



**АВТОМАТИЗАЦИЯ  
& ИТ в энергетике**



**РОССЕТИ**

ФСК ЕЭС

Научно-технический центр



Некоммерческое партнерство  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ  
Единой энергетической  
системы»

**МФЭС**

Международный форум  
«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ»

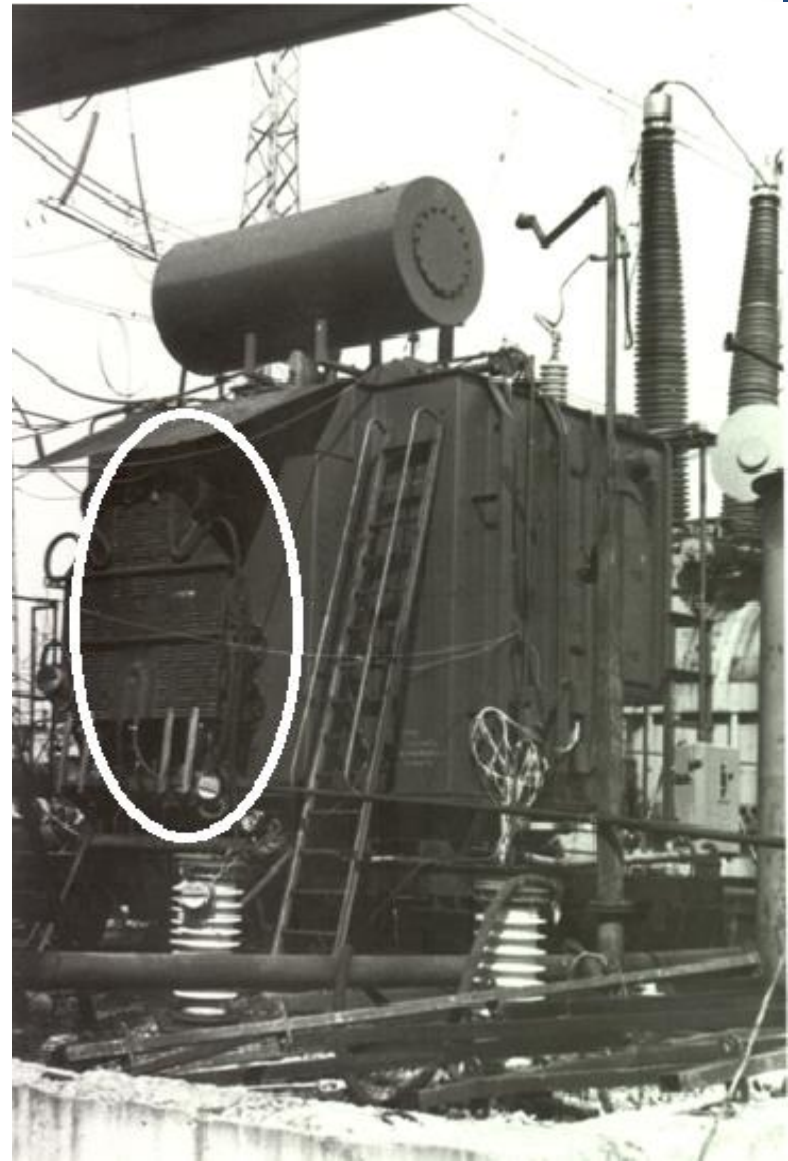
## ВОЗМОЖНОСТИ И ПУТИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СТОЙКОСТЬ ТОКАМ КЗ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

- Хренников А.Ю., д.т.н., профессор, Председатель секции «Электротехническое оборудование» НП «НТС ЕЭС», г. Москва
- Шульга Р.Н., к.т.н., ВЭИ-филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»

2022  
Москва

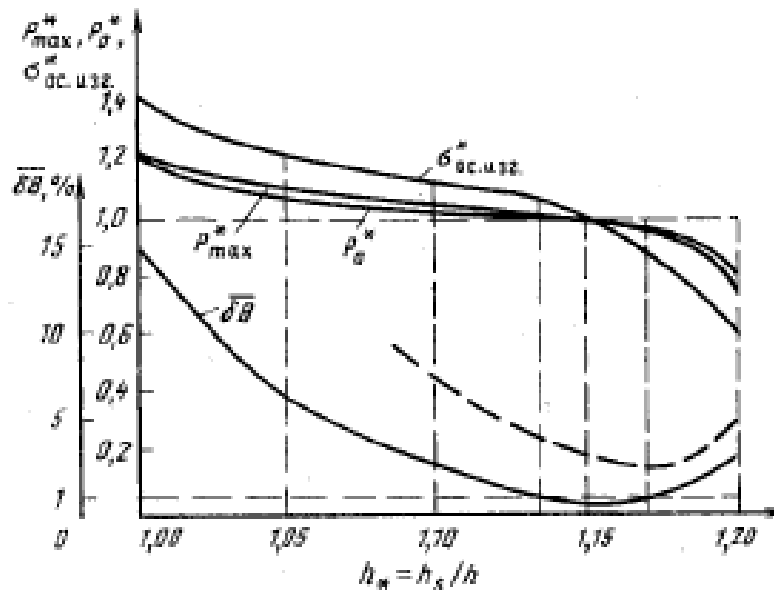
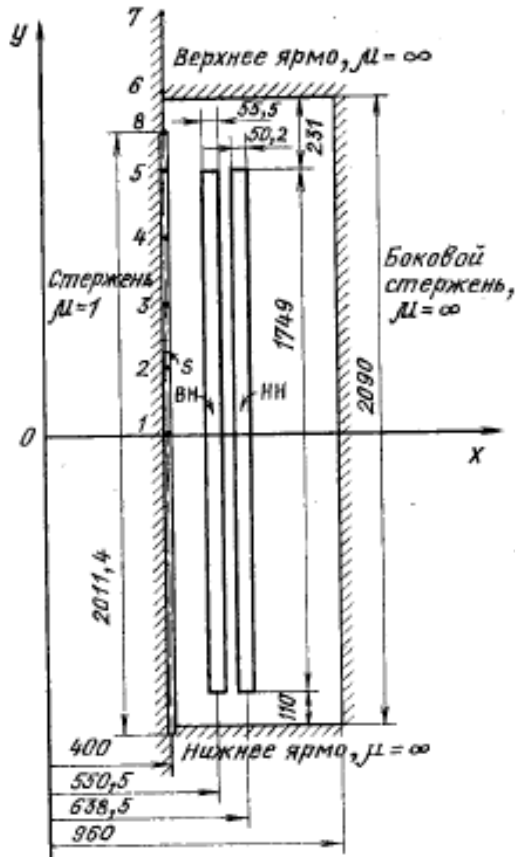
# **Испытания трансформатора типа ЭТЦНКД-160000/110 для металлургического производства с имитацией толчков тока нагрузки в количестве 300 тысяч опытов.**

- **Механические действия токов короткого замыкания (КЗ) определяют стойкость электротехнического оборудования к электродинамическим воздействиям.**
- **В настоящее время происходит модернизация и совершенствование вышеуказанных элементов для повышения энергоэффективности и компактности за счет применения новой схмотехники, новых конструкций, технологий и материалов.**



# Расчет электродинамических усилий для проверки прочности конструкции обмотки (Электропечной трансф-р 160 МВА/ 35 кВ.

- Несмотря на наличие цифровых программ расчета сверхтоков КЗ и механических воздействий, например, EMTP, ETAP, ELDINST, РЭСТ-ВЭИ (REST-VEI) и др. Существует потребность проведения качественных расчетов **электродинамических усилий** на этапе предварительного проектирования и **НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ** для оценки электродинамической стойкости к токам КЗ.



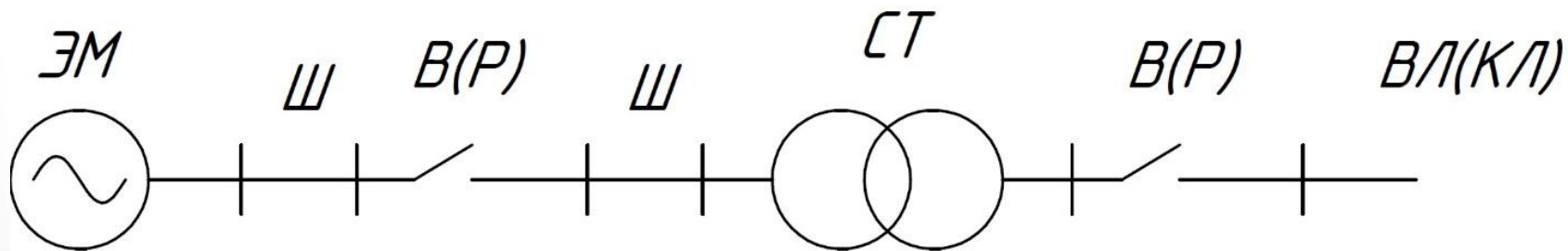
Электропечной трансф-р 160 МВА/ 35 кВ;

ВН — сетевая обмотка; НН — обмотка низшего напряжения; S — фиктивная обмотка; результаты расчета в точках: точка 5 расположена на уровне торцов обмоток ВН и НН; точка 8 — на торце фиктивной обмотки S; точки 6, 7 — на расстояниях, равных 30 % и 60 % полувысоты обмотки ВН от ее верхнего торца; пунктирной линией обозначена граница при расчете с учетом ярма и соседнего стержня.

Результаты расчета электродинамических сил в зависимости от высоты фиктивной обмотки S

## Введение

- На рисунке приведена структурная схема соединений силовых элементов на электростанции или подстанции, где обозначены: ЭМ- электромашина, Ш- шинопровод, В, Р- выключатель и разъединитель, СТ- силовой трансформатор, ВЛ (КЛ)- воздушная (кабельная) линия.



## Шинопровод

- При расчете прочности выполнения и заделки на изоляторах шинопроводов (Ш) по закону Ампера определяют магнитную индукцию  $B$

где  $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,

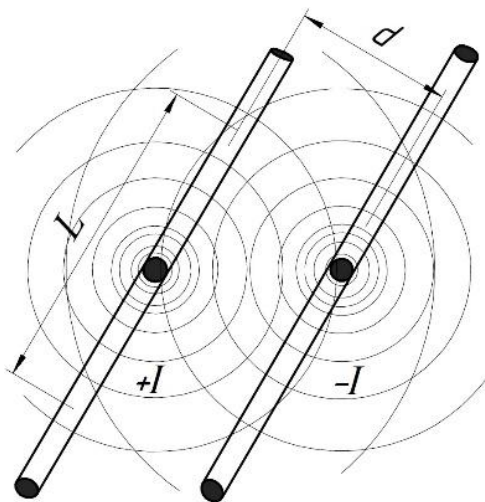
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

$I, d$ - соответственно амплитуда тока и расстояние между шинопроводами,  
 $l$ - длина шинопровода.

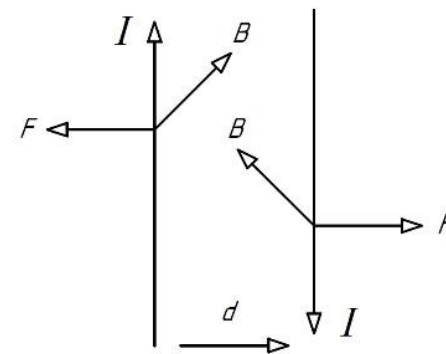
- В случае противоположного направления тока  $I$  в двух параллельно расположенных шинопроводах длиной  $l$  возникают отталкивающие силы  $F$ , которые равны

$$F = 2 \cdot 10^{-7} I^2 \frac{l}{d}$$

- Расположение 2х параллельных шинопроводов и приведены векторы токов  $I$ , магнитных индукций  $B$  и отталкивающих сил  $F$ .



(a)



(б)

## Шинопровод

- **Пример 1.** Задаваясь значениями тока КЗ равного  $I=105$  А,  $d=0,5$  м,  $l= 1$  м получают в соответствие с (2) значение  $F=4000$  Н или 400 кг силы, которые должны выдерживать шинопроводы КРУ на длине 1 м.
- **Пример 2.** Для испытательной схемы с трубчатым шинопроводом для турбогенератора АЭС мощностью 1200 МВт с током КЗ равным 300 кА при расстоянии  $d=5$  м сила отталкивания равна 3600 Н на длине 1 м.

При воздействии синусоиды тока КЗ амплитудой  $I_k$ , коэффициентом рассеивания  $\sigma$ , сетевой частотой  $\omega$ , коэффициентом затухания  $\alpha$  в формуле (2) следует принять значение  $I_2$  равным

$$\begin{aligned} I^2 &= \frac{I_K^2}{\sigma(\cos\omega t - e^{-\alpha t})^2} \\ &= \left(\frac{I_s}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{2} + e^{-\alpha t} - 2e^{-\alpha t}\cos\omega t + \frac{1}{2}\cos 2\omega t\right) \end{aligned}$$

**Ток КЗ приводит к появлению трех составляющих механических воздействий: постоянной силы и двух переменных сил с частотами кратными  $\omega$  и  $2\omega$ . При включении ЭМ и СТ из-за несимметричного тока включения ток содержит частоты кратные 1,3,5 гармоника. Демпфирование тока вплоть до 5-7 гармоник нерационально из-за большой мощности рассеивающих резисторов, поэтому необходимо обеспечить отстройку собственных частот**

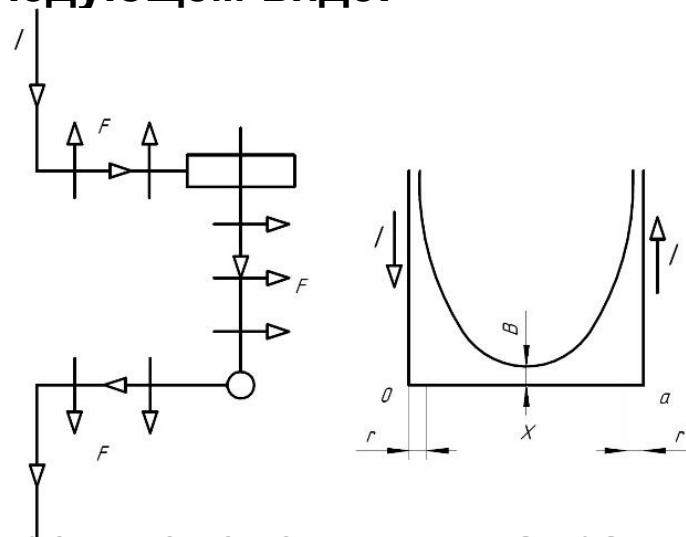


## Выключатель (разъединитель)

- Схема замещения выключателя и разъединителя (соответственно В и Р) может быть представлена в следующем виде:

Направления сил взаимодействия  $F$  в выключателе и разъединителе:

- схема взаимодействия  $F$ ,
- распределение индукции  $B$  (Тл) по промежутку  $x$  длиной  $l$



- Из-за протекания тока  $I$  в противоположных направлениях горизонтальных ответвлений между  $(a)$  ними возникают силы отталкивания  $F$ . Эта же сила вызывает отрыв ножей В и Р от траверсы.

- **Сила взаимодействия  $F$  для выключателя (разъединителя) определяется выражением:**

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{d}{r} - 1\right) \cdot I^2$$

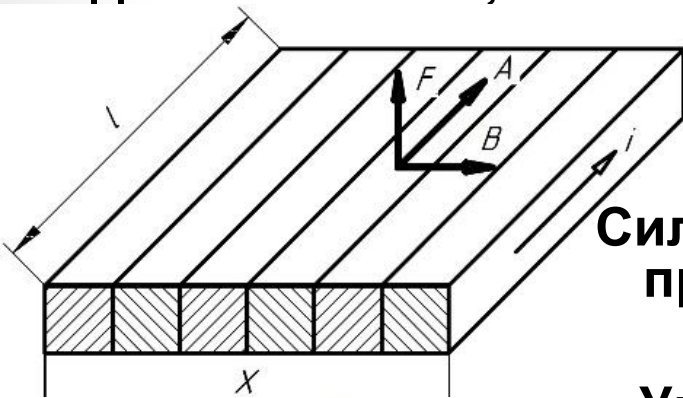
**Пример 3.** Задаваясь значениями тока КЗ равного  $I=10^5$  А,  $d = 0,3$  м,  $r = 0,01$  м,  $l=1$ м получаем

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{0,3}{0,01} - 1\right) \cdot 10^{10} = 6870 \text{ Н}$$

что более чем в 1,5 раза превышает силу воздействия Примера 1 для параллельных шинопроводов.

# Однослойная обмотка электрической машины

- Схема размещения проводников в однослойной обмотке электромашины ЭМ, где  $l$  - длина проводника,  $x$  – текущая длина паза ЭМ,  $A$  – линейная плотность тока (А/м).



Линейная плотность тока  $A$  равна

$$A = \sum \frac{I}{x}, \text{ А/м}$$

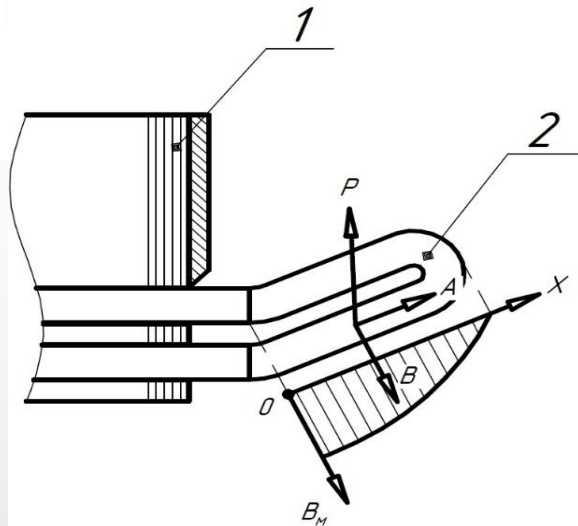
Сила взаимодействия магнитного поля на проводники с током равна

$$F = 10^{-6} B A l x, \text{ Н}$$

Удельное давление  $p$  на единицу площади  $lx$  равно  $p = 10^{-6} B A \text{ Н/м}^2$

Обмотка размещается в пазах статора и фиксируется компаундом и изолирующими материалами, которые благодаря наличию верхних изолирующих клиньев жестко фиксируют проводники в пазу ЭМ.

**Лобовые части обмотки выступают из пазов статора, должны быть дополнительно зафиксированы и являются наиболее слабым местом ЭМ особенно с ростом их мощностей и числа оборотов.**



1-сердечник статора,

2-лобовая часть проводника с линейной плотностью тока  $A$



## Распределение магнитного поля и усилий в лобовой части ЭМ

Лобовые части обмотки ЭМ располагаются группами и слоями, сходными со слоем проводников в СТ. Вокруг обмотки - магнитное поле рассеивания, линейная плотность тока  $A$  в ЭМ значительно меньше, чем в СТ. Из-за большей индуктивности рассеивания в ЭМ нежели в СТ ударный ток КЗ в машинах несколько меньше чем в трансформаторах. Магнитную индукцию  $B$  можно принять равной  $B_0 = 4\pi A$ , эл.-дин. усилие можно принять равным  $p=10^{-6}$  ВА.

Тогда радиальная составляющая эл.-дин. усилия  $p_r$  примет вид

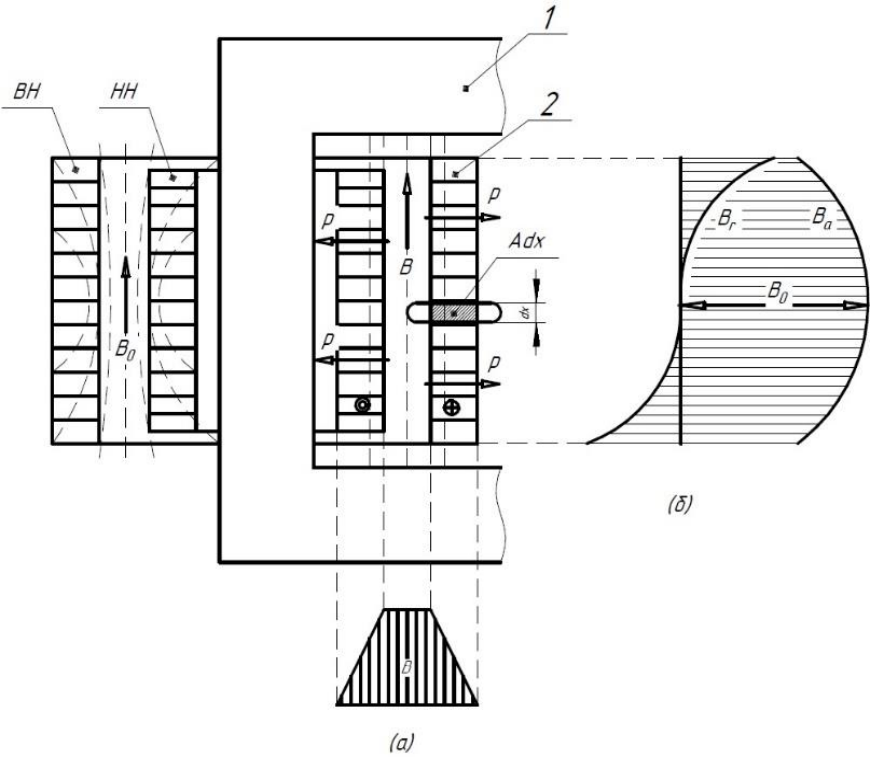
$$p_r = 4\pi \cdot 10^{-7} A^2 \quad (13)$$

**Пример 6.** При линейной плотности тока  $A=40000$  А/м и ударном токе КЗ равном  $15I_n$  радиальное усилие равно  $p_r = 4\pi \cdot 10^{-7} (40000 \cdot 15)^2 = 4520$  Н/м<sup>2</sup>, вдвое ниже, чем для трансформатора в Примере 5.

Эпюра индукции  $B$  достигает максимума в месте вывода обмотки из паза, что приводит к нарушению изоляции вывода при КЗ или токе включения ЭМ. **Механические силы стараются отодвинуть статорную обмотку от ротора, так что может произойти поломка статорных гильз, выступающих из пазов проводников, и пробой изоляции на корпус или между витками и фазами, что особенно вероятно для крупных или быстроходных ЭМ.**

# Обмотки силового трансформатора СТ.

Распределение магнитного поля индукции  $B$  в канале между обмотками СТ и по толщине обмотки



Магнитное поле индукции  $B$  в канале СТ (а) и составляющие магнитной индукции:  $B_r$ - радиальная, создает давление  $p_a$ ,  $B_a$ - осевая, создает давление  $p_r$  (б); 1-сердечник, 2-обмотки ВН и НН.

Закон Ампера к элементарному контуру  $Adx$  на рисунке имеет вид кругового интеграла

$$\int H dx = B dx = 4\pi A dx$$

где  $A = \sum I/x$  (А/м)

Пренебрегая слагаемыми к трем другим сторонам замкнутого контура  $Adx$ , можно получить

$$B_0 = 4\pi A$$

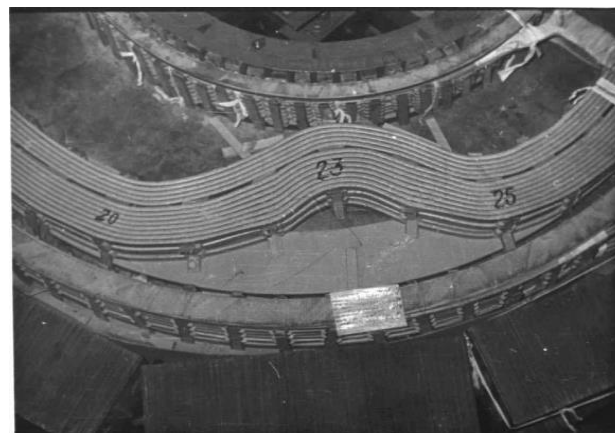
*Магнитный поток  $B$ , пересекая проводники в осевом направлении действуют на растяжение обмотки наружу (из-за противоположных знаков тока и линейной плотности тока  $A$ ).*

Средняя индукция из-за трапецеидального распределения  $B$  равна  $B_0/\sqrt{2}$ .

## Электродинамические Усилия в обмотках СТ.

Радиальное усилие  $p_r$  от осевой составляющей  $B_o$  направлено наружу обмотки и равно  $p_r = 10^{-7} 4\pi A_a^2$

где  $A_a = \sqrt{2} A$



При протекании тока КЗ через трансформатор к внутренней и внешней обмотке прикладываются разные по направлению радиальные силы. Внутренняя обмотка постоянно подвергается сжимающему усилию из-за направления сил внутрь к магнитопроводу, в то время как внешняя обмотка испытывает растягивающее напряжение из-за направленных наружу сил. Обычно напряжение на растяжение не представляет опасности повреждения внешней обмотки. Но сжимающее усилие радиальных сил вызывает повреждение внутренней обмотки, которое называют волной радиальных деформаций.

## Электродинамические Усилия в обмотках СТ.

Теорема Лагранжа для вычисления эл.-маг. сил при радиальной деформации. При применении к электромагнитному полю теорема формулируется следующим образом: в системе контуров с током, находящихся в магнитном поле, электромагнитная сила, стремящаяся изменить данную координату системы, равна производной энергии магнитного поля по данной координате в предположении, что токи в контурах поддерживаются постоянными. Радиальные силы, действующие на обмотки двухобмоточного трансформатора, стремятся

увеличить расстояние между обмотками

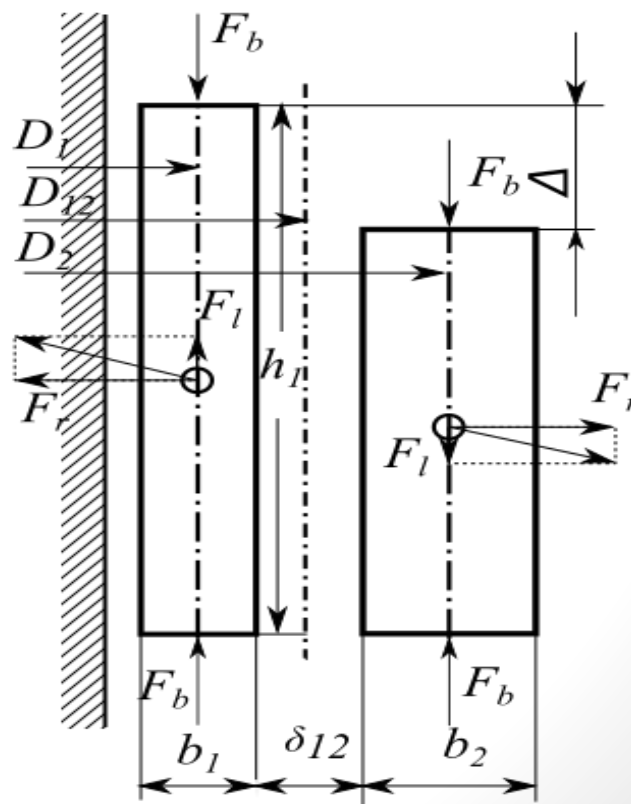
$\delta_{12}$ . Радиальная сила вычисляется как:

$$F_r = \frac{1}{2} I_{max}^2 \frac{\partial L_K}{\partial \delta_{12}}$$

где  $F_r$  – радиальная сила;

$I_{max}$  – амплитуда тока КЗ.

Радиальные силы, действующие на обмотки силового трансформатора.



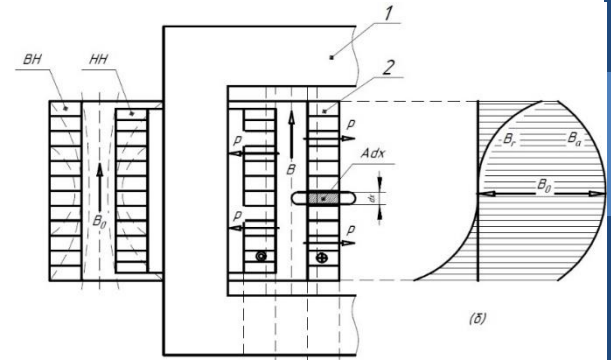
## Электродинамические Усилия в обмотках СТ.

- **Пример 4.** Задаваясь для мощного СТ нормальной линейной плотностью тока  $A=75000$  А/м и током КЗ равным  $20I_n$ , радиальное усилие равно:

$$p_r = 10^{-7} 4\pi(75000 \cdot 20)^2 = 28260 \text{ Н/м}^2$$

Более привычное значение усилия равно 28,6 кг/см<sup>2</sup> или 28,6 атм, что для радиального давления всей цилиндрической обмотки длиной  $l$ , толщиной  $x$  с числом витков  $n$  дает сотни тонн. Такие высокие давления лучше выдерживают более распространенные цилиндрические обмотки нежели прямоугольные обмотки.

Радиальная составляющая  $B_r$  создает осевое усилие  $p_a$ , а осевая составляющая  $B_o$  создает радиальное усилие  $p_r$ . Как следует из эюр радиальная составляющая  $B_r$  в середине обмотки мала, а к торцам обмотки принимает наибольшее значение. Наоборот, осевая составляющая  $B_o$  в середине обмотки принимает наибольшее значение, а к торцам снижается.





## Электродинамические Усилия в обмотках СТ.

- **Пример 5.** Для силового трансформатора мощностью 30000 кВА примем значения:  $a=1,25$  м,  $b=0,04$  м,  $c=1,3$  м,  $d=0,1$  м,  $A=75000$  А/м,  $I_k=20 I_n$  значение  $\ln(a/b \cdot d/c)$  равно 0,875. Тогда осевое усилие составит:

$$p_a = 10^{-7} \cdot 4 \cdot (75000 \cdot 20) \cdot 2 \cdot 0,875 = 8000 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \text{ или } 8 \text{ кг/см}^2$$

В результате осевое усилие в 4 раза ниже радиального давления. Однако, осевые усилия от слоев обмоток складываются к середине обмотки и могут достигать сотен тонн. Пока отношения  $a/b$  и  $c/d$  почти равны, осевые усилия остаются допустимыми. Если торцы одной обмотки выступают относительно друг друга, то  $\ln$  этих соотношений резко возрастает, а с ним и резко растет осевое усилие.

Сжатие обмоток осуществляется прокладками из твердого изолирующего материала, осевое усилие которого больше чем  $p_a$  при КЗ, что предотвращает разрушение обмотки



**Осевые деформации обмотки  
НН трансформатора типа  
ТДЦ-250000/220 ( $\Delta Z_k = +20\%$ ).**



## Электродинамические Усилия в обмотках СТ.

- Возможно также возникновение тангенциальных сил скручивания обмоток. Эти силы возникают под действием осевых сил, увеличиваются со снижением числа витков и значительно больше в обмотке НН нежели в обмотке ВН. В результате эл.-дин. действия тока КЗ возникли остаточные деформации обмотки ВН со скручиванием обмотки и полеганием витков на ребро под действием тангенциальных сил.



**Остаточные деформации обмотки ВН автотрансформатора типа АДЦТН-250000/500/110 со скручиванием обмотки и полеганием витков на ребро под действием тангенциальных сил.**

# Математическая модель радиальной деформации одного витка обмотки

Представлена в виде уравнения. Допущения, принятые при составлении модели: максимальный размер выпуклости принимается равным размеру вогнутости:  $a$ , диапазон выпуклости принимается равным диапазону вогнутости: угол  $\Phi/2$ .

- В качестве уравнения, описывающего вогнуто-выпуклую деформацию витка токопровода выбрана функция  $\varepsilon(\varphi)$ , описанная в полярных координатах

$$\varepsilon(\varphi) = a \cdot \sin\left(\frac{2\pi\varphi}{\Phi}\right) \quad \text{при} \quad 0 \leq \varphi < \Phi$$

где  $a$  – максимальная деформация – предельное отклонение искаженного участка от идеального состояния,

$\Phi$  – диапазон деформации – центральный угол, в пределах которого наблюдается деформация.

$\varphi$  – аргумент функции, угол, отложенный по часовой стрелке от вертикальной полуоси.

## Индуктивность короткого замыкания

рассчитывается по формуле

$$L_k = \frac{\mu_0 \omega^2 \rho_1 D_{12} (\delta_{12} + \frac{b_1 + b_2}{3})}{h}$$

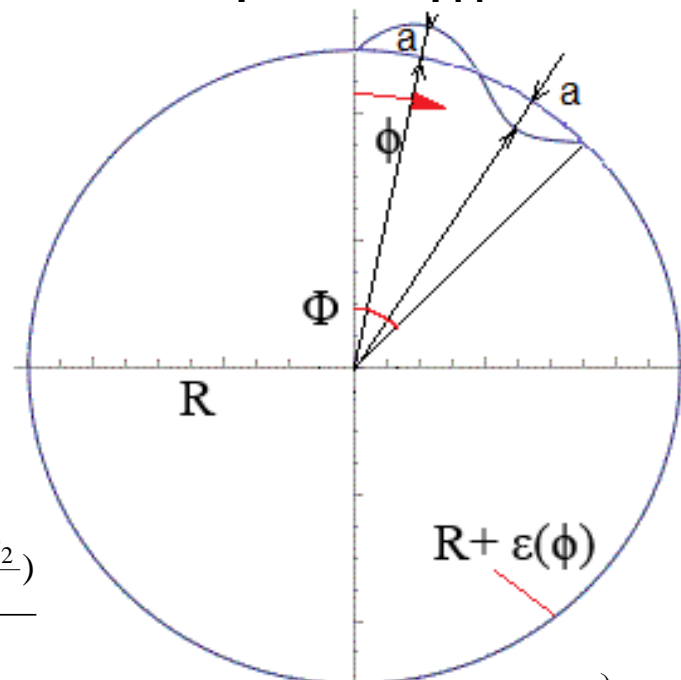
где  $b_1$  и  $b_2$  – толщина обмоток;

$\delta_{12}$  – ширина канала между обмотками.

## Радиальная сила, действующая на обмотку,

$$F_r = \frac{\mu_0 (I_{\max} \omega)^2 \rho_1 \pi (D_{12} + a \cdot \sin(2\pi\varphi/\Phi))}{2h}$$

где  $F_r$  – радиальная сила;  $\mu_0$  – магнитная проводимость;  $I_{\max}$  – амплитуда тока КЗ;  $\omega$  – количество витков обмотки;  $\rho_1$  – коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному (коэффициент Роговского);  $D_{12}$  – расстояние стенки бака до середины промежутка между обмотками;  $h$  – высота обмотки.



# Математическая модель эллиптической деформации

Уравнение для эллиптической деформации в первом приближении при малых значениях отношения  $\varepsilon/R$  выглядит следующим образом

$$\delta(r, \varphi) = r - R = \varepsilon \cdot \cos(2\varphi)$$

где  $R$  – радиус недеформированной обмотки,  $r$  – кривая, описывающая эллиптическую деформацию,

$$\varepsilon = R - r \quad (\varphi = 90^\circ)$$

При малых значениях отношения  $\varepsilon/R$  выполняется

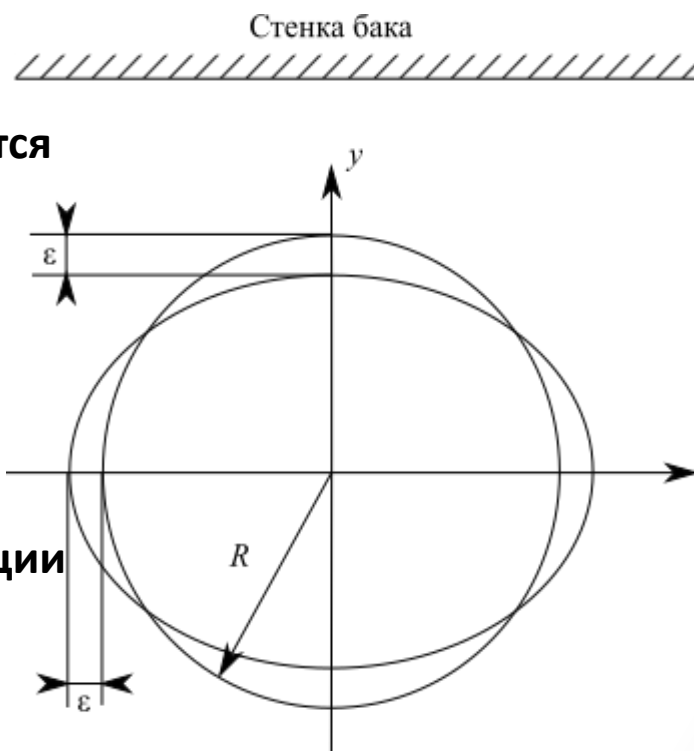
Условие сохранения длины витка

до и после деформации:

$$l = 2\pi R \left(1 + \frac{\varepsilon^2}{4R^2}\right) \approx 2\pi R$$

Подставляя уравнение эллиптической деформации в формулу силы при радиальной деформации, получим

$$F_r = \frac{\mu_0 (I_{\max} \omega)^2 \rho_1 \pi (D_{12} + \varepsilon \cdot \cos(2\varphi))}{2h}$$

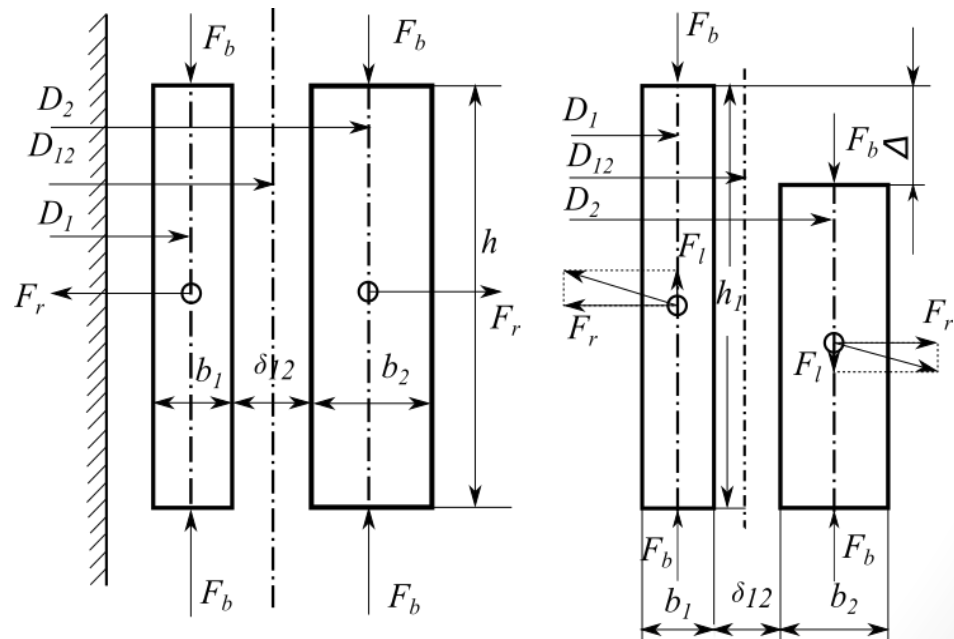
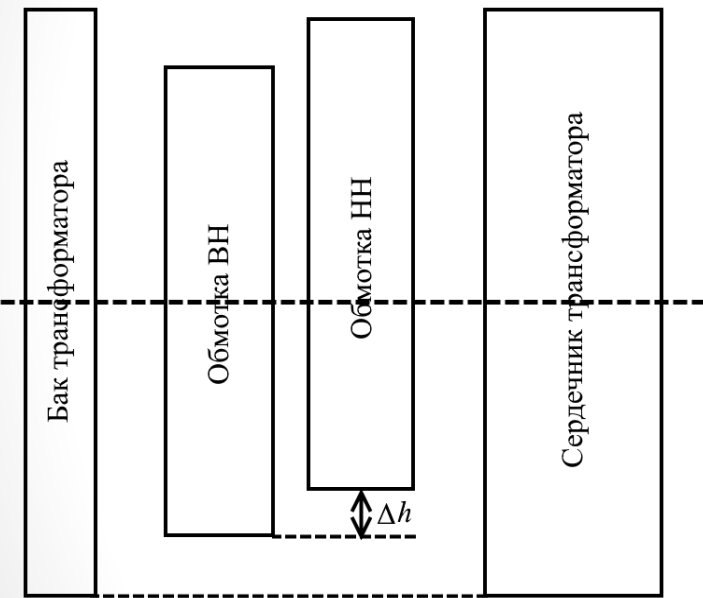


Эллиптическая деформация витка обмотки

# Математическая модель осевой деформации

Существует три вида деформаций из-за осевых сил - осевого смещения, осевого изгиба и наклона проводника. Из-за различного направления тока во внешней и внутренней обмотках каждая обмотка испытывает различное направление осевых сил одновременно. Поэтому крайне важно иметь идеальное выравнивание между обмотками относительно центральной линии. Небольшое смещение в одной из обмотк может вызвать асимметрию распределения сил, тем самым дополнительно увеличивая действие осевых сил на обмотки.

Если рассматривать осевую деформацию как изменение высоты обмотки, тогда формула осевой деформации будет иметь вид  $\Delta = h_{BH} - h_{HH}$



$$F_a = - \frac{\mu_0 (I_{\max} \omega)^2 \rho_1 \pi D_{12} \delta'}{2(h_{HH} + \Delta)}$$

$$\delta' = \delta_{12} + \frac{b_1 + b_2}{3}$$

это предельная ширина главного канала рассеяния.

Осевые силы, действующие на обмотку силового трансформатора



# Общий вид генераторного испытательного центра КЕМА в г. Арнем с функциональной разверткой.



# Функциональная развертка сетевого испытательного центра CESI на подстанции Rondissone, расположенной в предместье г. Турин.







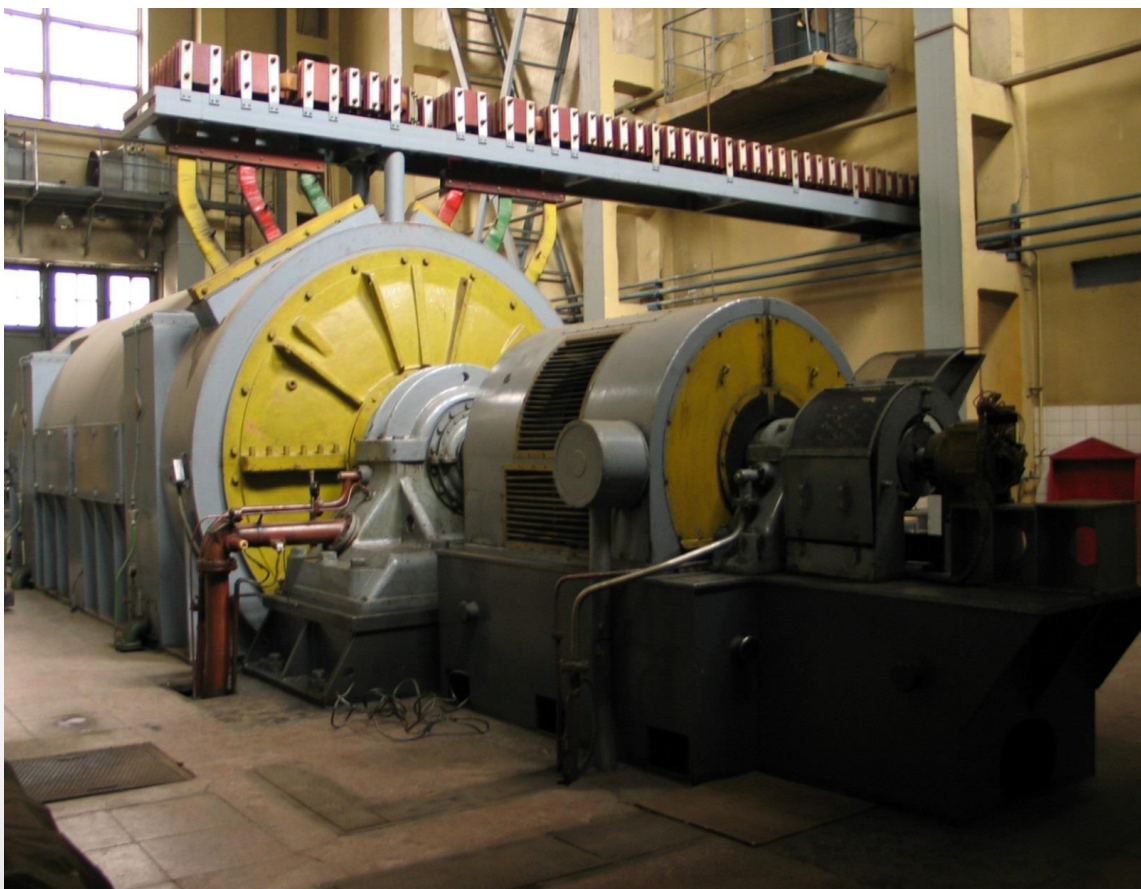


# Национальная испытательная лаборатория на напряжение 1200 кВ ВІНА (Индия).



# Ударные генераторы (ФГУП ВЭИ)

На слайде приведен снимок УГ ТИ-100 (ВЭИ), который в сочетании с понижающим трансформатором позволяет проводить КИ в прямой схеме в трехфазном режиме. Напряжение ТИ-100 равно 12 кВ, мощность 100 МВА, число оборотов 3000 об/мин., ударный ток 118 кА, отдача энергии на индуктивной нагрузке 3,6 МДж.

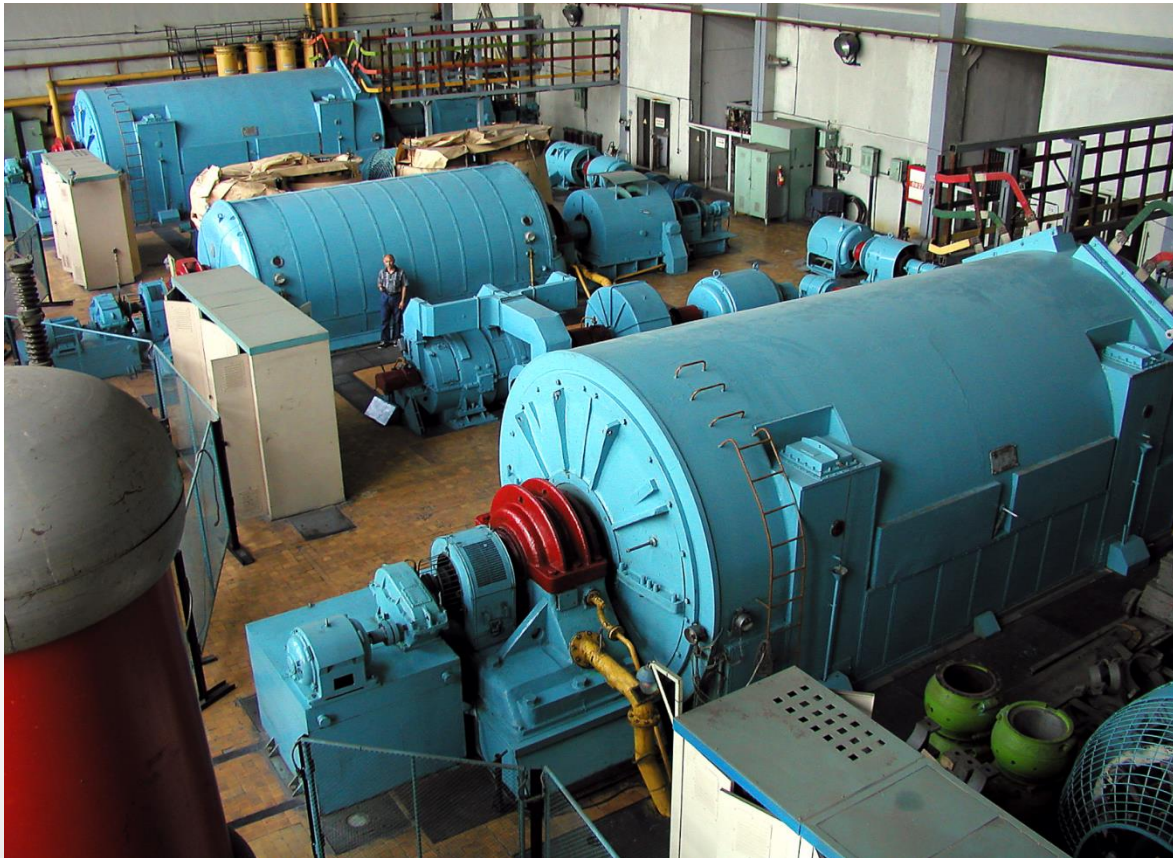


Ударный генератор  
ТИ-100 (ВЭИ)



# Ударные генераторы (НТЦ Россети ФСК ЕЭС)

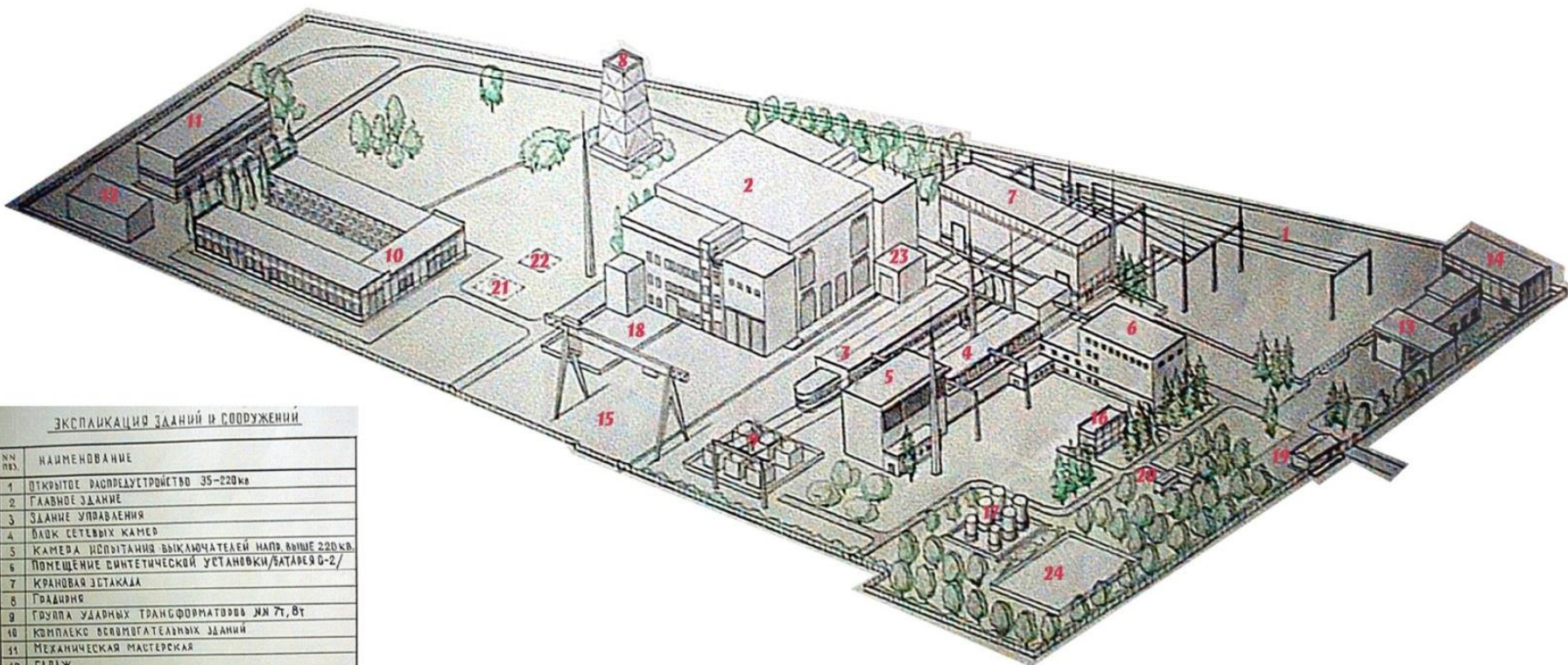
Большие возможности в части КИ в прямой схеме с УГ имеет ИЦ НТЦ Россети ФСК ЕЭС. На слайде показан машинный зал с УГ мощностью каждый 120 МВА ИЦ НТЦ ФСК ЕЭС, причем 2 УГ производства завода Электросила (1960 г.), а 1 УГ производства Германия (1920 г.).



Машинный зал с ударными генераторами мощностью каждый 120 МВт ИЦ НТЦ ФСК ЕЭС Россети.

# АО «НТЦ Россети ФСК ЕЭС»

## НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ АППАРАТУРЫ

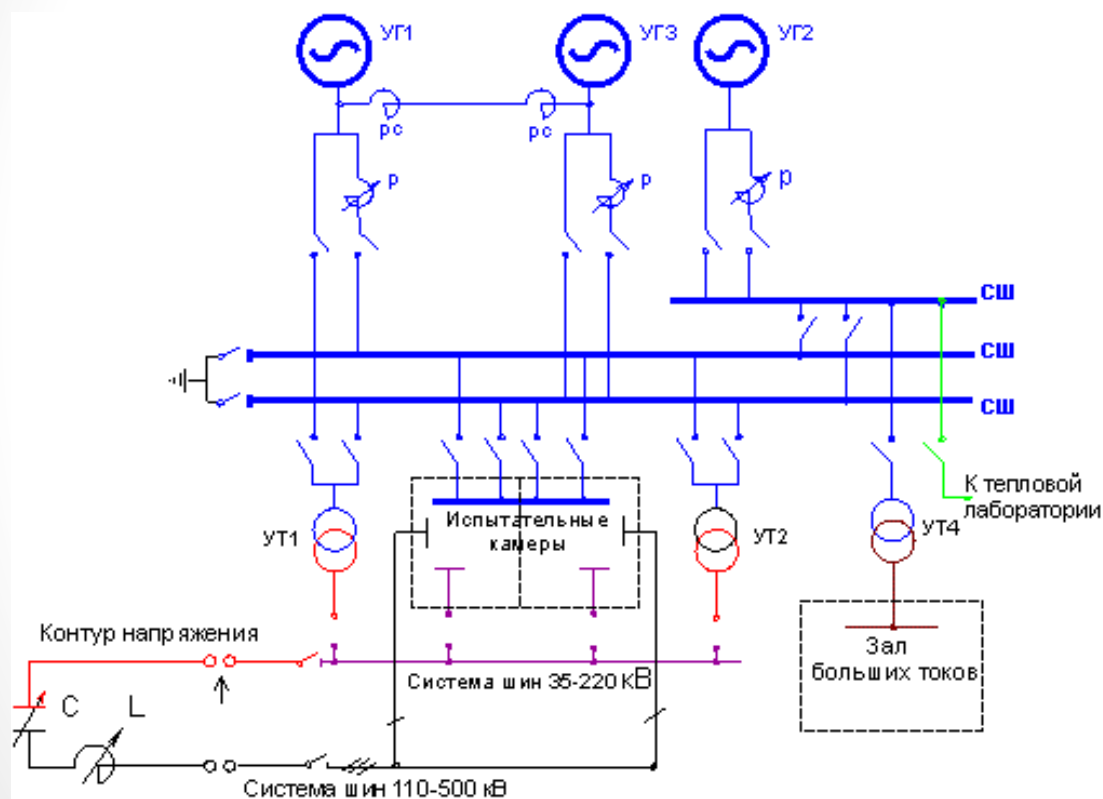


### ЭКСПЛИКАЦИЯ ЗДАНИЙ И СООБУЖДЕНИЙ

№ п/п	НАИМЕНОВАНИЕ
1	ОТКРЫТОЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО 35-220кВ
2	ГЛАВНОЕ ЗАДАНИЕ
3	ЗАДАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ
4	БЛОК СЕТЕВЫХ КАМЕР
5	КАМЕРА ИСПЫТАНИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ НАПР. ВЫШЕ 220кВ
6	ПОМЕЩЕНИЕ СИНТЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ/БАТАРЕЯ 0-2/
7	КРАНОВАЯ ЭСТАКАДА
8	Градирня
9	ГРУППА УДАРНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ МН 7Т, 8Т
10	КОМПЛЕКС ОСВОБОДИТЕЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ
11	МЕХАНИЧЕСКАЯ МАСТЕРСКАЯ
12	ГАРАЖ
13	МАТЕРИАЛЬНЫЙ СКЛАД
14	СКЛАД N 4
15	ОТКРЫТЫЙ СКЛАД С КОЗЛОВЫМ КРАНОМ К-100У
16	КОМПРЕССОРНАЯ 24 МПа
17	ОТКРЫТЫЙ СКЛАД МАСЛА
18	ОТКР. ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ПЛОЩАДКА ЛАБОРАТ. БОЛЬШИХ ТОКОВ
19	ПРОХОДНАЯ
20	ПОМЕЩЕНИЯ ДЛЯ КОМАНДИРОВАННОГО ПЕРСОНАЛА
21	АВАРИЙНЫЙ МАСЛОПРИЕМНИК
22	СТАНЦИЯ ПЕРЕКАЧКИ
23	КАМЕРА ИСПЫТАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
24	СПОРТИВНАЯ ПЛОЩАДКА



# Главная электрическая схема



- 500 кВ
- 220 кВ
- 110 кВ
- 10 кВ
- 6 кВ
- 0,8 кВ

**УГ1, УГ3** - ударные генераторы (источники энергии), мощность КЗ каждого - 2500 МВА (при параллельной работе УГ1 и УГ3 - 5000 МВА).  
**УГ2** - ударный генератор, мощность КЗ - 1270 МВА.  
**УТ1, УТ2** - группы ударных трансформаторов с обмотками 12 / 26x2 кВ.  
**УТ4** - группа ударных трансформаторов с обмотками 12 / 0,4 - 0,8 кВ.  
**Р** - регулируемый реактор 12 кВ.  
**РС** - реактор синхронизирующий 12 кВ.  
**СШ** - системы шин 12 кВ.  
**С** - конденсаторная батарея контура напряжения с энергией заряда - 0,864 МДж.



## Сравнение с ведущими мировыми центрами

№ п/п	Вид испытаний	КЕМА (Нидерланды)	CESI (Италия)	Siemens (Германия)	ВЭИ (Россия) *	НТЦ ФСК ЕЭС Россети (Москва)
1	Испытания на стойкость при КЗ: 1. 3-х фазный режим;	390 кА; 0,42 с	120 кА ; 1 с	210 кА ; 3 с	30 кА; 1 с	140 кА ; 4 с
	1. 1 фазный режим	-----	-----	-----	90 кА, 1 с	180 кА 4 с
2	Испытания на коммутационную способность: 1. 3-х фазный режим	8400 МВА – 456 кВ	800 МВА – 420 кВ	6400 МВА, 240 кВ	2000 МВА, 220 кВ (полный полюс)	1620 МВА 90 кВ
	1. 1 фазный режим		400 МВА – 420 кВ			1560 МВА - 156 кВ
3	Синтетические испытания	100 кА – 525 кВ 1 000 кВ (max)	63 кА – 315 кВ; 550 кВ (max)	100 кА, 525 кВ 1000 кВ (max)	40 кА – 420 кВ	220 кВ; 50 кА

# Сравнение с ведущими Испытательными центрами в России

№ п/п	Вид испытаний	НИИВА* (С.Петербург) <b>Не существует</b>	НТЦ ФСК ЕЭС Россети (Москва)	ВЭИ (Москва)*
1	Испытания на стойкость при КЗ:			
	1. 3-х фазный режим;	100 кА; 3 с	140 кА ; 4 с	30 кА; 1 с
	1. 1 фазный режим	-160 ( 400) кА 3 с	180 кА 4 с	90 кА, 1 с
2	Испытания на коммутационную способность:			
	1. 3-х фазный режим	2000 МВА – 500 кВ *	1620 МВА 90 кВ	2000 МВА, 220 кВ (полный полюс)
	1. 1 фазный режим		1560 МВА -156 кВ	
3	Синтетические испытания	63 кА – 500 кВ	220 кВ; 50 кА	90 кА 1 с – 420 кВ

# Испытания трансформатора типа ТРДНС-80000/330 на стойкость к токам КЗ на площадке АО «НТЦ ФСК ЕЭС Россети» (2022 г.).



В режиме ВН-НН<sub>1</sub>  
токи КЗ составили:

$$I_{уд.ВН} = 1,8 \text{ кА}$$

$$I_{уд.НН} = 29 \text{ кА}$$

В режиме ВН-  
(НН<sub>1</sub>+НН<sub>2</sub>) токи  
КЗ:

$$I_{уд.ВН} = 2,5 \text{ кА}$$

$$I_{уд.НН} = 51 \text{ кА}$$

**Испытания**  
**прошли успешно**

# Сравнительные испытательные возможности ФГУП ВЭИ и НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС

Наименование вида испытаний	ВЭИ (Москва)	НТЦ ФСК Россети (Москва)
Испытания электрической прочности изоляции	Испытания грозовым импульсом 1,2/50	до 0,7 МВ
	Испытания коммутационным импульсом 250/2500	+2,0 МВ -2,2 МВ
	Испытания переменным напряжением	до 2250 кВ
	Испытания постоянным напряжением	до 1200 кВ
	Испытания под дождем	до 1000 кВ
	Испытания в условиях увлажнения и загрязнения	до 600 кВ
	Испытания в условиях соленого тумана	до 220 кВ
	Измерения частичных разрядов	до 500 кВ
	Измерение радиопомех	до 500 кВ
	Испытания на трекинг-эрозионную стойкость	до 220 кВ
	Испытания ввода на тепловой пробой	до 500 кВ
	Комбинированные испытания (высокое напряжение + нагрев + механическая нагрузка)	100 кВ -50 +90°C 10 тонн
	Коммутационные испытания (КИ), испытания на локализационную способность	Прямые трехфазные испытания
12 кВ; 50 кА 26 кВ; 40 кА 45 кВ; 31.5 кА		
48 кВ; 17 кА 80 кВ; 10 кА		
Прямые однофазные испытания		12 кВ; 100 кА
		24 кВ; 37 кА
		70 кВ; 12 кА
		12 кВ; 100 кА
Синтетические однофазные испытания выключателей на отключающую способность		250 кВ; 100 кА
		250 кВ; 80 кА
Синтетические однофазные испытания выключателей на включающую способность		220 кВ; 63 кА 250 кВ; 160 кА

# Сравнительные испытательные возможности ФГУП ВЭИ и НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС

Наименование вида испытаний	ВЭИ (Москва)	НТЦ ФСК Россети (Москва)	
Испытания на нагрев номинальным током	Трёхфазные испытания	2000 А	14000 А
	Однофазные испытания	1000 А	18000 А
Испытания на стойкость к сквозным токам к.з.	Однофазные испытания	Пик тока 200 кА; действ. знач. 80 кА; 3 с	Пик тока 460 кА; действ. знач. 180 кА; 4 с
	Трёхфазные испытания		Пик тока 360 кА; действ. знач. 140 кА; 4 с
Климатические испытания	Климатические испытания	Объем 8 м <sup>3</sup> -60 +300°С Влажность до 98%	

# Подземные подстанции с элегазовым (SF<sub>6</sub>) оборудованием

Опыт применения систем мониторинга на силовом элегазовом (SF<sub>6</sub>) оборудовании получен на уникальных, подземных подстанциях 220 кВ. Внешний вид подземной подстанции 220 кВ Сколково на слайде.

## Зачем требуется возводить подземные подстанции?

В условиях больших городов всегда ощущается нехватка территории для строительства и дороговизна земли. Особенно это актуально для Японии и её мегаполисов. Поэтому компания Тошиба начала первой в мире строительство таких подстанций в Японии и поставила элегазовые трансформаторы для двух подземных подстанций в Подмосковье (Сколково и Союз).





# Подземные подстанции с элегазовым (SF<sub>6</sub>) оборудованием

На каждой из двух подземных подстанций (Сколково и Союз) применено следующее электрооборудование:

- по 2 элегазовых трансформатора 63 МВА, 220/20/20, производства компании Тошиба;
- комплектное распределительное устройство элегазовое (КРУЭ) 220кВ, производства компании Сименс;
- система мониторинга КРУЭ и силовых трансформаторов, основанная на регистрации частичных разрядов в диапазоне ультравысокой частоты (УВЧ), производства фирмы QUALITROL.

УВЧ-сенсоры подключаются к блокам, выполняющим первичную обработку сигнала — БОП, установленным в непосредственной близости от КРУЭ (слева внизу).

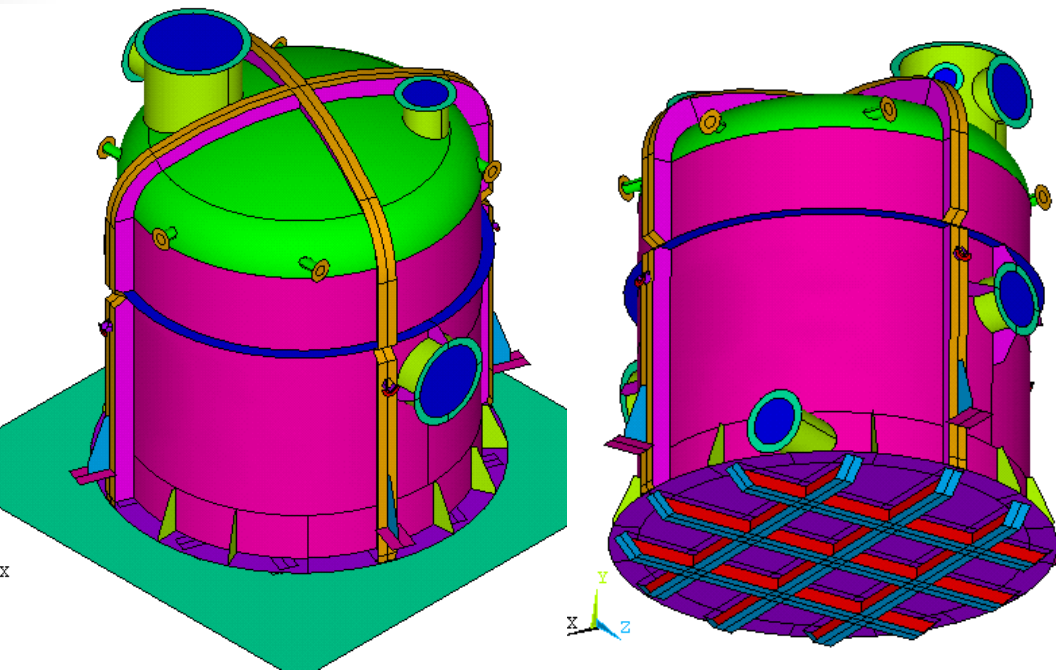
Функционально БОП выполняет следующие задачи:

- формирование УВЧ-сигнала,
- фиксацию/определение УВЧ-сигнала (логарифмическая);
- оцифровку сигнала;
- синхронизацию данных с периодами питающей сети.



# Силовой элегазовый трансформатор типа ОРЭНЦН-21000/220-У1 (охладитель элегаз-вода)

Решения по конструкции основных узлов трансформатора: остова, обмоток НН, ВН и РО, отводов НН, отводов ВН и РО, активной части, бака трансф-ра и бака РПН. Проведены следующие расчеты: электромагнитный расчет, расчет изоляции, расчет электродинамической стойкости обмоток при коротких замыканиях, газодинамический расчет системы охлаждения, тепловой расчет обмоток и магнитной системы, расчет бака трансформатора и бака РПН на механическую прочность.



Силовой элегазовый трансформатор 220 кВ мощностью 63 МВА – это группа из трех однофазных трансформаторов 220 кВ с элегазовой изоляцией и охлаждением.

Трансформатор предназначен для нужд энергетики для работы в нормальных условиях, для наружной установки; может работать также в составе подземной подстанции.

Расчетная схема основного бака

# Результаты расчета, необходимые для определения сил прессовки при сушке обмоток и проверки прочности прессующей конструкции

**ELDINST**, существует потребность проведения качественных расчетов на этапе предварительного проектирования и проведения **НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ** для оценки электродинамической стойкости обмоток к токам КЗ

- **Заключение - Электродинамическая стойкость обмоток трансформатора обеспечена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52719-2007.**

Таблица 5 - Результаты расчета

Концентр	НН11	НН22	ВН	РО11	РО22
Критическая сила полегания проводников, рассчитанная без учета склейки проводников, kN (Pcr)	673	655	707	665	665
Максимальное осевое усилие, kN (Nmax)	629	630	884	98	98
Максимальное напряжение сжатия в дистанцирующих прокладках, МПа (sg10)	33.7	33.7	25.1	10.7	10.7
Действительная средняя площадь распределения осевых внутренних усилий в дистанцирующих прокладках, м <sup>2</sup> (Fsm)	0.021	0.021	0.038	0.009	0.009
Действительная средняя площадь распределения осевых внутренних усилий в мягкой изоляции проводов, м <sup>2</sup> (Fwim)	0.019	0.019	0.035	0.009	0.009
Коэффициент жесткости секущей, MN/m (Cs)	19.46	19.46	34.34	4.18	4.18

## Максимальные значения наибольших осевых сил на:

Главный стержень

верхнюю прессующую конструкцию – 961 kN;  
верхние ярмовые балки – 73 kN;  
верхнее ядро – 888 kN;

нижнюю прессующую конструкцию – 1108 kN;  
нижние ярмовые балки – 125 kN;  
нижнее ядро – 983 kN.

3.3 Усилия на верхних торцах верхней концевой изоляции концентров в момент времени, когда на верхнюю прессующую конструкцию действует наибольшая сила, (Nt):

Главный стержень

НН11 – 275 kN;  
НН22 – 275 kN;  
ВН – 365 kN;  
РО11 – 21 kN;  
РО22 – 21 kN.

3.4 Усилия на нижних торцах нижней концевой изоляции концентров в момент времени, когда на нижнюю прессующую конструкцию действует наибольшая сила, (Nb):

Главный стержень

НН11 – 301 kN;  
НН22 – 302 kN;  
ВН – 457 kN;  
РО11 – 22 kN;  
РО22 – 22 kN.

# Расчетные потери в элегазовом трансформаторе, кВт

Трансформатор	Потери к.з.	Потери х.х.	Общие потери
Трансформатор Hyundai Heavy Industries	113.4	13.5	126.9
ОРЭНЦН-21000/220- У1	79.1	19.6	98.7

## **Выводы**

- **Приведены упрощенные выражения для расчета механических действий тока КЗ на основные элементы электростанции и подстанции, которые включают шинопроводы, выключатели, разъединители, электрические машины и трансформаторы. Даны примеры расчетов индукции магнитного поля, механических сил и давлений, которые определяют динамическую стойкость электрооборудования.**
- **Упрощенные качественные расчеты позволяют на этапе предварительного проектирования оценить влияние ключевых параметров на выбор надлежащих элементов и возможный диапазон их изменения в процессе проектирования, эксплуатации и модернизации.**
- **Проведено сравнение с испытательных возможностей российских ИЦ АО «НТЦ ФСК Россети» и ФГУП ВЭИ с ведущими мировыми центрами по испытаниям электрооборудования.**



# Новинки, вышедшие в печать

## Учебное пособие для магистров, 2021

А. Ю. Хренников, В. Г. Точилкин



### ЭКСПЛУАТАЦИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Учебно-методическое пособие



## ДИРЕКТ-МЕДИА

Хренников А. Ю., Точилкин В.Г. Эксплуатация релейной защиты и автоматики. Издательство: Директ-Медиа. Москва | Берлин. 2021, 216 с., ил. Вопросы организации и производства работ при выполнении работ в действующих устройствах РЗА, в цепях вторичной коммутации на основе действующих документов Минэнерго РФ, стандартов и РД ПАО «Россети». Даны требования к персоналу РЗА, проверка устройств первичным током и напряжением, снятие векторных диаграмм, объемы испытаний при различных видах технического обслуживания устройств РЗА (УРЗА), технологическим нарушениям, связанным с отказом или неправильной работой УРЗА.

# Новинки, вышедшие в печать



Хренников А. Ю., Вахнина  
В.В., [Кувшинов](#)  
А.А., [Александров](#) Н.М. Силовые  
трансформаторы на  
энергетических объектах :  
испытания, диагностика,  
дефекты, повреждаемость,  
мониторинг. Учебное пособие  
для магистров. Москва | Берлин,  
Издательство: [Директ-Медиа](#),  
2022, ISBN: 978-5-4499-2647-0.

**Учебное пособие для  
магистров, 2022**

# Новинки, вышедшие в печать

СРЕДНЕЕ  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ  
ОБРАЗОВАНИЕ

А.Ю. Хренников

## ОБСЛУЖИВАНИЕ АВТОМАТИКИ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Рекомендовано  
Экспертным советом УМО в системе ВО и СПО  
в качестве **учебного пособия** для специальностей  
«Электромонтер по техническому обслуживанию электростанций и сетей»  
и «Электромонтер по ремонту и обслуживанию электрооборудования  
(по отраслям)» среднего профессионального образования

**BOOK.ru**  
ЭЛЕКТРОННО-БИБЛИОТЕЧНАЯ СИСТЕМА  
КНОРУС • МОСКВА • 2022

**Новинки, вышедшие в печать**

# Учебное пособие для магистров Техническая диагностика и аварийность электрооборудования

Александр Хренников

Техническая диагностика и аварийность электрооборудования

Учебное пособие



16+

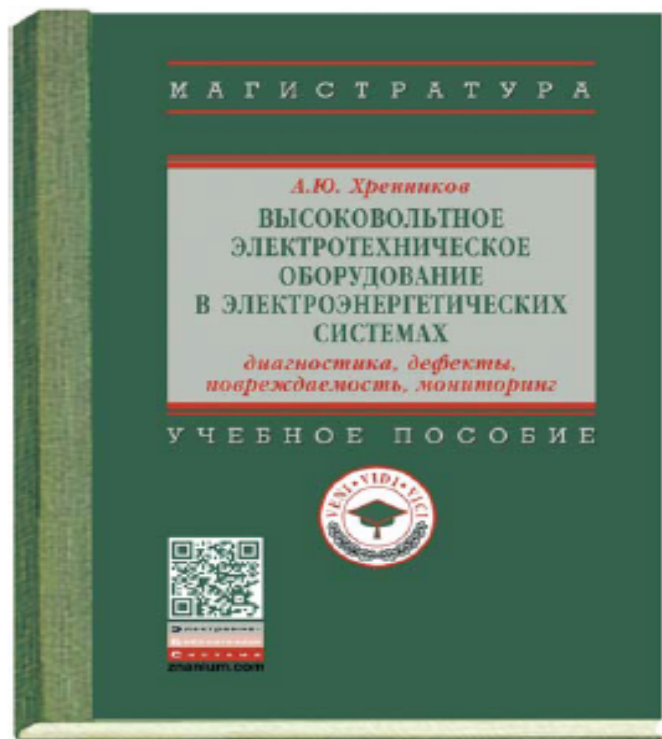
**ЛИТРЕС** <https://www.litres.ru/a/leksandr-urevich-hr/tehnicheskaya-diagnostika-i-avariynost-elektrooborudo/>

Анализ основных методов диагностики электрооборудования: трансформаторов, реакторов, трансформаторов тока и напряжения, разъединителей, турбогенераторов, ОПН и т.д. Приведены примеры повреждений и расследования технологических нарушений маслонаполненного трансформаторно-реакторного оборудования в процессе эксплуатации.

# Учебное пособие для

**А.Ю. ХРЕННИКОВ**

**«Высоковольтное электротехническое оборудование в электроэнергетических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг»**



**Издательство «ИНФРА-М»,  
Москва**

В издательстве «ИНФРА-М» в 2019 году вышла книга **Александра Юрьевича ХРЕННИКОВА** «**Высоковольтное электротехническое оборудование в электроэнергетических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг**» объемом 186 с.

ISBN: 978-5-16-014439-9

Книга является учебным пособием для магистратуры.

Приобрести можно в книжных магазинах или на сайте издательства

[https://infra-m.ru/catalog/energetika\\_promyshlennost/vysokovoltnoe\\_elektrotekhnicheskoe\\_oborudovanie\\_v\\_elektroenergeticheskikh\\_sistemakh\\_diagnostika\\_defe/?sphrase\\_id=131084](https://infra-m.ru/catalog/energetika_promyshlennost/vysokovoltnoe_elektrotekhnicheskoe_oborudovanie_v_elektroenergeticheskikh_sistemakh_diagnostika_defe/?sphrase_id=131084)

Необходимо связаться с отделом продаж издательства

Ирина Александровна Лобанова

Менеджер отдела продаж

Тел.: +7 (495) 280-15-96 (доб. 222)



# Использование элементов искусственного интеллекта: компьютерная поддержка оперативных решений в интеллектуальных электрических сетях



**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ. МАГИСТРАТУРА**

**Хренников А.Ю., Любарский Ю.А.**

**Использование элементов искусственного интеллекта: компьютерная поддержка оперативных решений в интеллектуальных электрических сетях**

**ЛИТРЕС** <https://www.litres.ru/aleksandr-urevich-hr/ispolzovanie-elementov-iskusstvennogo-intellekta-komp/>

при использовании ИИ рассмотрена многоагентная структура интеллектуальной автоматизированной структуры диспетчерского управления. Анализ аварий и возможность формирования (на основе данных оперативно-информационного комплекса) оперативной справки об аварии в энергосистеме. Организация расследований технологических нарушений и аварий на подстанциях.



# Интеллектуальные электрические сети: компьютерная поддержка диспетчерских решений

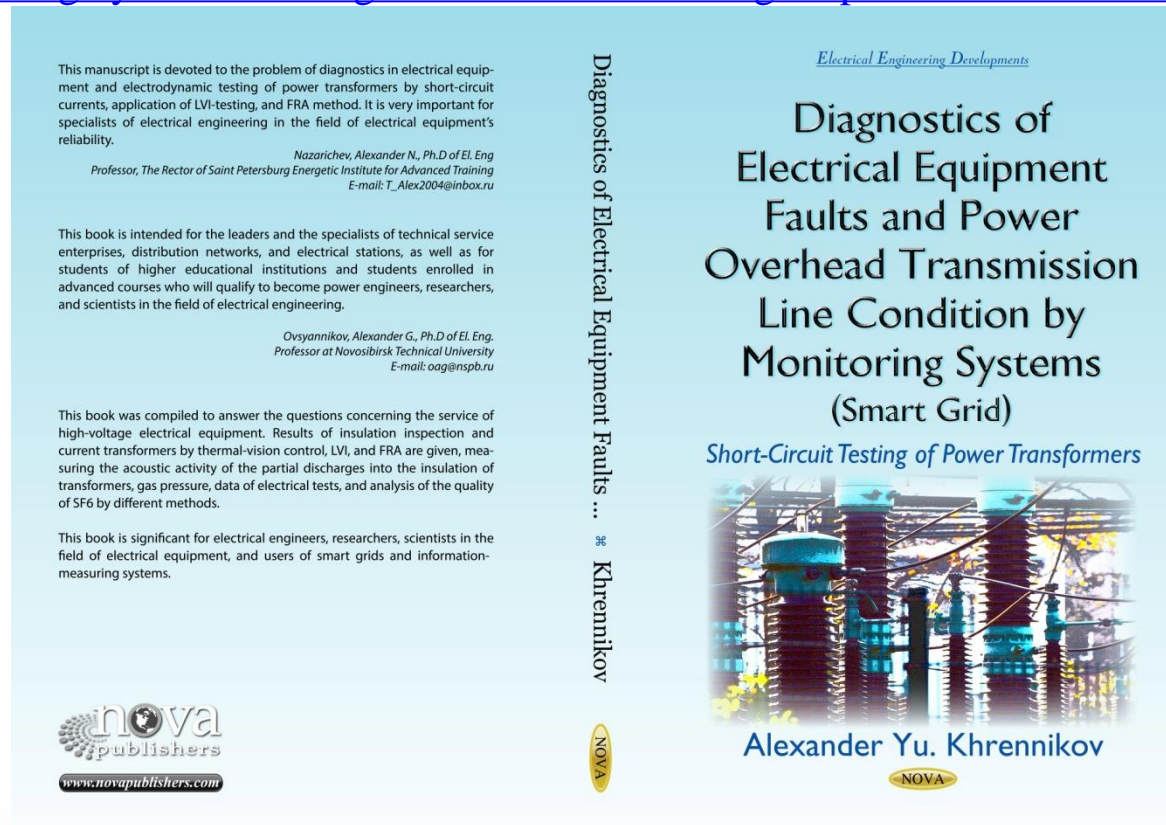
Учебное пособие / Ю.Я. Любарский, А.Ю. Хренников. — Москва :ИНФРА-М, 2021. — 160 с. — (Высшее образование: Магистратура). — DOI 10.12737/1134516.

Для «умных» электрических сетей рассмотрены интеллектуальные программные средства, выполняющие новые функции и повышающие уровень компьютерной поддержки диспетчерских решений. Учитывая, что одна из целей построения «умных» сетей — обеспечение восстановления после аварий, основное внимание в учебном пособии уделяется проблемам диагностики нештатных ситуаций, интеллектуальному мониторингу состояний электрических сетей, планированию послеаварийного восстановления электроснабжения. Новый вид программного тренажера для диспетчеров электрических сетей — тренажер анализа нештатных ситуаций.



# Опубликованные книги

- Khrennikov A.Yu. Diagnostics of Electrical Equipment Faults and Power Overhead Transmission Line Condition by Monitoring Systems (Smart Grid): Short-Circuit Testing Of Power Transformers (*Книга*). Nova publishers, New York, 2016, USA, p. 188, ISBN: 978-1-63484-159-7 <https://novapublishers.com/shop/diagnostics-of-electrical-equipment-faults-and-power-overhead-transmission-line-condition-by-monitoring-systems-smart-grid-short-circuit-testing-of-power-transformers/>

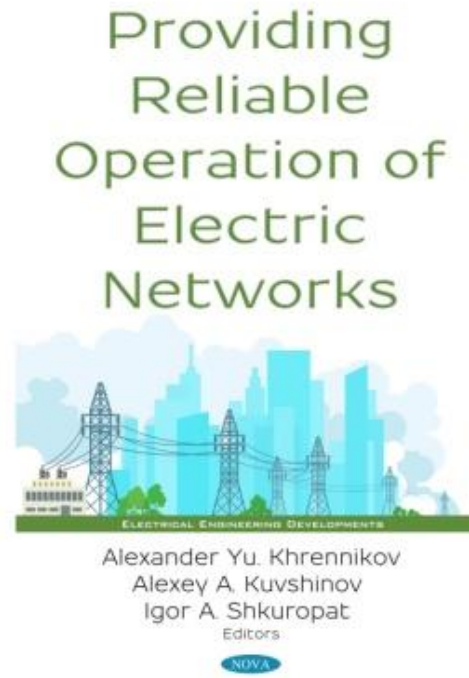


# Опубликованные книги

- Khrennikov A. Yu., Kuvshinov A.A., Shkuropat I.A. Providing Reliable Operation of Electric Networks (*Книга*). Nova science publishers, New York, 2019, USA, p. 308, ISBN: 978-1-53615-422-1  
<https://novapublishers.com/shop/providing-reliable-operation-of-electric-networks/>



Providing Reliable Operation of Electric Networks • Khrennikov et al.





# Учебные пособия

А.Ю. Хренников, В.Г. Гольдштейн

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА,  
ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ И РЕСУРСЫ  
СИЛОВЫХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ И РЕАКТОРОВ



МОСКВА  
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ  
2007

ДИАГНОСТИКА И ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ  
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ  
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*Учебное пособие*

Самара  
Самарский государственный технический университет  
2015

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**