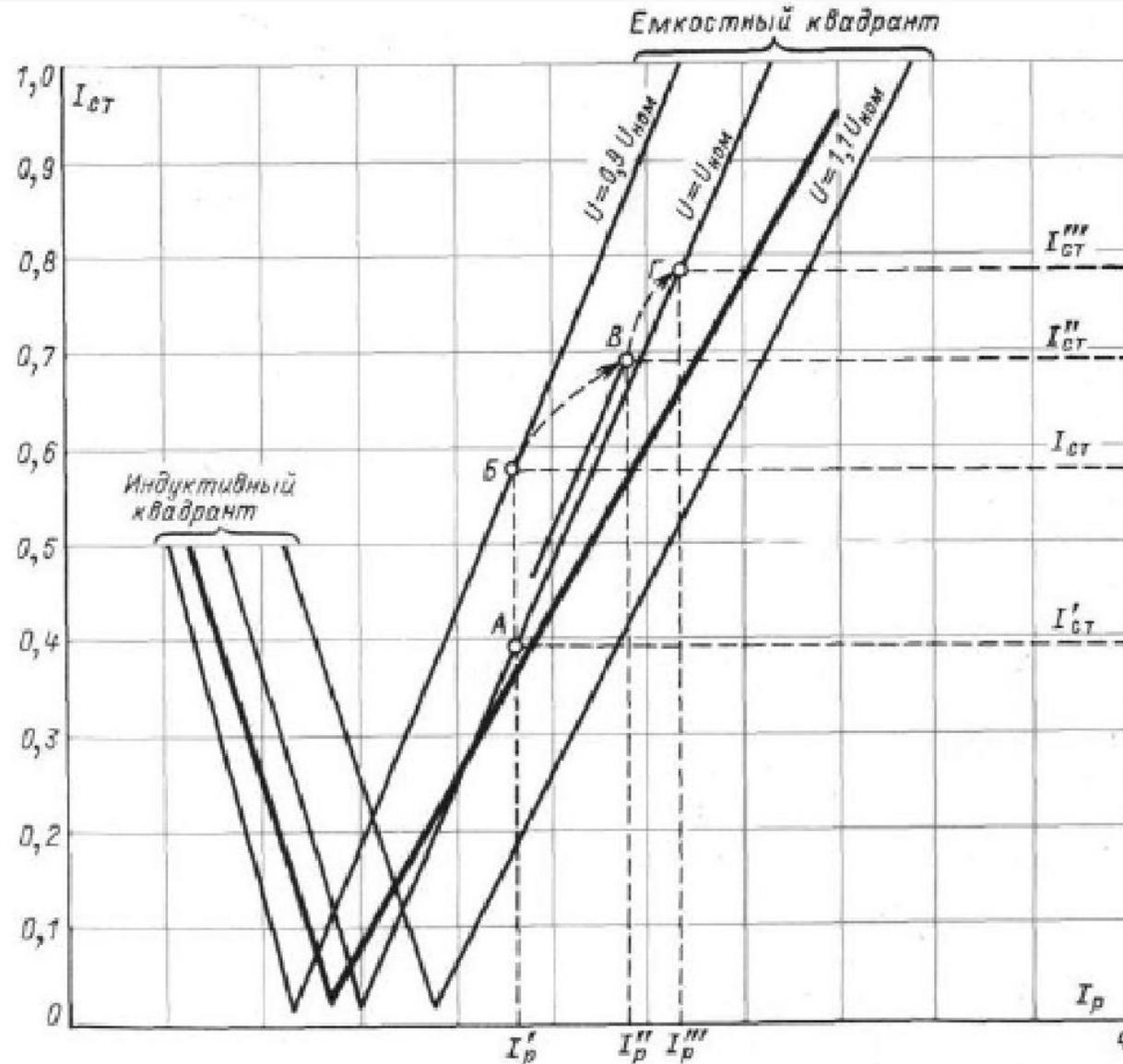


Средства регулирования напряжения в энергосистеме

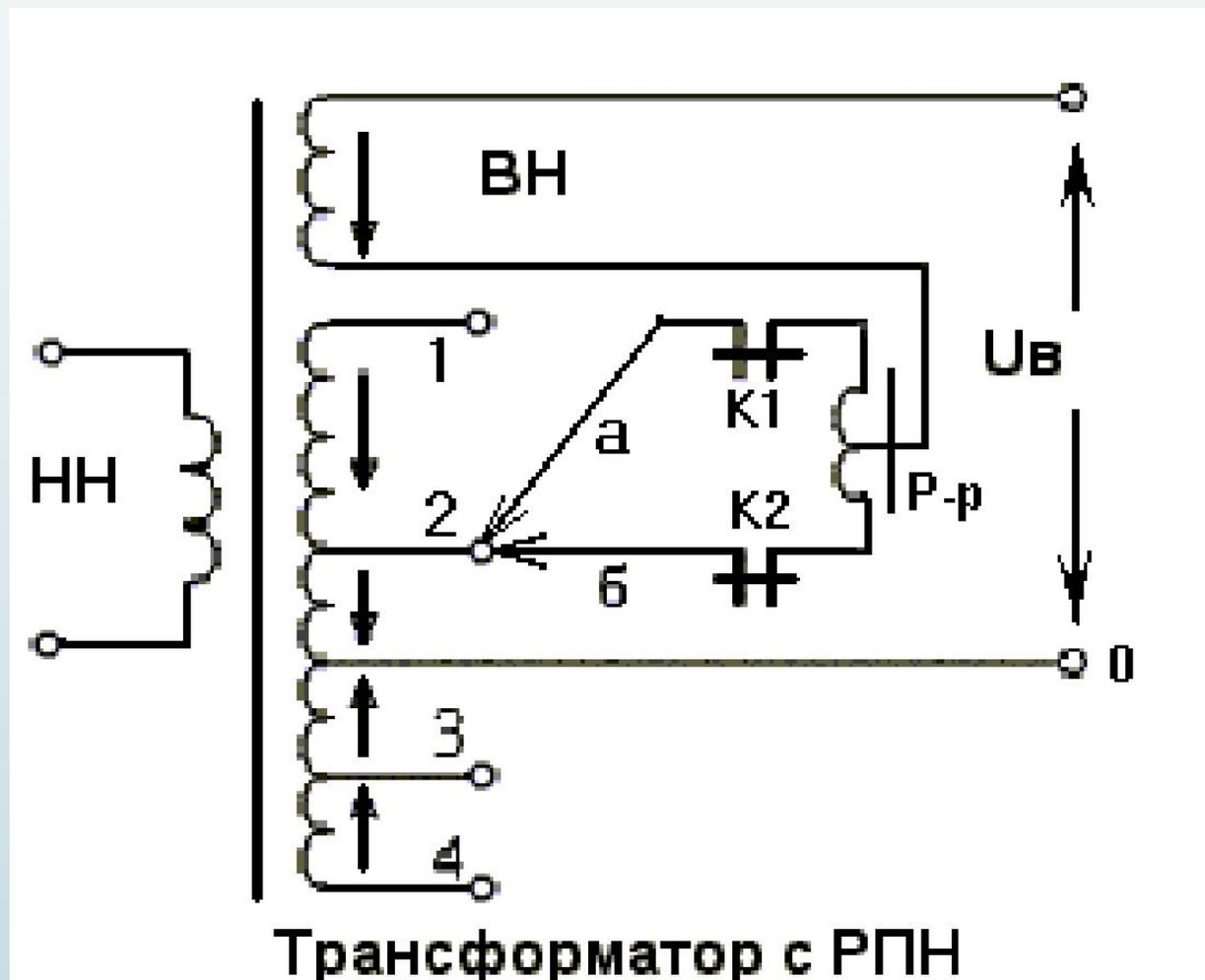
Традиционные средства регулирования напряжения. Регулирование возбуждения генераторов



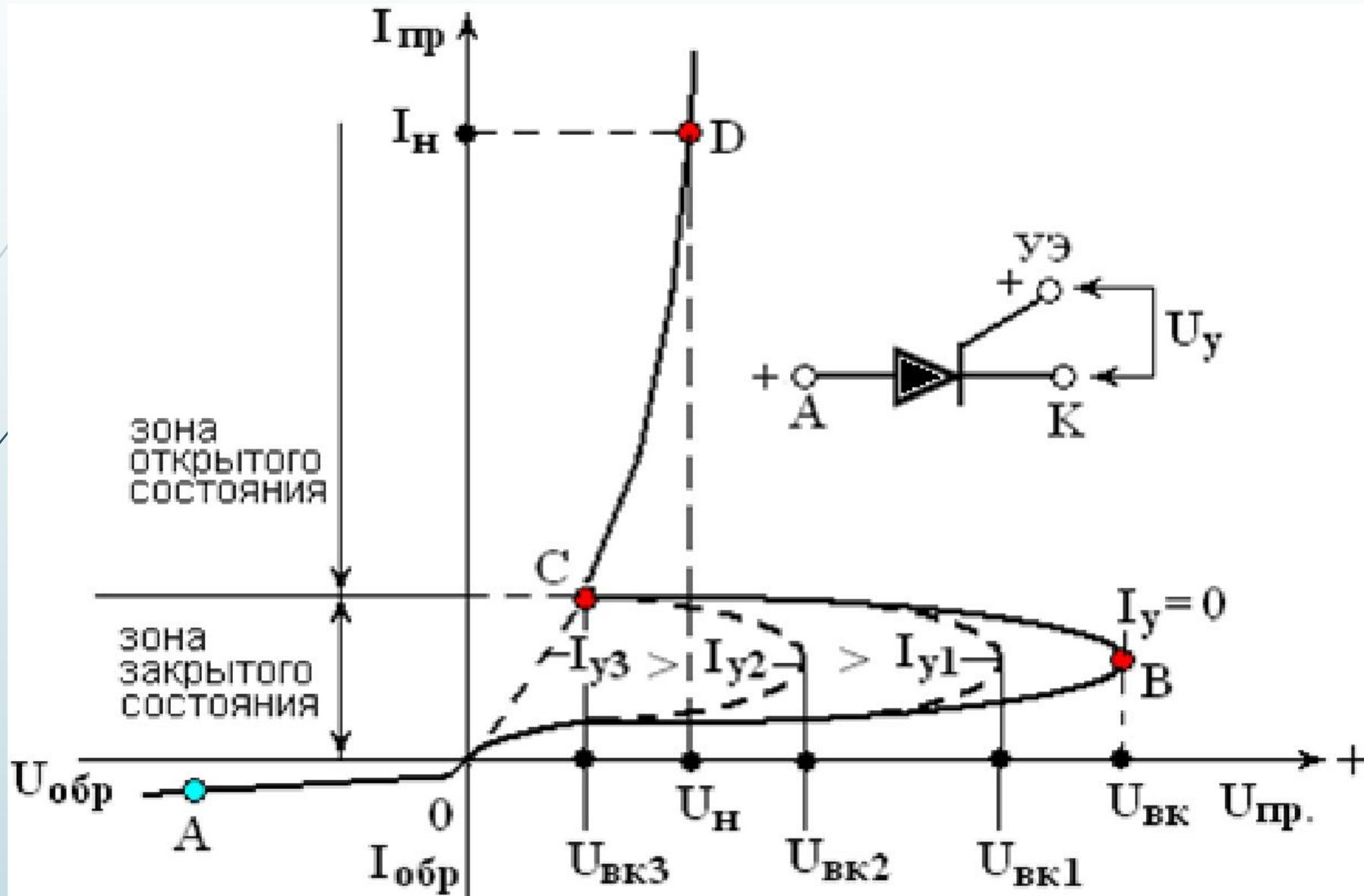
Традиционные средства регулирования напряжения. Регулирование возбуждения синхронных компенсаторов



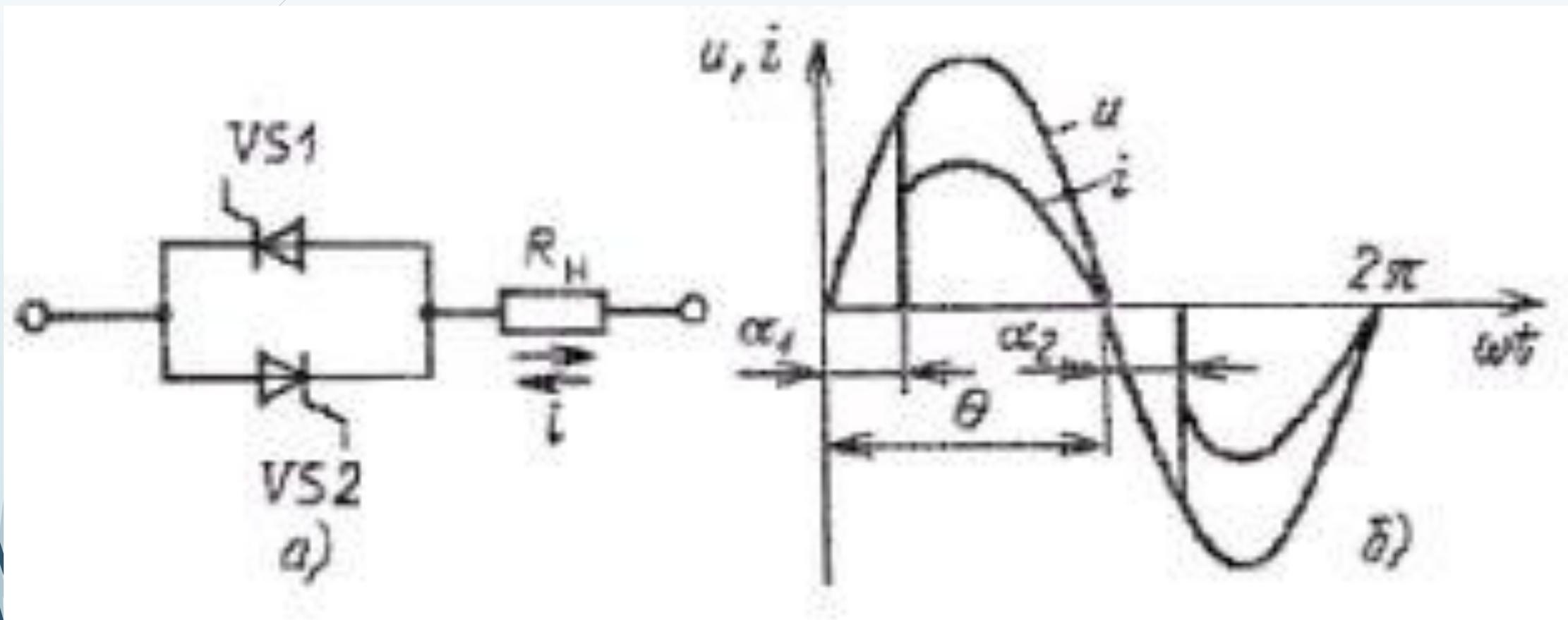
Традиционные средства регулирования напряжения. Переклю́чение отпаек трансформаторов и автотрансформаторов



Принцип действия тиристора



Тиристор в цепи переменного тока



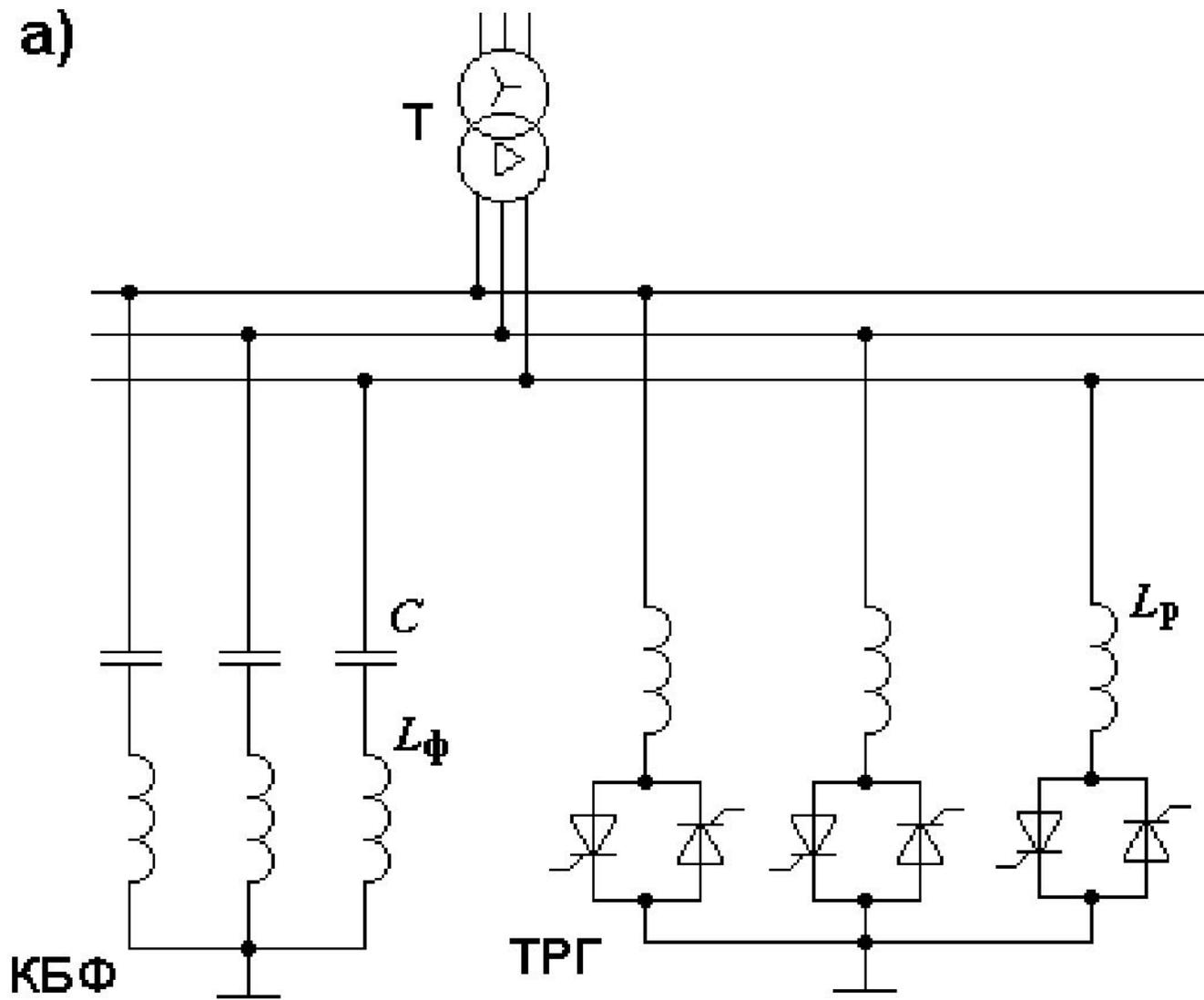
Flexible Alternate Current Transmission System (FACTS). ***Гибкие системы электропередачи переменного тока***

Термин и понятие *FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System* – гибкие управляемые системы электропередачи переменного тока) введены в обращение Институтом электроэнергетики *EPRI* (США).

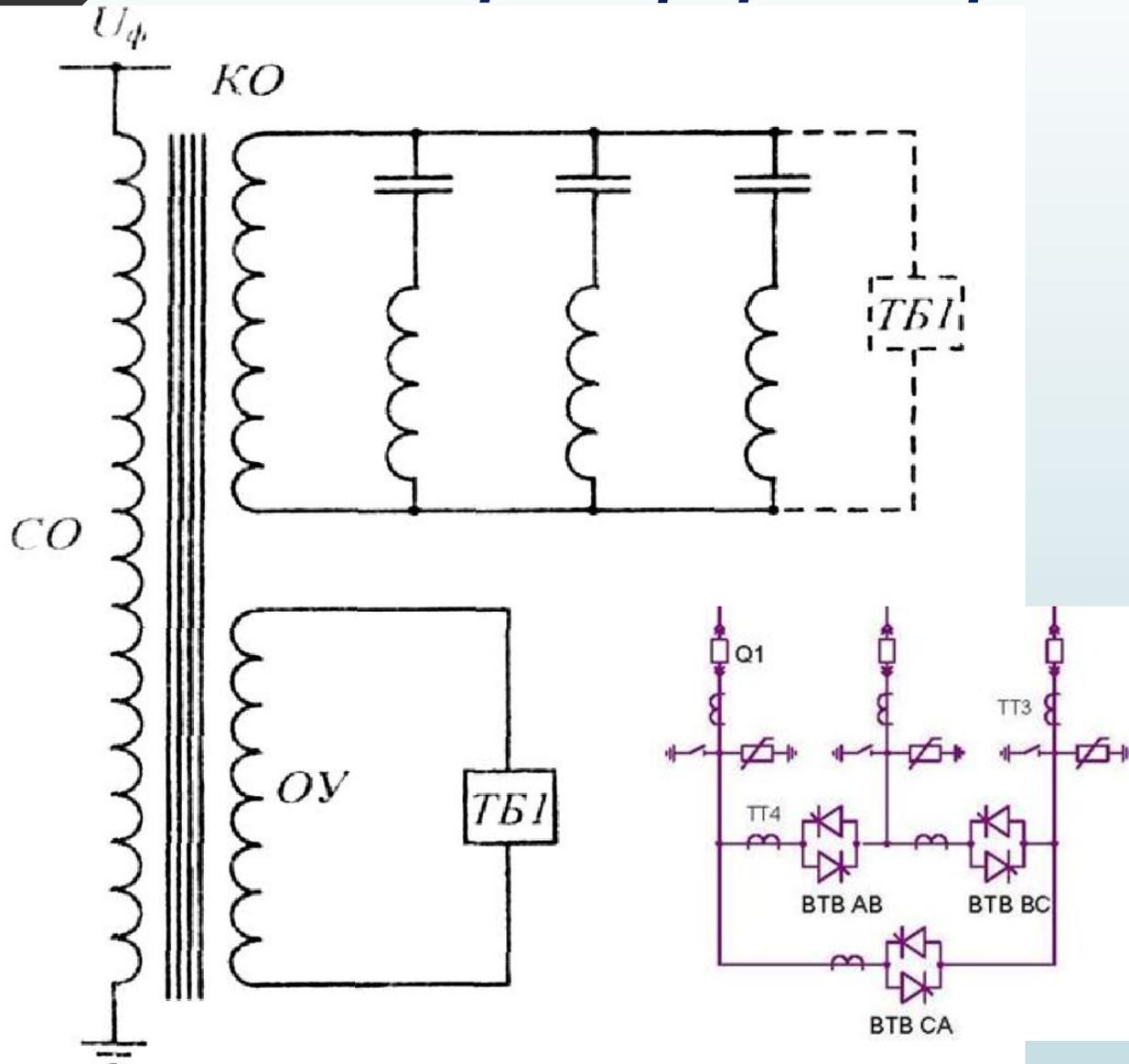
FACTS является одной из наиболее перспективных электросетевых технологий, которая позволяет электрическую сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии превратить в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей.

- устройства поперечного включения (СТК, СТАТКОМ, УШР);
- устройства продольного включения (ФПУ, ПСТАТКОМ);
- передачи и вставки постоянного тока (ВПТ, ППТ);
- объединенный регулятор перетока мощности (ОРПМ)..

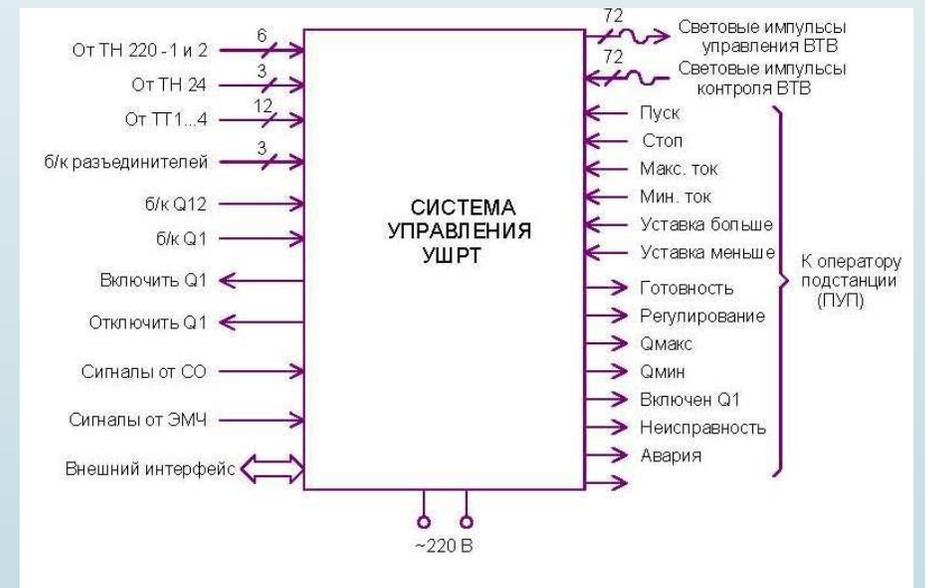
FACTS. Статический тиристорный компенсатор (СТК)



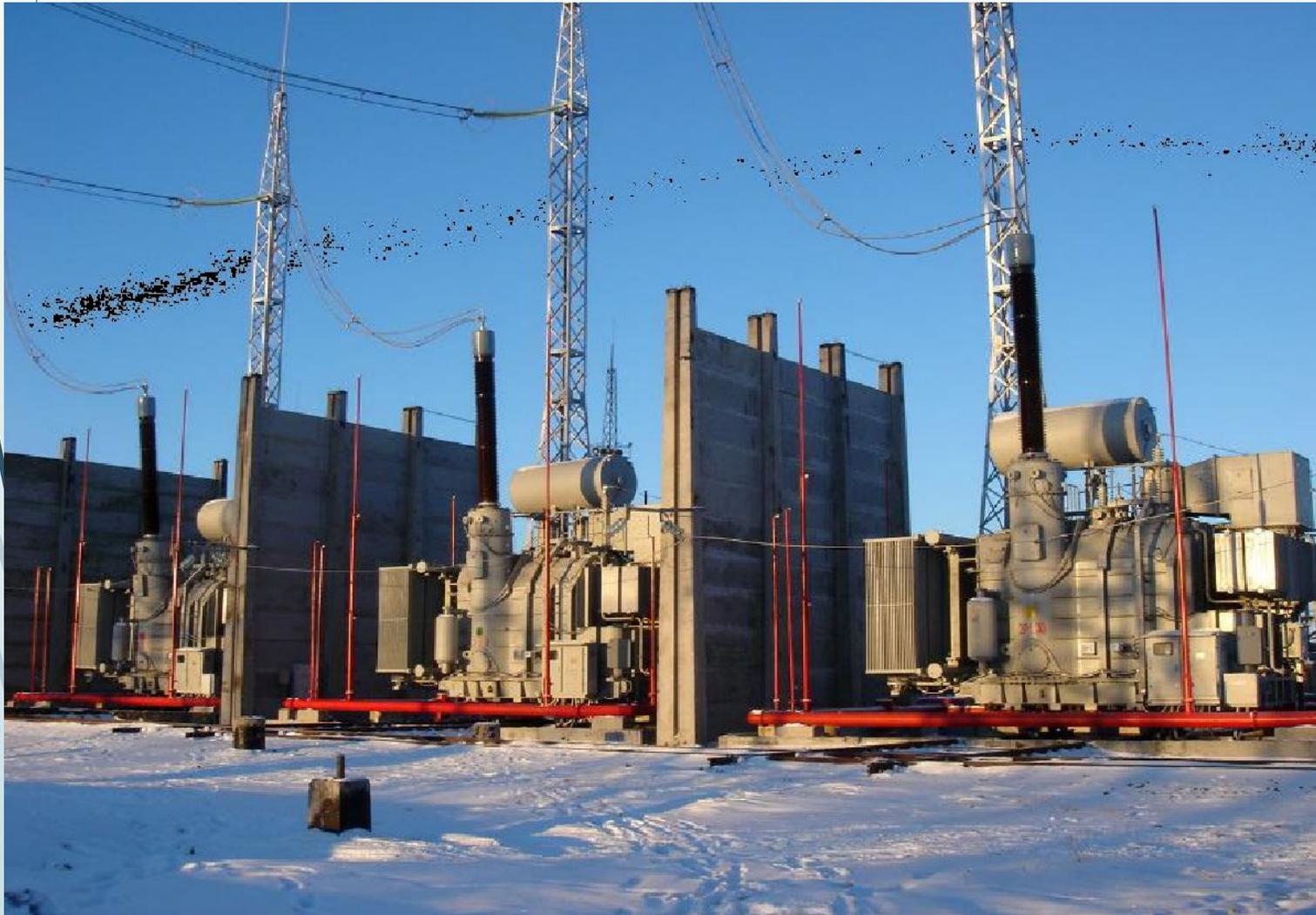
FACTS. Управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа (УШРТ)



- 1 - электромагнитная часть (фаза)
 - CO – сетевая обмотка;
 - KO – компенсационная обмотка;
 - OU – обмотка управления;
- 2 – тиристорный блок ТБ1 с системой управления СУРЗА;
- 3 – фильтры гармоник и корректор формы тока (без обозначений).



FACTS. Управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа (УШРТ)



Управляемый шунтирующий реактор 180 МВАр, 500 кВ на п/ст «Таврическая», Россия 2005 год.
Основные технические характеристики:
Номинальное напряжение 525 кВ;
Номинальная мощность 180 Мвар;
Диапазон изменения мощности 1...240 Мвар;
Время изменения мощности 0,3 с;
Потери:
- холостого хода 200 кВт
- номинальные 900 кВт
Мощность управления 5,4 МВА
Высшие гармоники в токе $\leq 3\%$

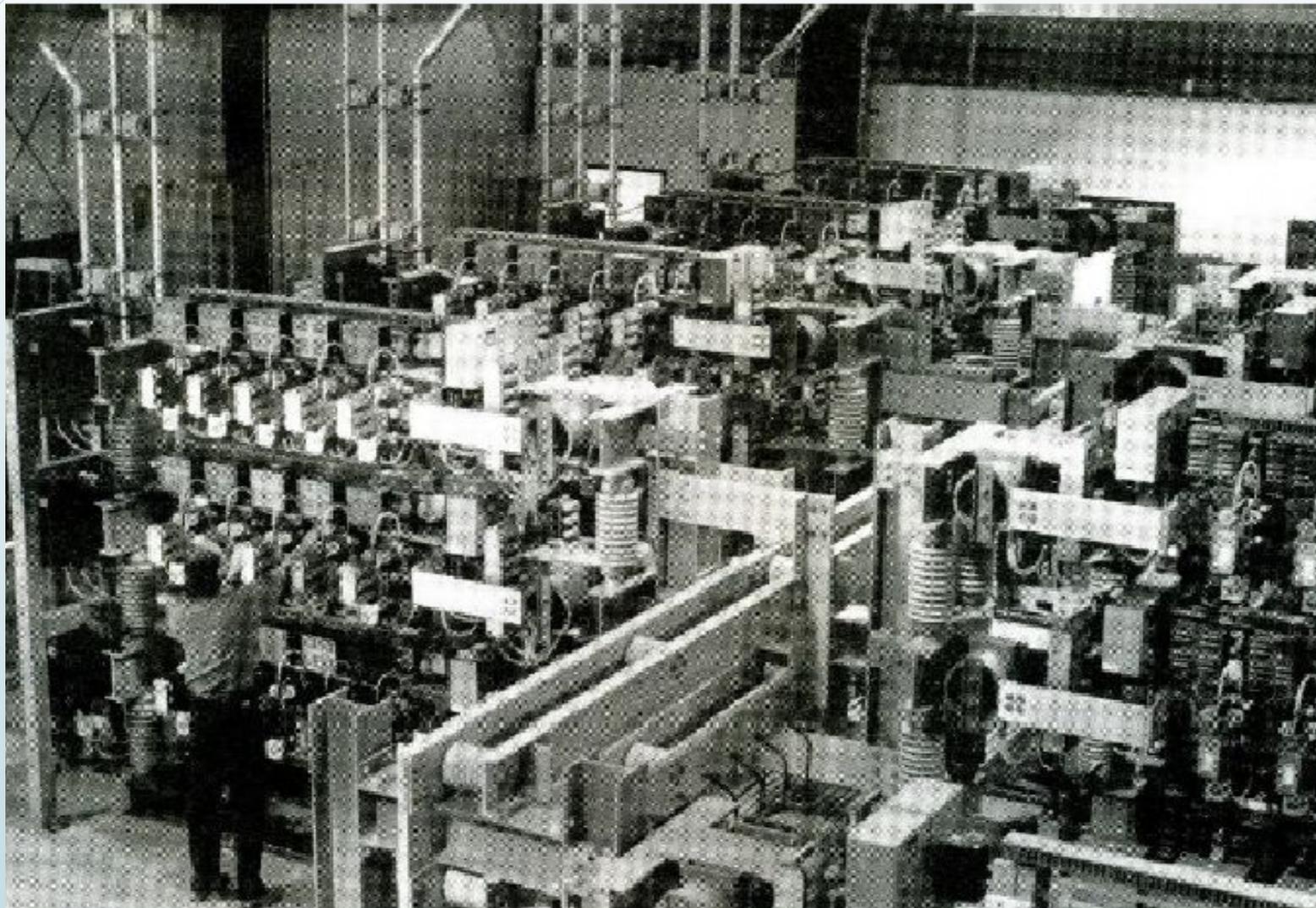
FACTS. Статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ)

Внешний вид СТАТКОМ

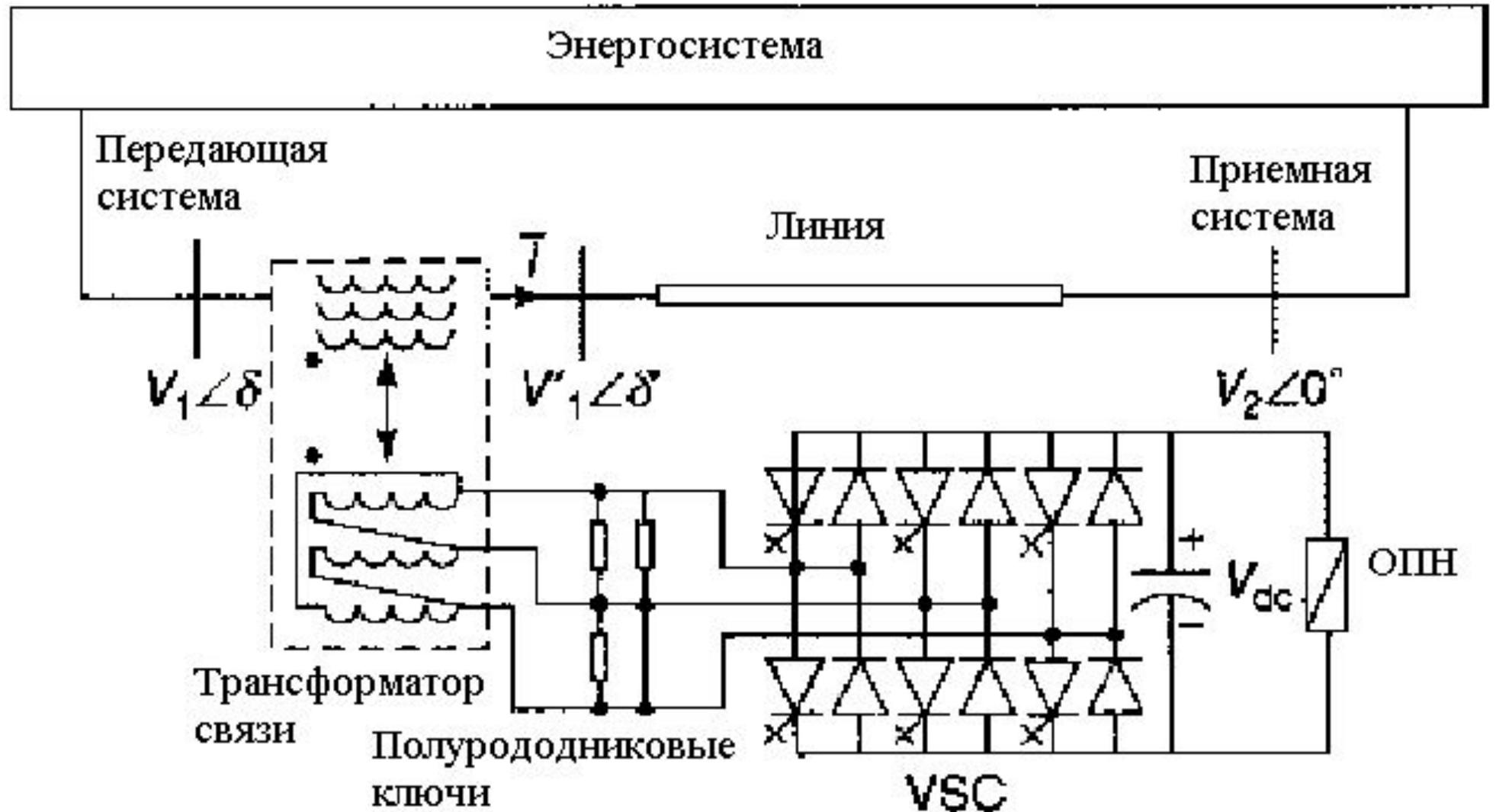


FACTS. Статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ)

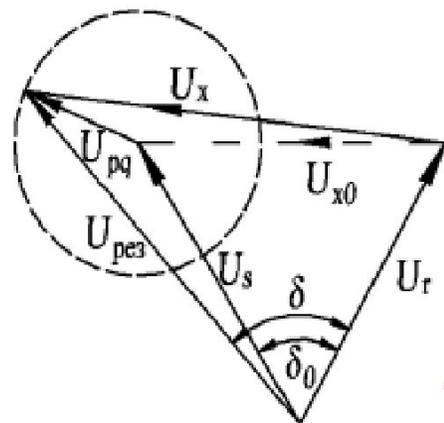
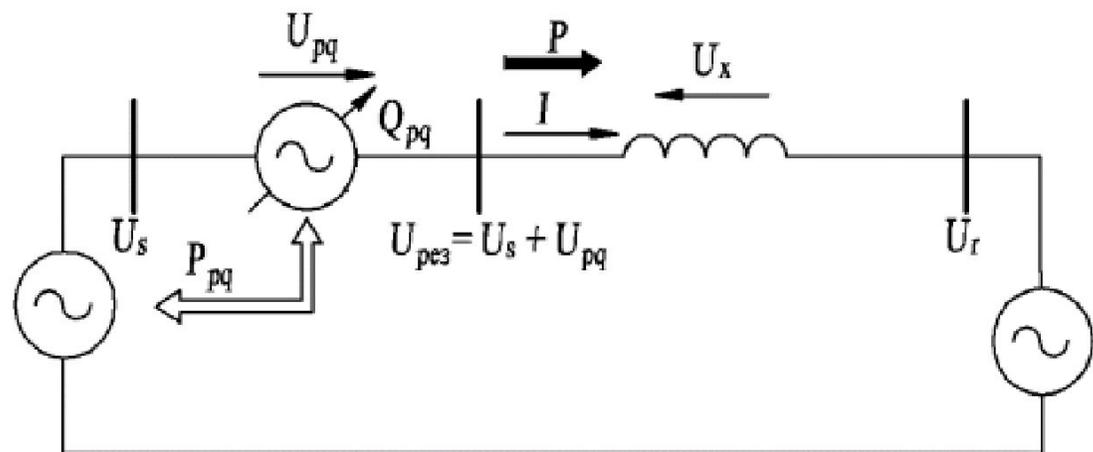
Вентильный зал СТАТКОМ



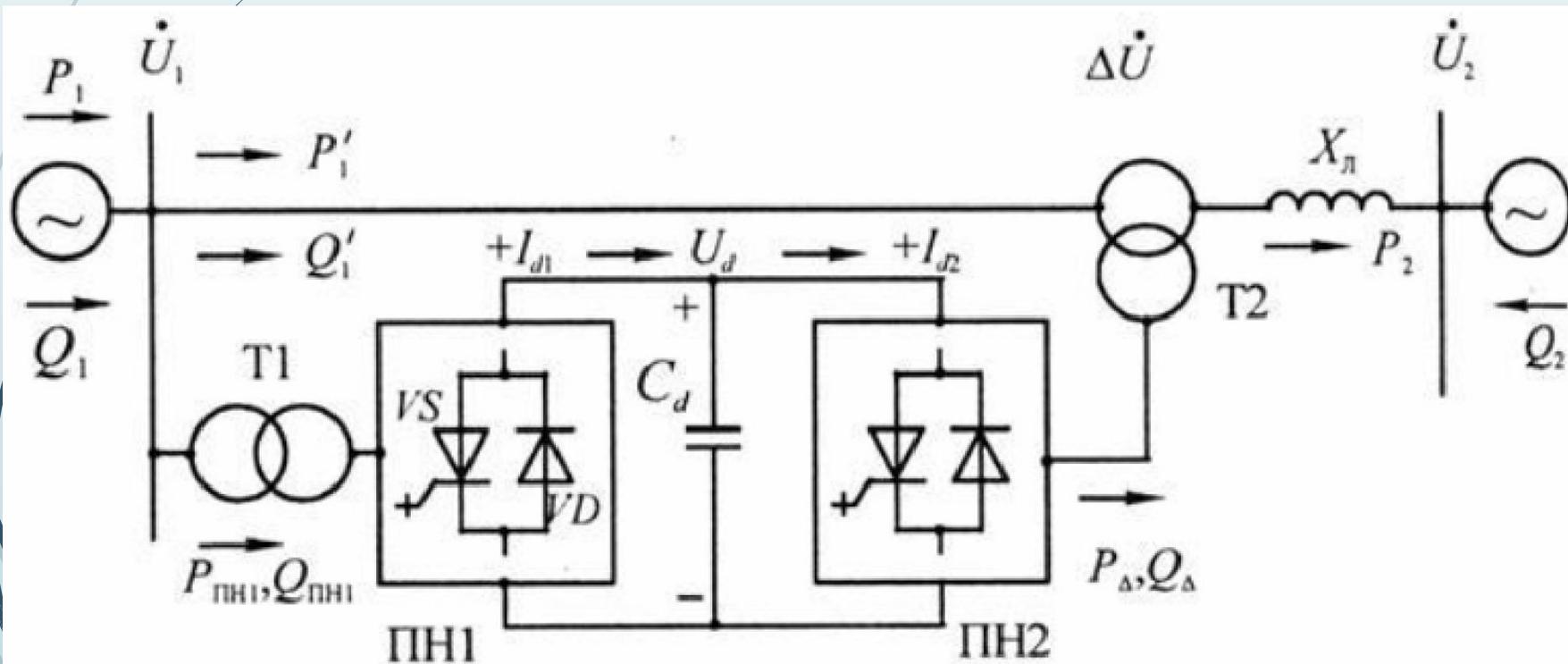
FACTS. Последовательный СТАТКОМ (ПСТАТКОМ)



FACTS. Объединенный регулятор перетока мощности (ОРПМ)



$$S = \frac{U_1 U_2}{X_L} \sin \delta + j \frac{U_1 (U_1 - U_2 \cos \delta)}{X_L}$$





РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Нормативно-технические документы автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности (АРЧМ) в энергосистемах РФ

В ЕЭС России регулирование частоты и активной мощности регламентируется следующими нормативно-техническими документами:

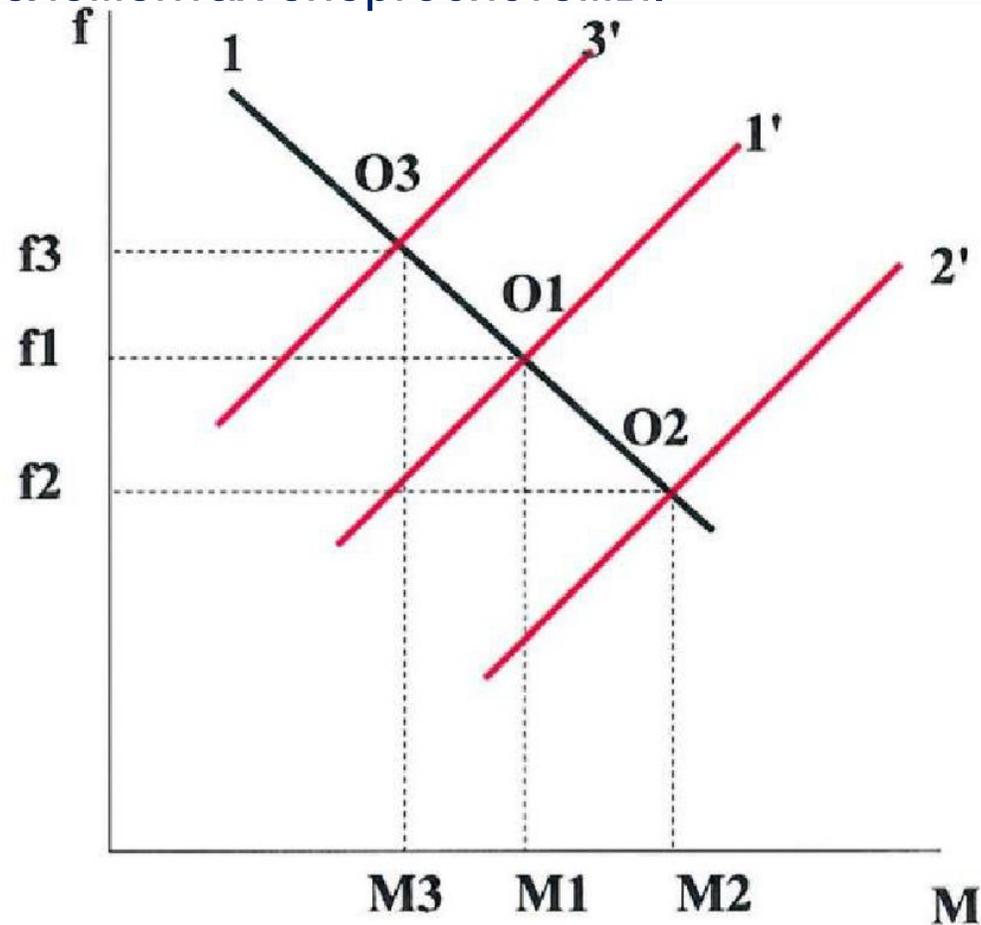
- национальный стандарт ГОСТ Р 55890-2013 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Регулирование частоты и перетоков активной мощности». Стандарт содержит требования к управляющим вычислительным комплексам централизованных систем автоматического регулирования частоты и перетоков мощности ЕЭС России, си-стемам группового регулирования активной мощности гидравлических электростанций;
- стандарт Системного оператора «Регулирование частоты и перетоков активной мощности в ЕЭС России. Нормы и требования», 2012;
- межгосударственный стандарт ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», в котором перечислены показатели качества электрической энергии и допустимые пределы их отклонения;
- «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации», утв. Минэнерго РФ, 2003.

АРЧМ. Работа нерегулируемого генератора на выделенный район нагрузки

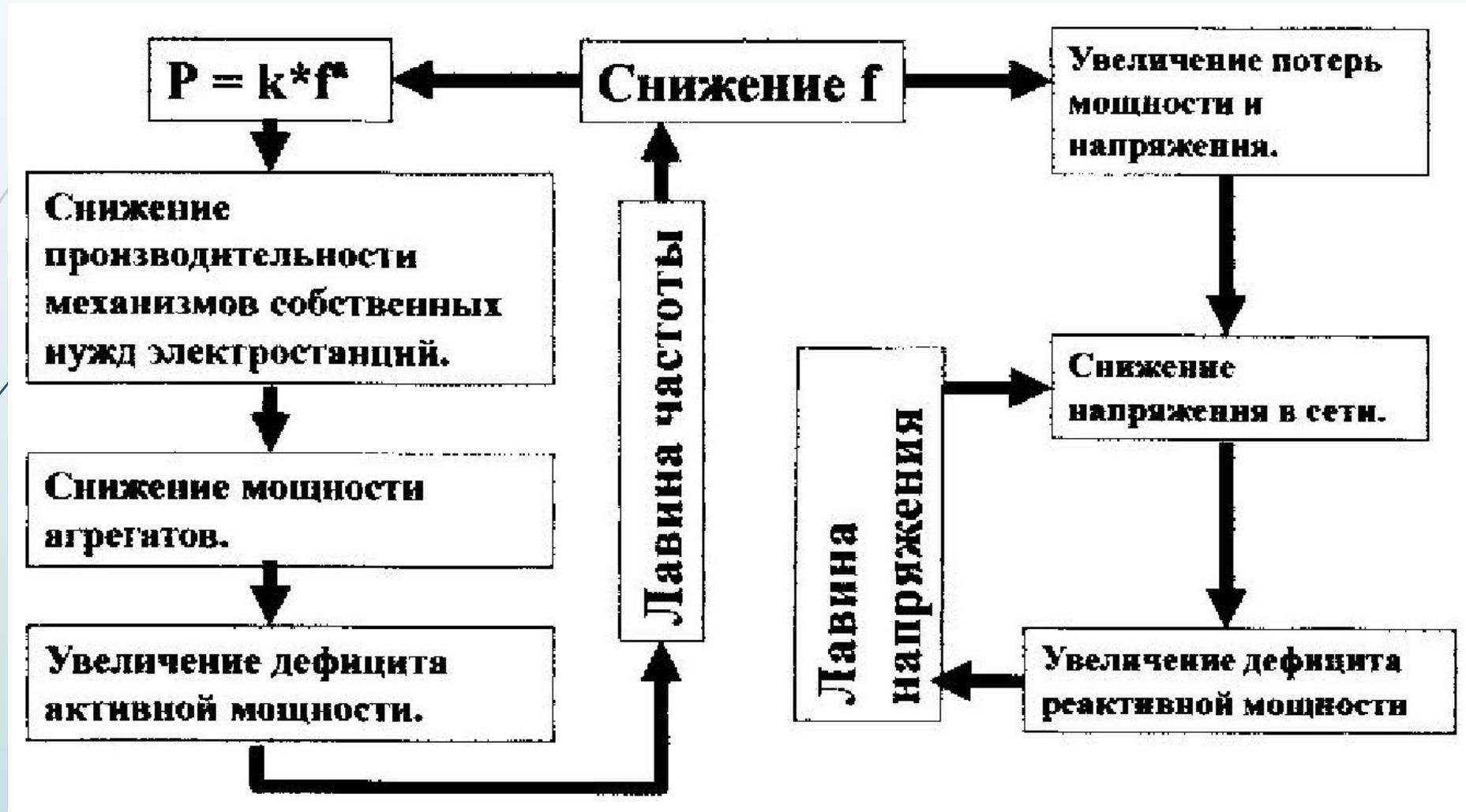
Оперативный баланс активных мощностей: $P_{\text{ген}} = P_{\text{потр}} + \Delta P_{\text{пот}}$,
 $P_{\text{ген}}$ – мощность генерирующих источников;
 $P_{\text{потр}}$ – мощность электроприемников (потребителей);
 $\Delta P_{\text{пот}}$ – потери в элементах энергосистемы.

$$P_{\text{Г}} = P_{\text{потр.}}$$

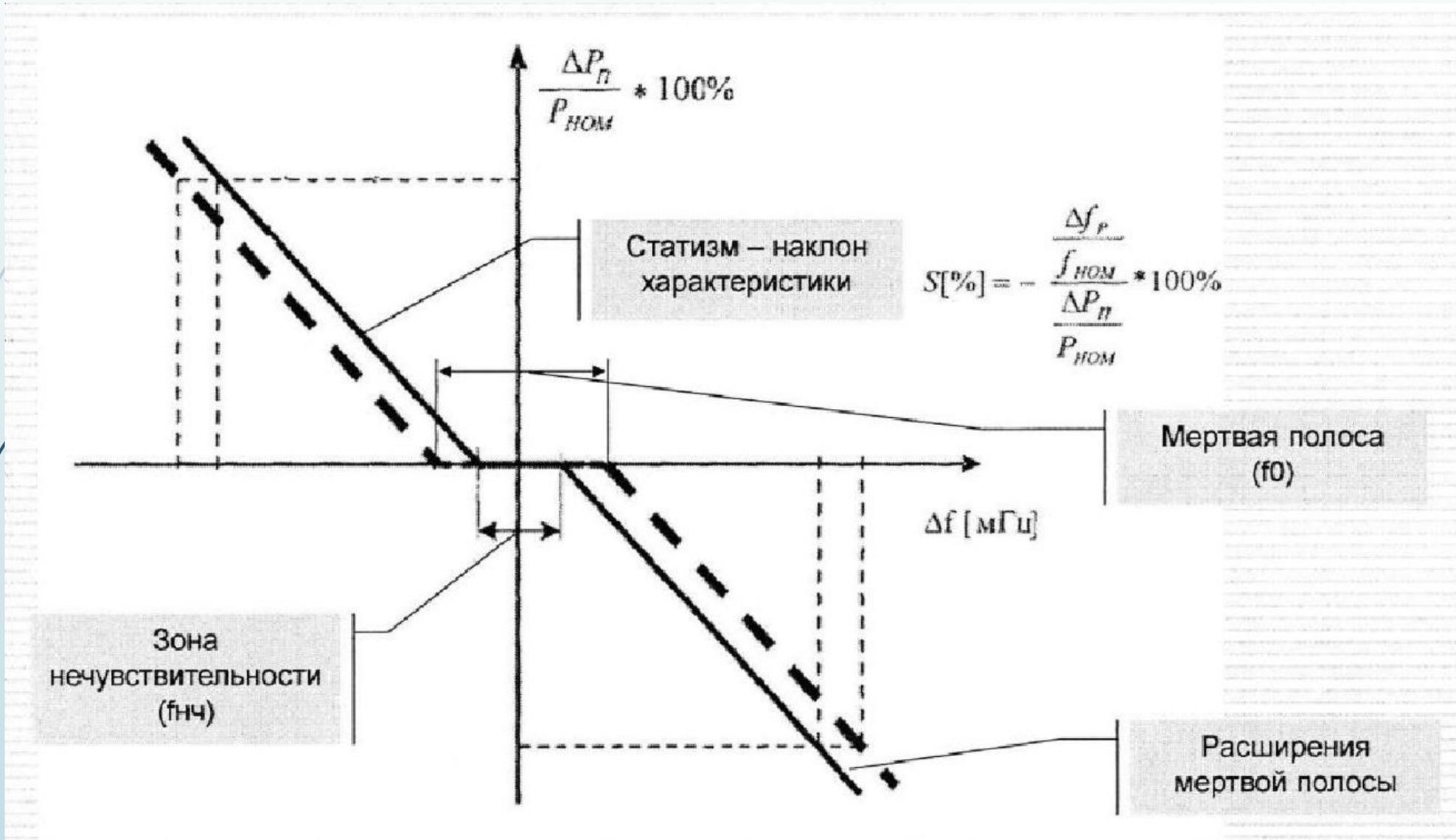
$$Kf = \Delta P / \Delta f$$



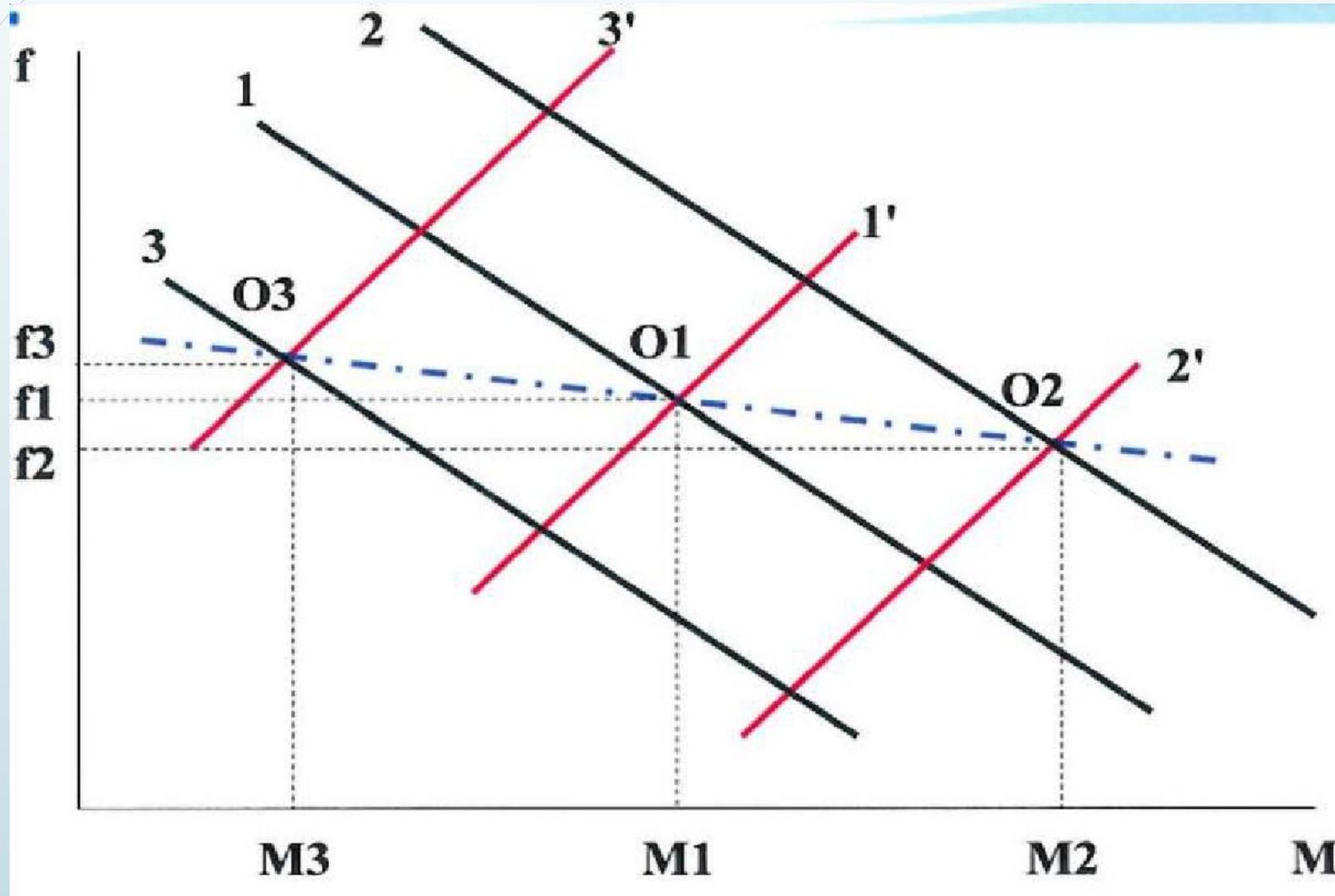
АРЧМ. «Лавина частоты»



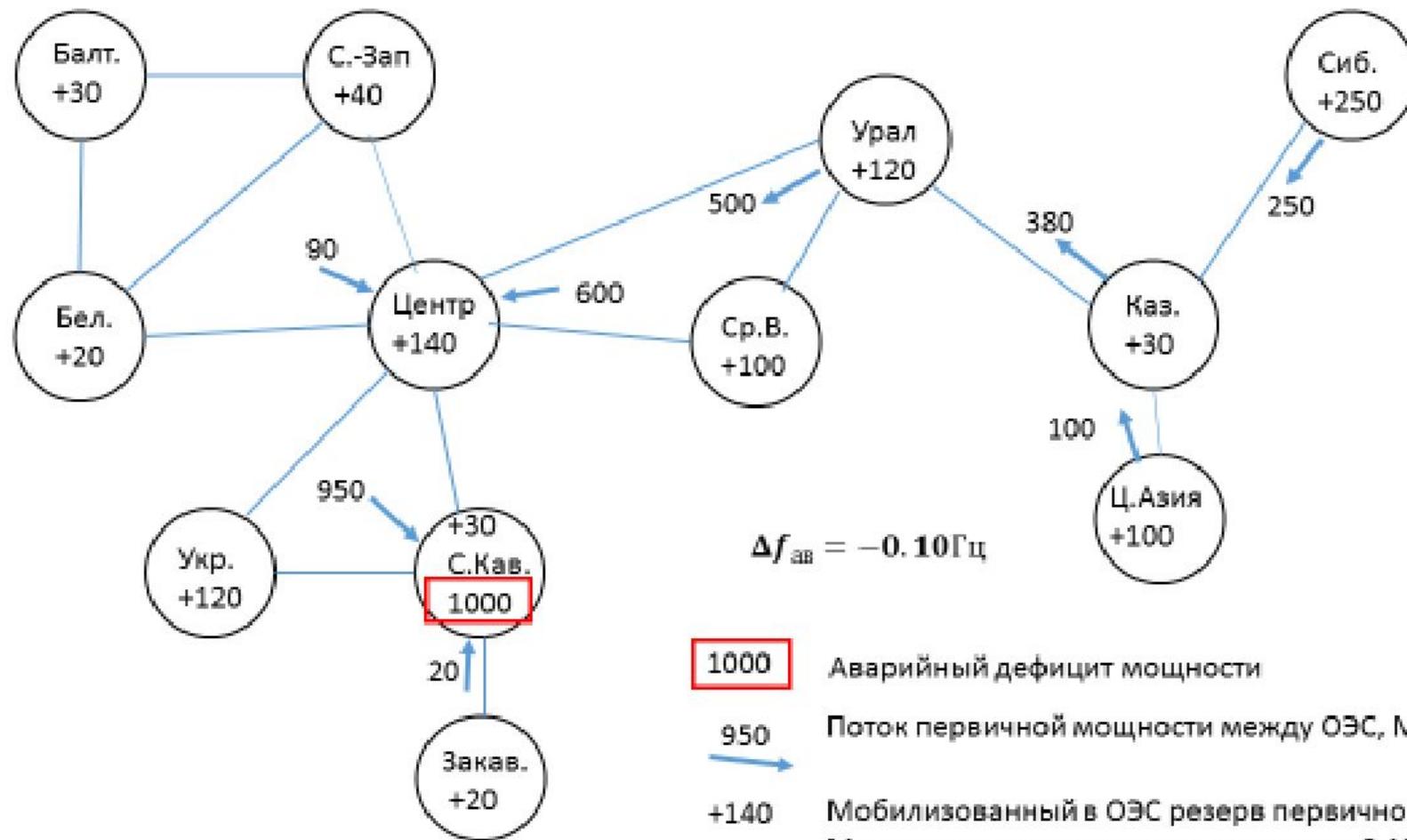
АРЧМ. Регулятор частоты вращения турбины



АРЧМ. Работа регулируемого генератора в энергосистеме



АРЧМ. Компенсация аварийного дефицита мощности в ЕЭС России.



АРЧМ. Первичное регулирование частоты

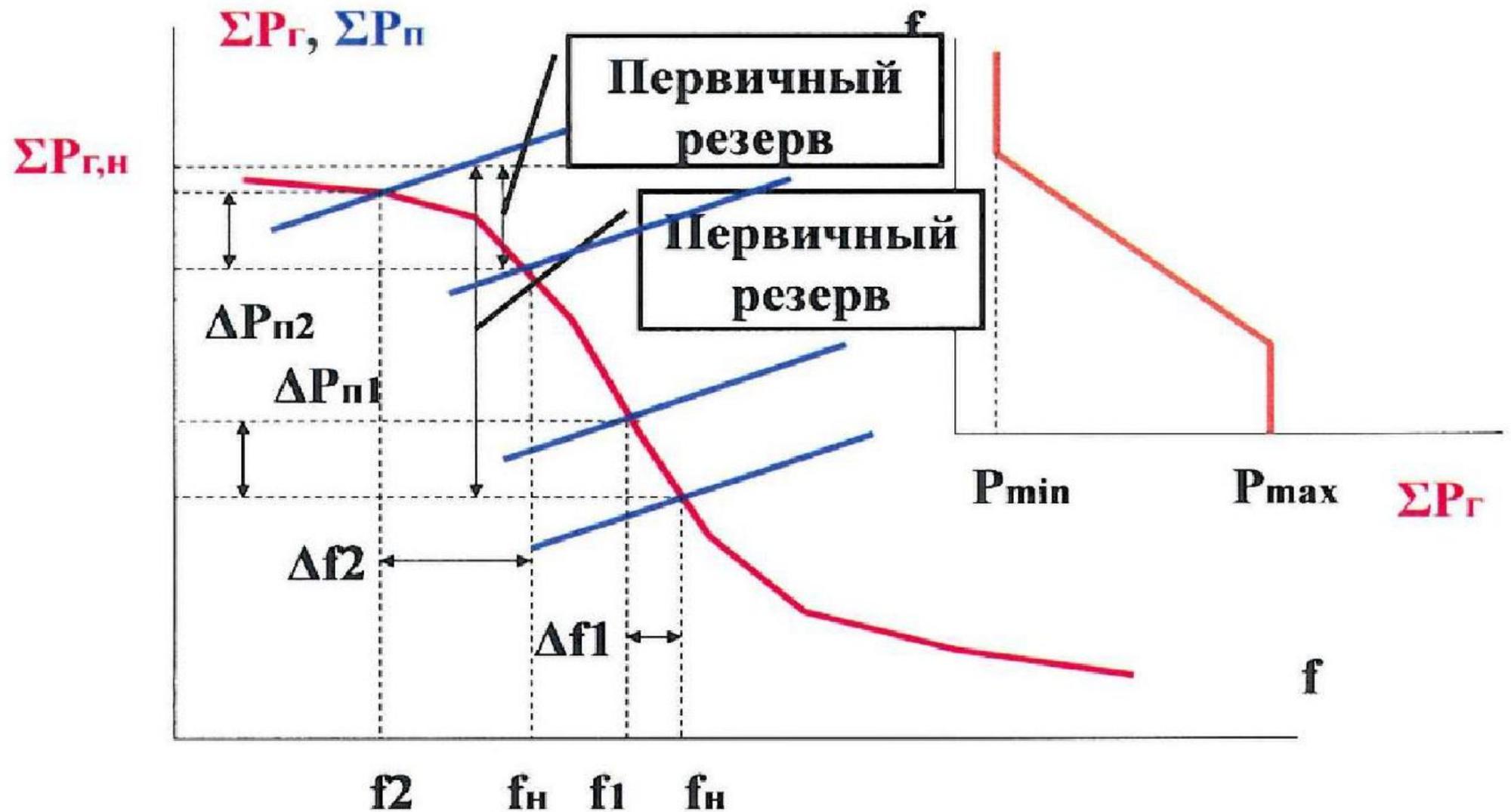
Первичное регулирование частоты (ПРЧ) — процесс автоматического изменения мощности генерирующего оборудования под действием только первичных регуляторов, вызванный изменением частоты и направленный на уменьшение этого изменения.

Резерв ПРЧ – максимальное значение первичной регулирующей мощности, которое может выдать турбоагрегат, электростанция, энергосистема при понижении (резерв на загрузку), либо повышении (резерв на разгрузку) частоты.

Общее первичное регулирование (ОПРЧ) - первичное регулирование, осуществляемое всеми электростанциями в пределах имеющихся в данный момент времени регулировочных возможностей систем первичного регулирования электростанций (энергоблоков) с характеристиками систем первичного регулирования, заданными действующими нормативами, и имеющее целью сохранение энергоснабжения потребителей и функционирования электростанций при значительных отклонениях частоты.

Нормированное первичное регулирование (НПРЧ) - первичное регулирование, осуществляемое в целях обеспечения гарантированного качества первичного регулирования и повышения надёжности энергообъединения выделенными электростанциями (энергоблоками) НПРЧ, на которых запланированы и постоянно поддерживаются резервы первичного регулирования, обеспечено их эффективное использование в соответствии с заданными для НПРЧ характеристиками (параметрами) первичного регулирования.

АРЧМ. Первичное регулирование частоты



АРЧМ. Вторичное регулирование частоты

Вторичное регулирование частоты и перетоков активной мощности начинается после действия первичного и предназначено для автоматического или оперативного восстановления заданного значения частоты или заданного значения внешнего перетока мощности.

Нижний уровень системы вторичного регулирования - электростанции, поддерживающие заданную диспетчерскими графиками мощность с коррекцией по частоте (для обеспечения участия в первичном регулировании частоты).

Средний уровень системы вторичного регулирования - объединённые энергосистемы (ОЭС):

- регулирующие свой плановый баланс – поддержание заданной диспетчерскими графиками обменной мощности со смежными энергосистемами с коррекцией по частоте (в тех же целях); или
- регулирующие частоту в своем регионе ведущей станцией со статизмом или блокировкой по обменной мощности.

Общее название системы автоматического вторичного регулирования частоты и перетоков мощности - **АВРЧМ**.

Верхний уровень системы вторичного регулирования - Главный диспетчерский центр Системного оператора ЕЭС.

АРЧМ. Вторичное регулирование частоты



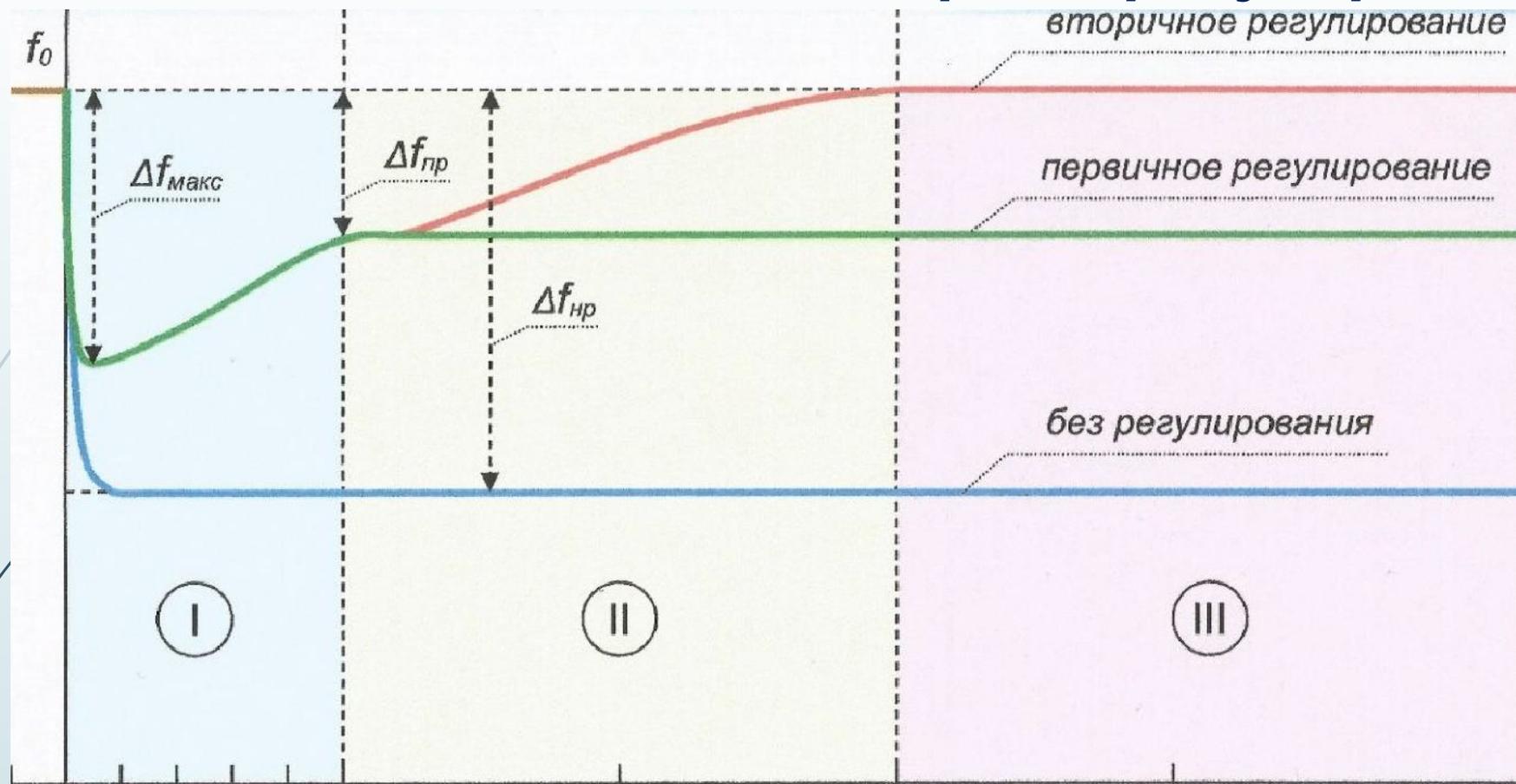
АРЧМ. Третичное регулирование частоты

Третичное регулирование — **оперативное** регулирование мощности специально выделенных электростанций третичного регулирования в целях восстановления вторичного резерва по мере его исчерпания, а также для осуществления оперативной коррекции режима в иных целях (например, для оптимизации распределения нагрузок между электростанциями при изменившейся нагрузке потребителей).

Резерв третичного регулирования - часть регулировочного диапазона генерирующего оборудования на загрузку или на разгрузку (соответственно резерв на загрузку и резерв на разгрузку), используемая для третичного регулирования.

К **«минутному резерву»** относится третичная регулирующая мощность, получаемая пуском/остановом гидроагрегатов (ГЭС, ГАЭС), переводом ГАЭС из генераторного в насосный режим и наоборот, загрузкой (разгрузкой) работающих газомазутных энергоблоков и энергоблоков АЭС в пределах регулировочного диапазона.

АРЧМ. Изменение частоты при ее регулировании



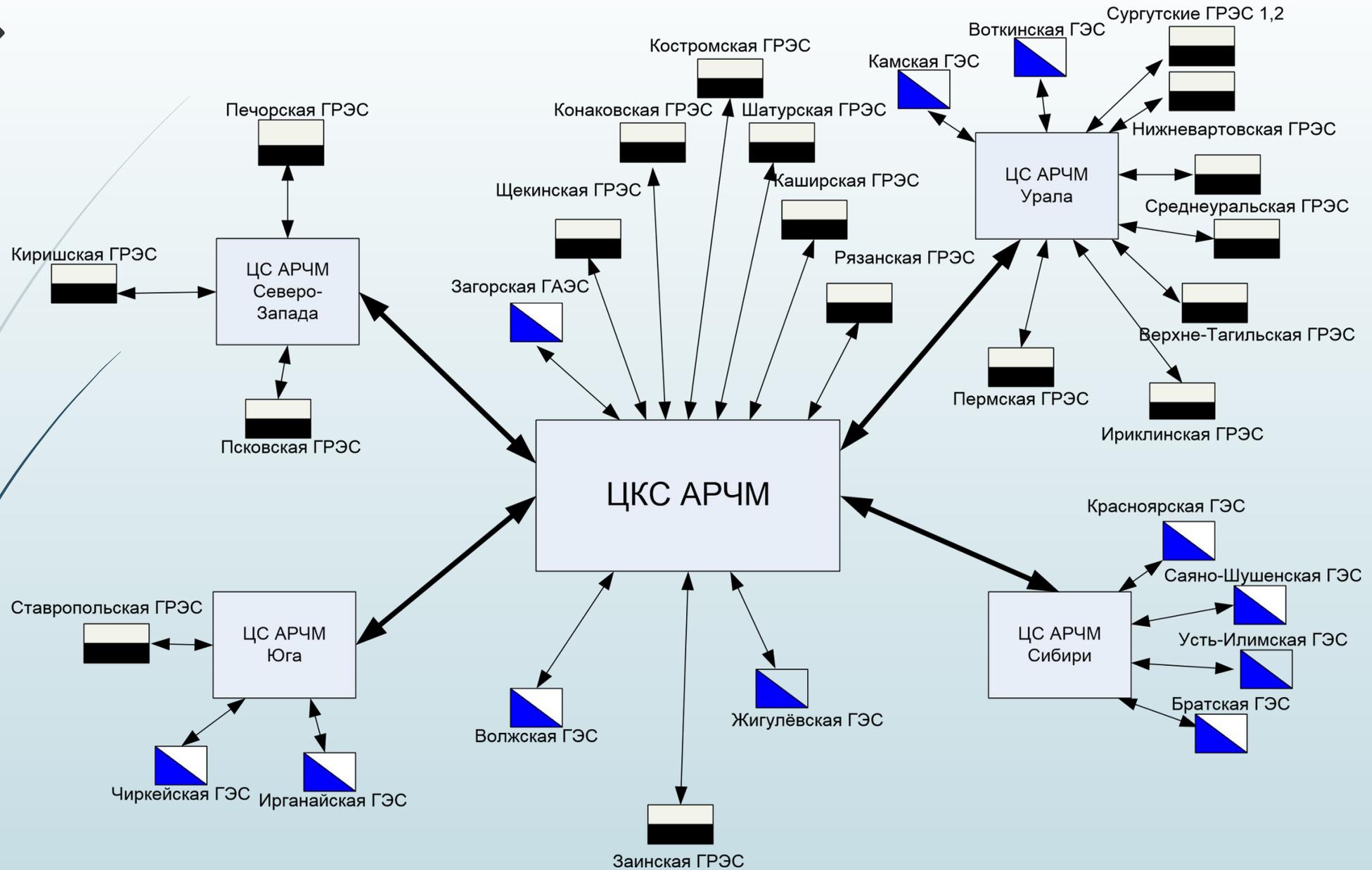
- I. Ограничение ($\Delta f_{\text{макс}}$) и снижение ($\Delta f_{\text{пр}}$) отклонения частоты до безопасной величины первичным регулированием
- II. Восстановление нормальной частоты вторичным регулированием и ослабление действия первичного регулирования
- III. Восстановление истраченного вторичного резерва третичным регулированием

Состав и структура системы АВРЧМ ЕЭС

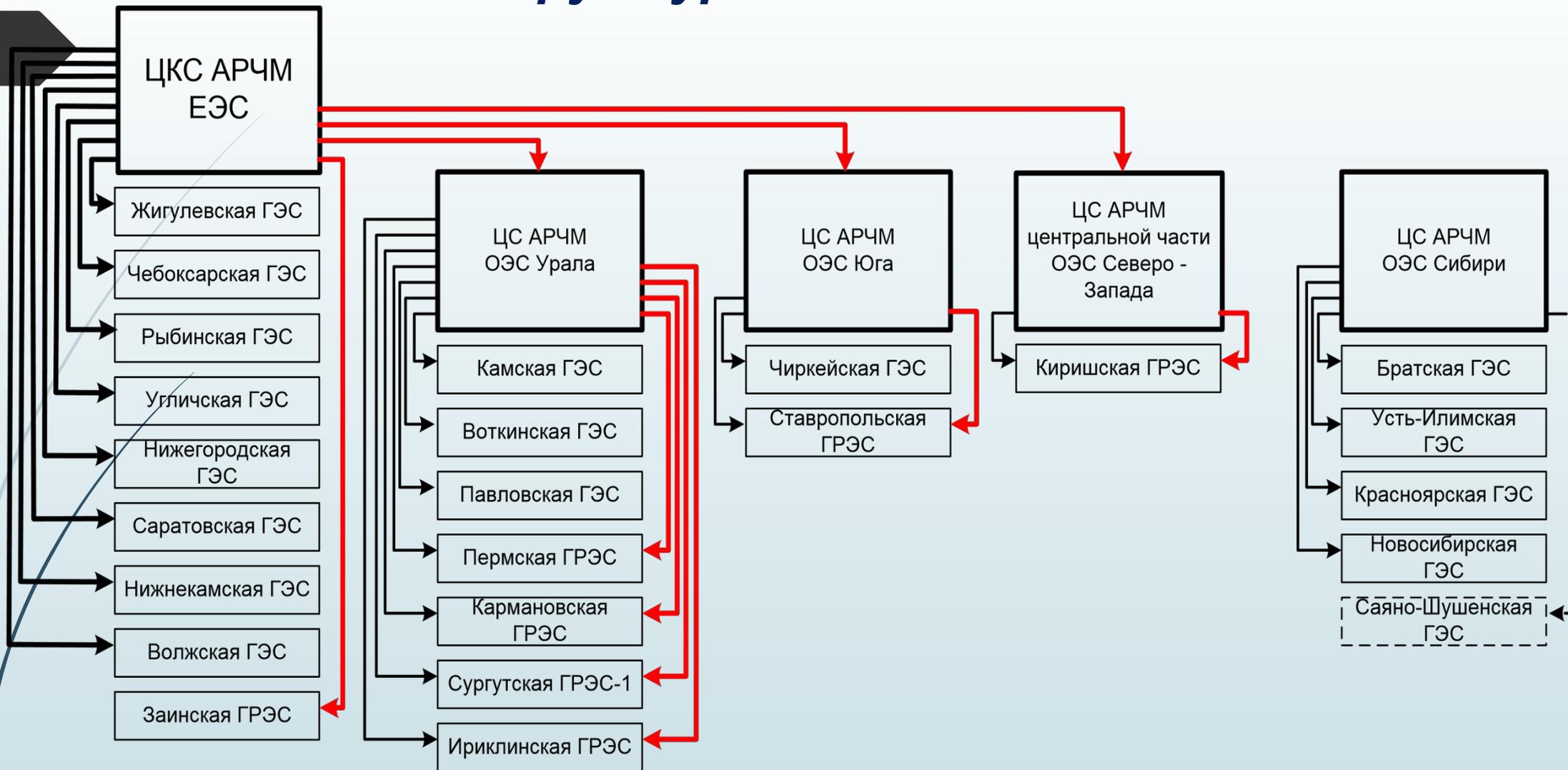
Система АВРЧМ является централизованной иерархически и территориально распределенной системой. Согласно требованиям Национального Стандарта, система АВРЧМ ЕЭС (ОЭС) состоит из следующих сегментов:

- программно-аппаратных управляющих комплексов (ПАК) центральной координирующей системы (ЦКС) АРЧМ с регуляторами, установленной в ГДЦ (ЦДУ), и центральными системами (ЦС) АРЧМ с регуляторами, установленными во всех ОДУ;
- общестанционных систем АРЧМ на подключенных к ЦКС или ЦС АРЧМ электростанциях автоматического вторичного регулирования;
- систем автоматического регулирования (САР) частоты и мощности на генерирующем оборудовании;
- системы сбора и передачи информации команд телерегулирования (ССПИ АРЧМ), обеспечивающей ПАК необходимой информацией о режимах работы ЕЭС (ОЭС) и электростанций АРЧМ и передачу команд телерегулирования от ПАК ЦКС (ЦС) АРЧМ до САР генерирующего оборудования.

Состав и структура системы АВРЧМ ЕЭС (на 2020 г.)



Состав и структура системы АВРЧМ ЕЭС



- ➔ Управление от ЦКС АРЧМ ЕЭС
- ➔ Управление энергоблоками ТЭС от ЦКС АРЧМ ЕЭС
- ➔ Управление от ЦС АРЧМ ОЭС
- - - ➔ Управление от ЦС АРЧМ ОЭС Сибири выведено до восстановления ГА

АВРЧМ. Программное обеспечение (ПО)

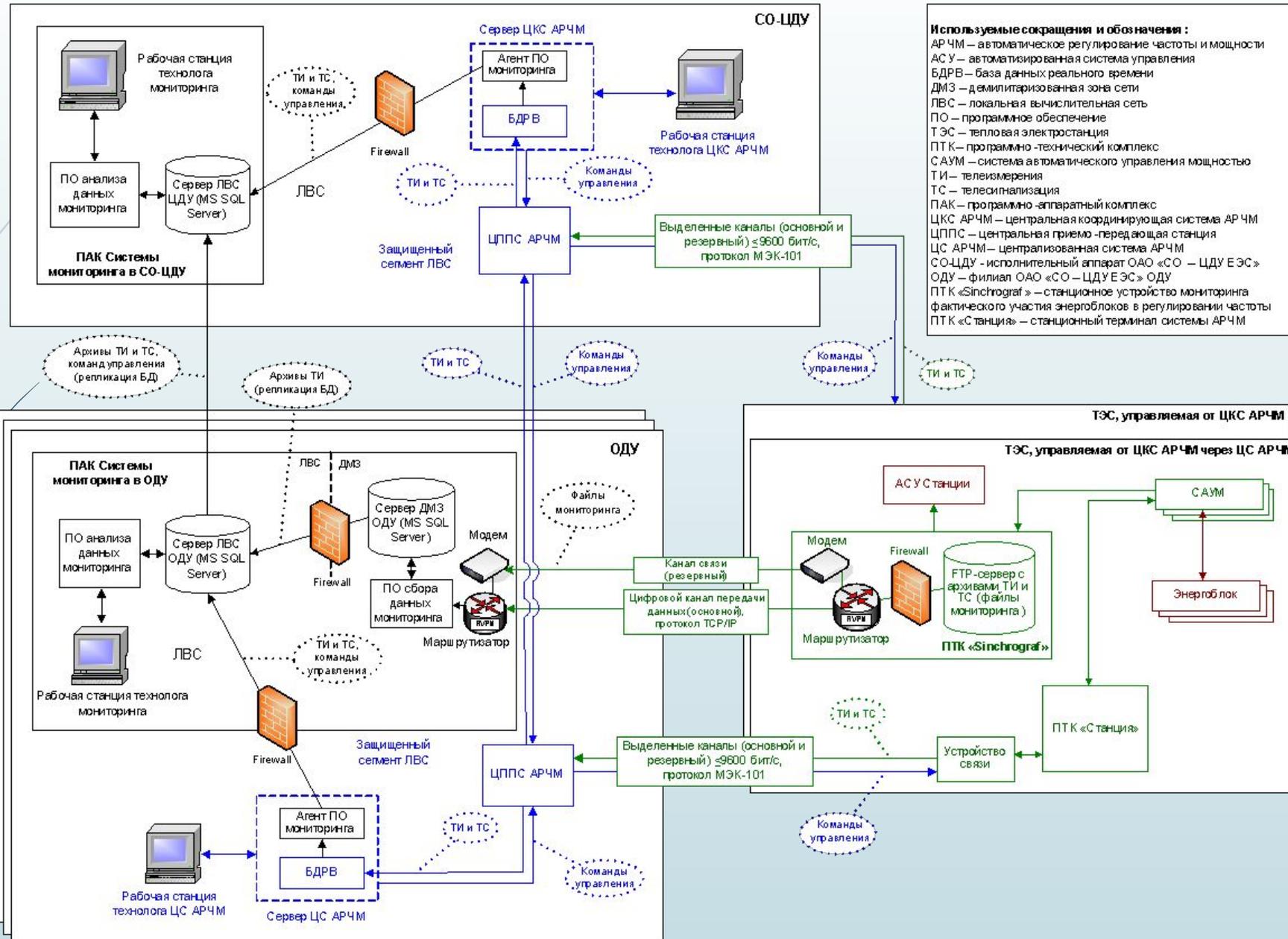
К программному обеспечению автоматического вторичного регулирования частоты и мощности предъявляются весьма высокие требования, потому что:

- величина отклонения частоты от номинальной является важнейшим показателем степени надежности ЕЭС,
- должна быть обеспечена многофункциональность ПАК АРЧМ.

В управляющих вычислительных комплексах ЦКС и ЦС АРЧМ предусматриваются:

- настройка регуляторов частоты и перетоков активной мощности для реализации требуемого качества и быстродействия АВРЧМ;
- задание в регуляторах частоты и перетоков активной мощности ограничений для каждой ГЭС по величине вторичного задания ГЭС и скорости его изменения, согласованных с допустимыми параметрами изменения мощности гидроагрегатов;
- задание коэффициентов долевого участия каждой ГЭС;
- блокировка централизованного управления для каждой электростанции при фиксации неисправностей с соответствующим пересчетом долей остальных электростанций, участвующих в АРЧМ.

Архитектура системы АВРЧМ в ЕЭС России



Интерфейс контроля перетока в опасных сечениях

06 1 18.01.2005 12:46:09) Контроль перетоков опасных сечений ОДУ Сер...

Сечение	Ток	Макс	Загр	Разгр	
Центр, Украина - С.К.	В Р →	797	1180	1804	1741
Украина - С.К.	Р →	487	....	1099	1741
С.К. - Р	Р →	177	....	1521	1573
Ю Г	О Р →	1454	2450	1521	1573
РЭ - КЭ	О Р →	456	....	1519	1573
КЭ - РЭ	Р ←	307	....	1519	1573
ЗАПАД	О Р ←	42	720	1521	1273
ВЛ-507, 502, 330-21	Р →	683	700	1519	1573
ВЛ-507, 01, 17	В Р →	1208	1400	1371	673
ВЛ-29 + 06/07	В Р →	492	500	970	345
ВЛ-330 Дербентская	↓	219	300		
ВЛ-29+06/07+Дербент	В Р →	273	700	970	345
Центр - СК 1	→	310	0		
Центр - СК 2	Р →	1302	....	
Генерация ВдАЭС	Р ←	1019	0		

Создание оборудования

Сечение: Все
 Тип оборудования: Все
 Состояние: Все

Тип	Название		
ЛЭП 500кВ	ВдАЭС-Южная	•	●
ЛЭП 500кВ	ВЛ-501 (СГРЭС-Центральная)	•	●
ЛЭП 500кВ	ВЛ-502 (СГРЭС-Тикорец)	•	●
ЛЭП 500кВ	ВЛ-505 (ВдАЭС-Тикорец)	•	●
ЛЭП 500кВ	ВЛ-507 (ВдАЭС-Буденновск)	•	●
ЛЭП 500кВ	ВЛ-509 (Шахты-ВдАЭС)	•	●
ЛЭП 500кВ	Волга-Южная	•	●
ЛЭП 500кВ	Победа-Донбасс	•	●
ЛЭП 500кВ	Шахты-Победа	•	●
ЛЭП 330кВ	«Дербентская» (Дербент-Ялма)	•	●
ЛЭП 330кВ	ВЛ-330-01 (Армавир-НГРЭС)	•	●
ЛЭП 330кВ	ВЛ-330-05 (Моздок-Прохладная)	•	●
ЛЭП 330кВ	ВЛ-330-06/07 (Владикавказ-2 - Черконт-330)	•	●
ЛЭП 330кВ	ВЛ-330-08 (Черконт-Махачкала)	•	●
ЛЭП 330кВ	ВЛ-330-09 (Дербент-Махачкала)	•	●
ЛЭП 330кВ	ВЛ-330-12 (ГЭС-4-Старополь-330)	•	●
ЛЭП 330кВ	ВЛ-330-14 (СГРЭС-Армавир)	•	●
ЛЭП 330кВ	ВЛ-330-15 (СГРЭС-Армавир)	•	●

Видеокарта: GeForce 4

Центр, Украина - С.К.

Тип	Название	Загр	Разгр
АЭС	Волгодонская	0	
ГРЭС	Новочеркасская	345	5
ГРЭС	Старопольская	150	600
ГРЭС	330кВ Новонольсская	25	318

Программное обеспечение системы АВРЧМ (ПО)

