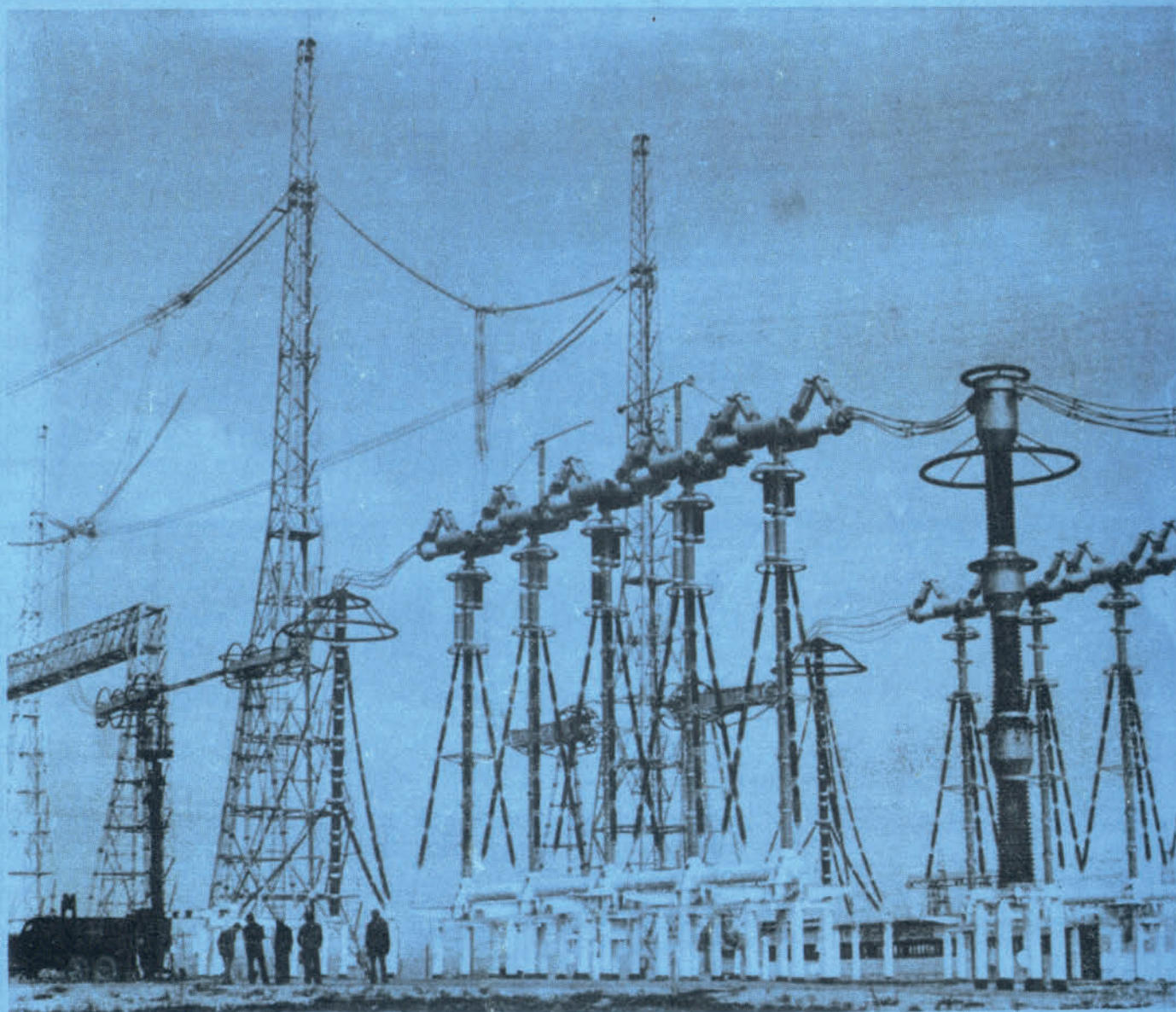


ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАХ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ



Москва 1977

МИНИСТЕРСТВО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Всесоюзный ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции
электротехнический институт имени В.И.Ленина

Для служебного пользования

Экз. № 69

**ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
В ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАХ СВЕРХВЫСОКОГО
НАПРЯЖЕНИЯ**

Москва 1977

Работа выполнена авторским коллективом в составе:
Фотина В.П., Бортника И.М., Кубарева Л.П., Ярошенко А.И.,
Шматовича В.В., Лоханина А.К., Волковой О.В., Лейтеса Л.В.,
Пузырьского Г.С., Флорова А.Е., Белоусова М.М., Лурье С.И.

В данной работе на основе анализа внутренних перенапряжений в существующих и проектируемых электропередачах сверхвысокого напряжения (СВН) показана возможность ограничения перенапряжений практически до уровня рабочего напряжения сети за счет перекомпенсации зарядной мощности линии.

Предлагается система защиты от перенапряжений и комплексы защитных аппаратов, позволяющих ограничить уровни внутренних перенапряжений в электропередачах СВН до $1,5 U_{\varphi}$. Рассмотрены технические требования к основным электрическим параметрам и конструкциям таких защитных аппаратов. Показана возможность практической реализации предлагаемой системы защиты и её внедрения в электропередачах СВН уже в ближайшие годы.

Приведена оценка перспектив дальнейшего снижения уровней изоляции электрооборудования и линий СВН и технико-экономической эффективности предлагаемой системы защиты.

IV. ЗАЩИТНЫЕ РЕАКТОРЫ

Рассматриваемый реактор для кратковременной работы, называемый ниже защитным реактором, должен работать лишь очень короткое время (в течение нескольких секунд) с паузами, достаточными для охлаждения обмотки. Число включений реактора ограничено до 100 включений в год. При этом полностью исключается влияние на конструкцию и размеры реактора требований установившегося нагрева и минимальной стоимости потерь. Резко снижается роль вибраций, поскольку число циклов за срок службы уменьшается более чем на пять порядков.

Размеры и стоимость такого реактора, как показано ниже, сказываются во много раз меньше, чем обычного шунтирующего реактора, что позволяет неограниченно повышать мощность в единице и, естественно, снимает транспортные ограничения. Решающими становятся требования электродинамической стойкости при токах внезапного включения, температурные ограничения при адиабатическом (без теплоотдачи) нагреве обмотки, и в полной мере сохраняются требования к электрической прочности изоляции при кратковременных воздействиях перенапряжений.

При этих требованиях реактор должен выполняться масляным, без стали. Небольшая стоимость активных материалов (провода обмотки) делает целесообразным выполнение реактора в виде нескольких последовательно включенных элементов меньшей мощности и более низкого напряжения. Хотя в этом случае расход провода, определяемый требованием термической стойкости, заметно растет, экономия в стоимости электрической изоляции намного превышает дополнительные затраты на обмоточный провод. Особенно выгодно выполнять элементы реактора в фарфоровых покрывках, совмещающих функции масляного бака и высоковольтного изолятора. Элементы можно устанавливать вертикально друг на друга (рис. 18) до высоты, определяемой классом напряжения, аналогично распространенным конструкциям каскадных измерительных трансформаторов напряжения и тока. Такое выполнение открывает пути для унификации элементов реакторов разных классов напряжения и разной мощности.

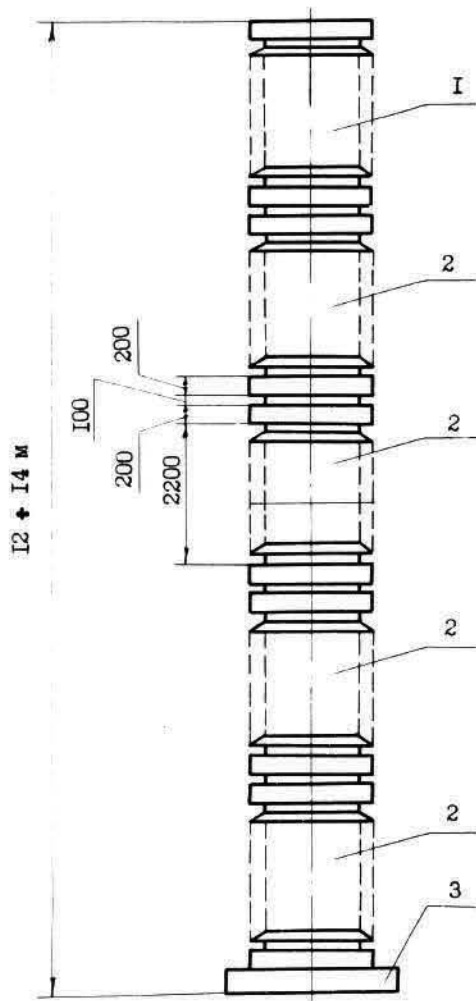


Рис. 18. Эскиз реактора 1150 кВ I + 0,8 ГВар на 2+3 с в фарфоровых покрывках диаметром 0,8 м.

- 1 - резистор или элемент реактора;
- 2 - элемент реактора;
- 3 - опора или фундамент.

Масштаб 1:50

Наиболее близким прототипом элемента защитного реактора является выпускавшийся Московским электроразводоим. В.В. Куйбышева для НИЦ "Бескудниково" ударный реактор типа РОФ-110-4-30 (напряжение 110 кВ, индуктивность 30 мГ, ток 4 кА, мощность 0,15 ГВА, допустимое время включения 1,5 с), эскиз которого с указанием габаритных размеров и некоторых элементов конструкции показан на рис. 19.

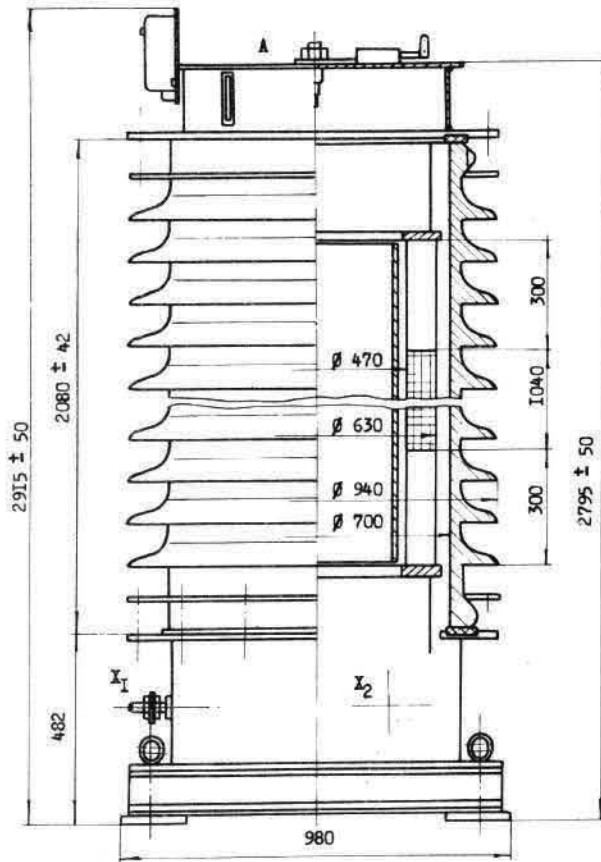


Рис. 19. Реактор типа РОФ 110-4-30 (ударный).

Отсутствие требования малых потерь открывает возможность введения в реактор дополнительного резистора. При этом уменьшаются ударный ток включения реактора и усилия в обмотке. Кроме того, такое сопротивление может быть полезным для подавления колебаний в линии во время паузы АПВ.

При элегазовом выполнении основного оборудования реактор также может быть элегазовым. В этом случае нет необходимости делить его на элементы. Стальной бак реактора может принять значительную часть радиальных усилий, которые при его отсутствии воспринимала бы обмотка [8]. Однако для компенсации снижения индуктивности из-за электромагнитного экрана бака обмотка должна иметь несколько повышенное число витков. Эскиз сечения такого реактора показан на рис. 20.

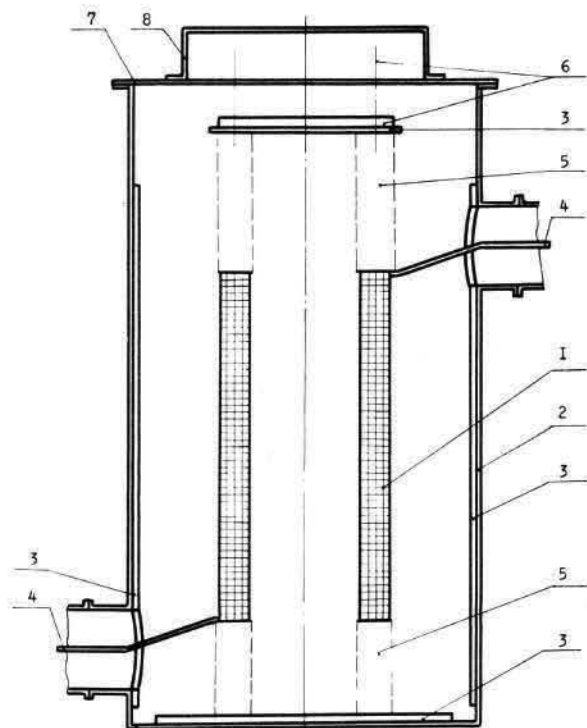


Рис. 20. Эскиз элегазового реактора.

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1 - обмотка, | 6 - прессующее устройство; |
| 2 - бак, | 7 - крышка бака, |
| 3 - электромагнитный экран, | 8 - крышка для доступа к прессующим винтам. |
| 4 - ввод, | |
| 5 - главная изоляция, | |

Масса и размеры обмотки реактора

Для ориентировочного определения зависимости технико-экономических показателей реактора от его параметров с целью экономического обоснования выбора системы защиты от перенапряжений и уточнения требований к реактору сделана оценка массы и размеров обмотки защитного реактора в фарфоровых покрышках. В качестве исходных данных для такой оценки приняты:

- γ - плотность материала провода;
- K_3 - коэффициент заполнения сечения обмотки проводником;
- σ - допустимое среднее механическое напряжение растяжения провода обмотки;
- θ_K - допустимая температура наиболее нагретой точки обмотки в конце работы;
- θ_H - наивысшая начальная температура обмотки перед включением;
- ρ и c - удельные сопротивление и теплоемкость материала провода;
- t - продолжительность работы;
- K_g - наибольшие местные добавочные потери в долях основных потерь;
- $h/2$ и $\delta/2$ - ориентировочные соотношения основных размеров обмотки (h - высота, δ - средний диаметр, δ - радиальный размер);

$K_{уд} = I_{макс}/I_{ном}$ - отношение наибольшего ударного тока к номинальному току реактора;

- n - число элементов;
 f - номинальная частота;
 U - номинальное напряжение;
 Q - номинальная мощность одной фазы реактора,
 $Q = UI$.

Формулы для оценки массы и размеров реактора получены из следующих основных соотношений [8]:

$$\begin{aligned} Q &= UI; L = U/I2\pi f; L_3 = K_L \mu_0 w^2 \pi \mathcal{D}^2 / 4h; \\ I^2 \tau_3 &= j^2 \rho G / \gamma; G_3 = \gamma S \pi \mathcal{D} w; \\ (\theta_K - \theta_H) c \gamma &= K_g j^2 \rho t; \ell h K_3 = S w; \\ \sigma &= V_{ср} I_{макс} \mathcal{D} / 2S; V_{ср} = \mu_0 K_B I_{макс} w / 2h; \\ G &= n G_3; L = n L_3; \tau = n \tau_3; \end{aligned} \quad (I)$$

где L и L_3 - номинальная индуктивность реактора и его элемента; μ_0 - магнитная постоянная; w - число витков обмотки; τ и τ_3 - электрическое сопротивление реактора и его элемента постоянному току; S - сечение провода; G и G_3 - масса провода обмотки всего реактора и его элемента; j - плотность тока, $j = I/S$; $V_{ср}$ - средняя по сечению обмотки осевая магнитная индукция; K_L и K_B - поправочные коэффициенты, $K_L = \Phi h / \pi \mathcal{D}^2$, $K_B = 0,5(1 + \frac{\mathcal{D}}{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \mathcal{D}})$; Φ - табулированный коэффициент для расчета индуктивности [9], зависящий от ℓ/\mathcal{D} и h/\mathcal{D} .

После алгебраических преобразований выражений (I) получим формулы для определения массы провода обмотки:

по условию термической стойкости

$$G_{терм} = \pi \gamma (K_3 \xi)^{-0,92} (4\pi Q / \mu_0 \omega j^2)^{0,6} n^{0,4}, \quad (2)$$

$$\text{где } \xi = \frac{h}{\mathcal{D}} \cdot \frac{\ell}{\mathcal{D}} \Phi^3, \quad (3)$$

$$j^2 = \frac{(\theta_K - \theta_H) c \gamma}{K_g \rho t}, \quad (4)$$

по условию механической прочности (электродинамической стойкости)

$$G_{мех} = 2 \gamma K_B \theta_H K_{yg}^2 / 2 \omega \sigma, \quad (5)$$

где $K_B \approx 0,9$.

По результатам оценок из (2) и (5) следует выбрать больший расход материала. Затем можно определить размеры, число витков и другие параметры обмотки по (I), в частности:

$$\mathcal{D} = \sqrt[3]{G / (n \gamma \pi K_3 \frac{\ell}{\mathcal{D}} \cdot \frac{h}{\mathcal{D}})}, \quad (6)$$

$$w = \sqrt{4\pi L / (n \mu_0 \mathcal{D} \Phi)}, \quad (7)$$

выбрать провод и выполнить детальный расчет для эскизной проработки конструкции с целью более точной оценки показателей реактора.

Определим параметры обмотки реактора по следующим исходным данным: материал провода - медь; $\gamma = 8,9 \text{ т/м}^3$; $\rho_{20} = 0,01754 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$; $\sigma = 800 \text{ кгс/см}^2 = 80 \text{ МПа}$; $\theta_K = 200^\circ\text{C}$ (с запасом вмести 250°C по п. 3.5, а ГОСТ И1677-75); $\theta_H = 60^\circ\text{C}$ (с запасом на неполное охлаждение после предыдущего включения); $K_3 = 0,2$; $K_g = 1,3$; $K_{yg} = 1,9\sqrt{2} = 2,7$; $h/\mathcal{D} = 1,8$; $\ell/\mathcal{D} = 0,25$; $\Phi = 3,6$; $\xi = 1,8 \cdot 0,25 \cdot 3,6^3 = 21$; $\omega = 314 \text{ 1/с}$. При этом $0,5(\theta_H + \theta_K) = 130^\circ\text{C}$ и коэффициент по табл. I2 ГОСТ И1677-65 $\alpha = c \gamma / \rho$.

$$j^2 = 1,49 \cdot 10^{16} t^{-1}; \quad (8)$$

$$G_{терм} = 0,585 \cdot n^{0,4} (Qt)^{0,6}; \quad (9)$$

$$G_{мех} = 2,32 G; \quad (10)$$

$$\mathcal{D} = 0,73 \sqrt[3]{G/n}; \quad (11)$$

где $[j] = \text{А/мм}^2$; $[t] = \text{с}$; $[G] = \text{т}$;
 $[Q] = \text{ГВА}$; $[\mathcal{D}] = \text{м}$.

Зависимость этих показателей от исходных данных представлена на рис. 21. Приведенные графики можно использовать и для решения обратной задачи - определения допустимой мощности реактора или необходимого числа элементов при заданном диаметре фарфоровой покрышки и, следовательно, заданном наружном диаметре обмотки. Как видно из рис. 21, расход активных материалов в рассматриваемом реакторе ($nG = 0,5-5 \text{ т}$) очень мал по сравнению с обычным шунтирующим реактором и стоимость материалов (до 10 тыс. руб.) не играет заметной роли. Стоимость реактора в первом приближении можно принять равной стоимости электромагнитного измерительного трансформатора напряжения И150 кВ, выполненного в фарфоровых покрышках, т.е. 50 тыс.руб. за фазу практически независимо от мощности.

В азгазовом варианте (рис. 20) реактор имеет электромагнитный экран, из-за которого усложняется точный расчет индуктивности. Оценка по приближенным соотношениям, основанным на схеме магнитной цепи (рис. 22), показывает, что расход и стоимость активных материалов азгазового реактора еще меньше, чем масляного (в фарфоровых покрышках).

Активное сопротивление реактора

Отношение индуктивного сопротивления реактора к электрическому сопротивлению постоянному току определяется массой и свойствами материала провода. Из соотношений (I)

$$\frac{X}{r} = \frac{\omega \mu_0}{4 \rho \pi^2} \sqrt[3]{\frac{G^2 K_3 \xi}{\gamma^2 \pi^2}}. \quad (12)$$

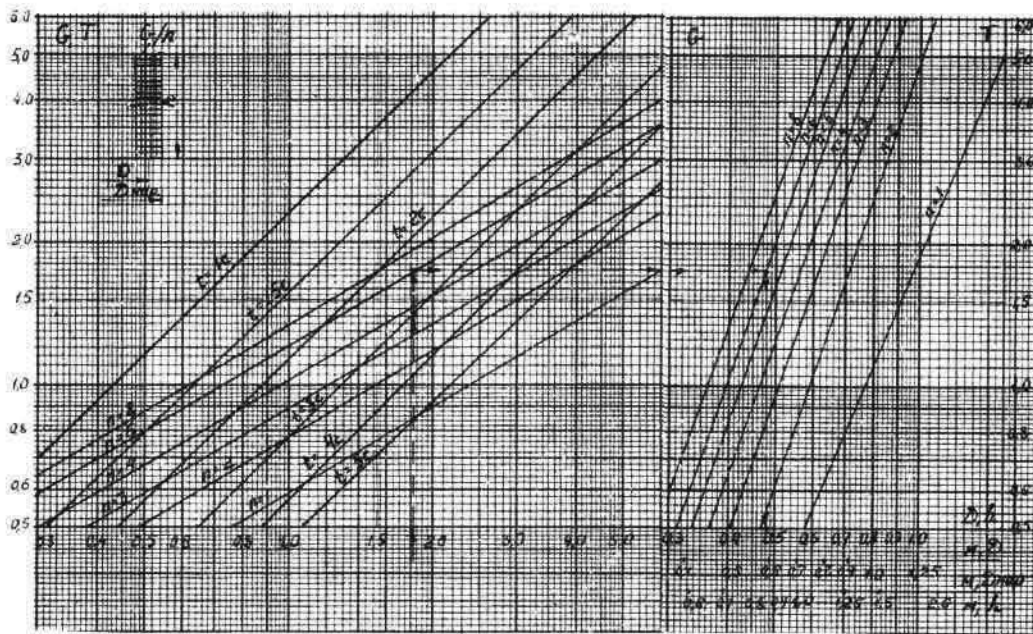


Рис. 21. Зависимость массы меди (G) реактора "модульного" исполнения в фарфоровых кожухах и размеров обмотки элемента (D, D_{нар}, h) от мощности базы (Q), продолжительности работы (t) и числа элементов (n).

Примечания: 1 На левом графике на кривых для соответствующих n (по термической стойкости) и t (по электродинамической стойкости) выбирается более высокая.

2 Пунктиром дан пример для Q = 1,6 Мвар, t = 5 с, n = 6.

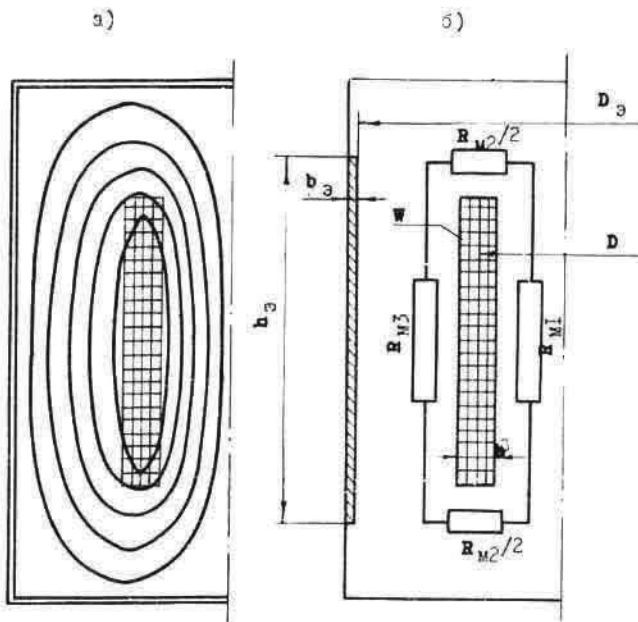


Рис. 22. Картина магнитного поля реактора в экранированном баке (а) и его расчетная схема (б).

Для указанных выше исходных данных при 20°C

$$\frac{x}{\tau} = 100 G^{2/3}, \quad (13)$$

где [G] = т.

Поскольку масса обмотки здесь значительно меньше, чем в обычных шунтирующих реакторах, активное сопротивление намного больше. Возможно, что такое сопротивление будет достаточно для подавления колебаний в контуре холостая линия - реакторы, возникающих при бестоковой паузе цикла АПВ, и, таким образом, отпадет необходимость в установке специального резистора и выключателя у ввода реактора, обращенного к нейтрали, которые используются для этой цели в обычном реакторе. В случае, если это сопротивление окажется недостаточным, в реактор можно будет встроить дополнительный резистор с активным сопротивлением $\tau_{рез}$ и, таким образом, объединить в одном аппарате реактор и резистор.

Дополнительный резистор очень эффективен для снижения ударного тока и электродинамических сил при внезапном включении реактора. Если расход материала, требуемый по термической стойкости, ниже, чем по электродинамической, то введение резистора позволяет ограничиться только первым условием. Для этого следует определить по (5) допустимый ударный ток $I_{макс}$ при $G = G_{терм}$, найти $K_{уд} = I_{макс} / I_{ном}$ и, используя соотношение

$$K_{уд} = \sqrt{2} \left\{ 1 + \exp \left[- \frac{\pi(\alpha + \tau_{рез})}{x} \right] \right\}, \quad (14)$$

вычислить

$$\alpha_{рез} = \frac{x}{\pi} \ln \frac{\sqrt{2}}{K_{уд} - \sqrt{2}} - \tau. \quad (15)$$

Такой резистор можно выполнить из относительно дешевой стальной ленты. Необходимая масса стали $G_{рез}$ определяется выделяемой энергией и удельной теплоемкостью материала $c_{рез}$:

$$G_{рез} = \frac{I^2 \tau_{рез} t}{c_{рез} (\theta_k - \theta_n)} \quad (16)$$

Для конструкционной стали при $c_{рез} = 480 \text{ кДж/т}^\circ\text{С}$, $\theta_k = 200^\circ\text{С}$, $\theta_n = 60^\circ\text{С}$, $\gamma_{рез} = 7,8 \text{ т/м}^3$ и $\rho_{рез} = 0,15 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$

$$G_{рез} = I^2 \tau_{рез} t \cdot 1,5 \cdot 10^{-8}, \quad (17)$$

$$S_{рез} = \sqrt{\frac{\rho_{рез} \cdot G_{рез}}{\gamma_{рез} \cdot \tau_{рез}}} = I \sqrt{\tau_{рез}} \cdot 1,7 \cdot 10^{-2}, \quad (18)$$

где $[G] = \text{т}$; $[I] = \text{А}$; $[\tau] = \text{Ом}$, $[t] = \text{с}$;
 $[S_{рез}] = \text{мм}^2$.

Резистор, собранный из пакетов сложной зигзагообразно стальной ленты с бумажными прокладками, может быть установлен в таких же фарфоровых покрышках, как и элементы реактора.

Обмоточные данные реактора

Параметры элемента: внутренний диаметр фарфоровой покрышки 0,8 м; наружный диаметр обмотки 0,7 м; средний 0,56 м; внутренний 0,42 м; радиальный размер 0,14 м.

Провод ПБУ 1,9х10,0/2,48 сечением 18,64 мм² (ГОСТ 16512-70); в катушке 30 витков, 46 катушек, всего 1380 витков; каналы (возможно, сплошь заполненные изоляцией) 10 мм; осевой размер (высота) обмотки $(46 \cdot 12,48 + 45 \cdot 10,0) \cdot 0,95 = 1000 \text{ мм}$; масса меди $8,9 \cdot \pi \cdot 0,56 \cdot 1380 \cdot 18,64 \cdot 10^{-6} = 400 \text{ кг}$.

Сопротивление постоянному току при 20°C $\tau_3 = 2,3 \text{ Ом}$; индуктивность $L_3 = 0,385 \text{ Г}$; $\chi_3 = 120 \text{ Ом}$; добротность $\chi/\tau = 52$; ударный коэффициент при отсутствии дополнительного резистора $K_{уд} = 2,74$; допустимая продолжительность работы $t = (2,3 \text{ кА/И})^2 \text{ с}$; допустимый по средним растягивающим напряжениям 80 МПа ударный ток $I_{уд} = 3,2 \text{ кА}$; осевая индукция при ударном токе $B_{ос. макс} = 4,5 \text{ Т}$; осевое усилие в середине обмотки (по ТИ 1240.1 МЭЗ) $F_{ос. сеп} = 2,7 \cdot 10^6 \text{ Н} = 270 \text{ тс}$; осевое давление в обмотке $\sigma_{ос} = 11 \text{ МПа} = 110 \text{ кгс/см}^2$; осевое усилие между элементами без учета экранирующего действия фланцев и их экранов при высоте элемента 2,5 м (по ТИ 1240.1 МЭЗ с экстраполяцией, подлежит уточнению) $F_{ос. м/з} = 2 \cdot 10^5 \text{ Н} = 20 \text{ тс}$.

Параметры реактора из четырех или пяти элементов указаны в табл. 9.

Масса стали резистора по (17) $G_{рез} = 2,5 \text{ т}$;
сечение ленты по (18) $S_{рез} = 220 \text{ мм}^2$; для покрышки

Таблица 9

Параметры реактора на напряжении $U = 1200\sqrt{3} = 693 \text{ кВ}$

Число элементов	4	5
Масса меди, т	1,6	2,0
Индуктивное сопротивление, Ом	480	600
Сопротивление постоянному току при температуре 20°C, Ом	9,2	11,5
Номинальный кратковременный ток, А	1450	1150
Номинальная кратковременная мощность, МВАр	1000	800
Время работы, с	2,5	4,0
Предельно допустимое отклонение ударного тока к номинальному току реактора	2,2	2,8
Необходимое сопротивление резистора по (18), Ом	80	-

диаметром 0,8 м выбираем размеры пакета стали в плане 0,44 х 0,55 м и ленту 440 х 0,5 мм; требуемая длина ленты $\ell_{рез} = 1460 \text{ м}$; число слоев ленты $1460/0,55 = 2650$; суммарная толщина пакета при изоляционной прослойке 0,2 мм равна 1,86 м. Такой пакет поместится в покрышке высотой 2 м.

Возможности снижения габаритов реактора

Уменьшение каналов между катушками с 10 до 4 мм (вероятно, возможное после проработки вопросов распределения импульсных напряжений) приведет к снижению высоты элемента на 0,25 м.

В случае освоения склейки фарфоровых чехлов и разработки конструкции осевой стяжки обмотки, обеспечивающей приемлемые осевые перемещения крайних катушек под действием электродинамических сил при большой длине обмотки, отпадает необходимость в промежуточных фланцах, электромагнитных экранах, расширителях и т.п. Тогда весь реактор может быть выполнен в виде одного элемента с осевым размером обмотки 3 м при мощности 1 ГВА на фазу (с дополнительным резистором), 4 м при 0,8 ГВА (без резистора) и 5 м при 0,8 ГВА без снижения межкатушечных каналов. При этом высота фарфорового чехла должна быть 4,0–6,5 м, высота расширителя и фланцев 1,0–1,5 м, полная высота реактора 5–8 м вместо 12–14 м.