

Центр подготовки кадров энергетики

Г.Н. Александров

Режимы работы трансформаторов

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2006

Александров Г.Н. Режимы работы трансформаторов. Учебное пособие. Издание Центра подготовки кадров энергетики, 2006 г.

Настоящее учебное пособие предназначено для специалистов в области проектирования и эксплуатации высоковольтного оборудования подстанций электропередач высокого и сверхвысокого напряжения, в частности высоковольтных трансформаторов и автотрансформаторов. Рассмотрены характеристики трансформаторов и автотрансформаторов в нормальном и аварийных режимах. Показано, что колебания напряжения на трансформаторах обусловлены в основном реактивной составляющей тока в линии. Показано также, что учет насыщения стали магнитопровода в трансформаторах приводит к увеличению тока к.з.

ГЛАВА 1. УСЛОВИЯ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ	4
1.1. Особенности работы трансформаторов в электрических сетях ..	4
1.2. Условия работы повышающих трансформаторов в электрических сетях	6
1.3. Условия работы трансформаторов на понижающих	18
1.4. Условия работы трансформаторов в аварийных режимах	21
ГЛАВА 2. КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ	27
2.1. Конструктивные схемы трансформаторов и автотрансформаторов	27
2.2. Конструкции магнитопроводов	34
2.3. Конструкции обмоток	44
2.4. Охлаждение трансформаторов	46
ГЛАВА 3. НОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ	49
3.1. Основные соотношения, характеризующие работу	49
3.2. Работа трансформаторов под нагрузкой	69
3.3. Особенности работы автотрансформаторов	78
3.4. Конструктивные меры уменьшения добавочных потерь мощности от магнитного потока вне магнитопровода	88
3.5. Регулирование напряжения трансформаторов под нагрузкой ..	98
3.6. Особенности работы трехфазных трансформаторов	100
3.7. Особенности работы трехобмоточных трансформаторов	103
3.8. Параллельное соединение трансформаторов	113
3.9. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов	117
ГЛАВА 4. Аварийные режимы работы трансформаторов и автотрансформаторов	122
4.1. Работа трансформаторов при коротких замыканиях	122
4.2. Электродинамические усилия в трансформаторах при коротких замыканиях	131
4.3. Работа трансформатора при отключении одной фазы	134
Заключение	140
Список литературы	142

ГЛАВА 1. УСЛОВИЯ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

1.1. Особенности работы трансформаторов в электрических сетях

Появление линий электропередачи потребовало трансформации напряжения для снижения потерь мощности в линиях. И чем длиннее линия, тем более высокое напряжение требуется для обеспечения экономичной передачи электроэнергии. Оптимальное напряжение электропередачи (кВ) может быть приближенно оценено по формуле [1].

$$U_{ном} = \sqrt{\frac{0,62P\ell}{1+10^{-3}\ell}}, \quad (1.1)$$

где ℓ -длина линии, км, P – передаваемая по линии мощность, МВт.

Поскольку вблизи максимума оптимизационная функция изменяется незначительно, отклонение напряжения электропередачи от определяемой формулой на 15% в обе стороны не приводит к значимому ухудшению технико-экономических показателей электропередачи. Поэтому, например, при передаче 2000 МВт на расстояние 1500 км экономически эффективным будет номинальное напряжение

$$U_{ном} = 0,85 \sqrt{\frac{0,62 \cdot 2000 \cdot 1500}{1+10^{-3} \cdot 1500}} = 733 \text{ кВ}.$$

Наивысшее напряжение электропередач, пущенных в эксплуатацию, составляет 1200 кВ (СССР) и работающих в настоящее время 1100 кВ (Япония). Наивысшее напряжение созданной и испытанной модели трансформатора - 1800 кВ (СССР).

Наивысшее напряжение генераторов на электростанциях составляет в настоящее время 36,75 кВ (турбогенератор ТВМ-500). Но большинство мощных турбогенераторов изготавливаются на номинальное напряжение 20-24 кВ, а наибольшее напряжение гидрогенераторов-15,75 кВ.

Из приведенных данных следует, что отношение номинальных напряжений ВН и НН мощных повышающих трансформаторов достигает 20÷40.

Такие трансформаторы устанавливаются на повышающих подстанциях электростанций.

Распределительные сети формируются линиями электропередачи 110 и 220 кВ. Соответственно для питания этих сетей используются понижающие трансформаторы (автотрансформаторы) с неболь-

шим коэффициентом трансформации (2÷5). Эти трансформаторы получили название подстанционные.

Питание потребителей обеспечивается на напряжении 6 и 10 кВ, что определяет необходимость понижения напряжения со 110-220 кВ до 6÷10 кВ (коэффициент трансформации 20÷30). Такие трансформаторы можно назвать потребительскими.

Существует еще множество силовых трансформаторов специального назначения (сварочные, печные, заземляющие) особенности работы которых в настоящем пособии не рассматриваются.

Основной особенностью генераторных трансформаторов, работающих на повышающих подстанциях электростанций, является разнообразие их нагрузки в зависимости от режима работы отходящих от подстанции линий электропередачи: от чисто емкостной при одностороннем включении линии до чисто индуктивной при коротком замыкании на линии. Это разнообразие усугубляется высоким синхронным сопротивлением генераторов (от $x_s=z$ для гидрогенераторов до $x_s=2z$ для турбогенераторов, z – волновое сопротивление линии). Внешним результатом таких условий работы являются колебания напряжения на трансформаторе в широких пределах, что вынуждает снабжать трансформаторы регулирующими устройствами – регуляторами напряжения под нагрузкой (РПН). Влияние таких изменений нагрузки на условия работы трансформаторов рассмотрено в соответствующем разделе книги (§.3.2). Здесь же следует отметить, что они являются одной из основных причин повреждения трансформаторов в эксплуатации.

Подстанционные трансформаторы работают в более легких условиях, поскольку изменение их нагрузки происходит в более узких пределах. Тем не менее, напряжение на высокой стороне может изменяться в широких пределах, что также определяет необходимость применения РПН.

Нагрузка потребительских трансформаторов, как правило, является активно-индуктивной, что определяет наиболее легкие условия их работы в нормальных режимах. Однако именно эти трансформаторы наиболее часто подвергаются воздействиям токов короткого замыкания.

1.2. Условия работы повышающих трансформаторов в электрических сетях

При передаче по линии активной мощности линия генерирует или потребляет реактивную мощность в зависимости от соотношения мощностей ее электрического и магнитного полей. Мощность электрического поля линии определяется ее напряжением, которое изменяется в нормальных режимах в относительно узких пределах ($5 \div 20\%$ в зависимости от класса напряжения линии). Соответственно диапазон изменения мощности электрического поля линии относительно узкий.

Напротив, мощность магнитного поля, определяемая током в линии, изменяется в чрезвычайно широких пределах в соответствии с изменениями тока от нуля в режиме холостого хода линии до максимального в режиме максимума нагрузки.

В том случае, когда мощности электрического и магнитного полей линии одинаковы, линия не потребляет и не генерирует реактивной мощности, поскольку в каждой точке поля электрическое и магнитное поля линии взаимно компенсируются (также как конденсатор и реактор при одинаковом реактивном сопротивлении). Этот режим передачи электроэнергии наиболее благоприятен, поскольку по линии протекает только ток нагрузки, а дополнительный реактивный ток линии отсутствует. Он называется натуральным режимом работы линии. При этом ток в линии в этом режиме определяется соотношением

$$I_n = \frac{U_\phi}{z}, \quad (1.2)$$

где U_ϕ – напряжение фазы относительно земли, z – волновое сопротивление линии.

Реактивный ток линии зависит от отношения тока нагрузки I к натуральному току и приближенно может быть вычислен по соотношению

$$I_{p.l} = I_n \lambda \left[1 - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right], \quad (1.3)$$

где λ – волновая длина линии

$$\lambda = \frac{\omega \cdot \ell}{v}, \quad (1.4)$$

ω – угловая частота напряжения сети, ℓ – длина линии, v – скорость распространения электромагнитной волны вдоль линии.

При токе в линии $I < I_n$ реактивный ток линии положительный, т.е. имеет емкостной характер, упреждая напряжение по фазе на 90° . При $I > I_n$ реактивный ток в линии отрицательный, т.е. имеет индуктивный характер. Это означает, что при $I > I_n$ линия превращается из генератора (при $I < I_n$) в потребителя реактивной мощности, т.е. становится подобной реактору.

Заметим, что реактивный ток, определяемый формулой (1.3) создается самой линией. При наличии реактивной составляющей тока нагрузки эти реактивные токи суммируются

$$I_p = I_{p.l} + I_{p.n} = I_n \lambda \left[1 - \left(\frac{I \cos \varphi_{н.г}}{I_n} \right)^2 \right] + I \sin \varphi_{н.г}, \quad (1.5)$$

где $\varphi_{н.г}$ – угол сдвига тока нагрузки по отношению к напряжению.

Например, при индуктивном характере тока нагрузки ($\varphi_{н.г} < 0$) реактивная составляющая частично компенсирует реактивный ток линии при $I < I_n$. Но если $I > I_n$ реактивная составляющая тока нагрузки суммируется с реактивным током линии.

Угол сдвига тока в линии по отношению к напряжению при чисто активной нагрузке может быть определен по формуле

$$\begin{aligned} \sin \varphi_l &= \frac{I_{p.l}}{\sqrt{I^2 + I_{p.l}^2}} = \frac{I_n \lambda \left[1 - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right]}{\sqrt{I^2 + I_n^2 \lambda^2 \left[1 - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right]}} = \\ &= \frac{I_n \lambda \left[1 - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right]}{I \sqrt{1 + \left(\frac{I_n}{I} \right)^2 \lambda^2 \left[1 - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right]}} = \frac{\lambda \left(\frac{I_n}{I} - \frac{I}{I_n} \right)}{\sqrt{1 + \lambda^2 \left(\frac{I_n}{I} - \frac{I}{I_n} \right)^2}}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Как следует из (1.6) независимо от длины линии при $I = I_n$ $\sin \varphi_l = 0$. При $I/I_n < 1$ $\sin \varphi_l > 0$ и при $I/I_n > 1$ $\sin \varphi_l < 0$. Причем, чем больше волновая длина линии, тем медленнее уменьшается угол φ_l при увеличении отношения P/P_n от нуля (см. рис. 1.1).

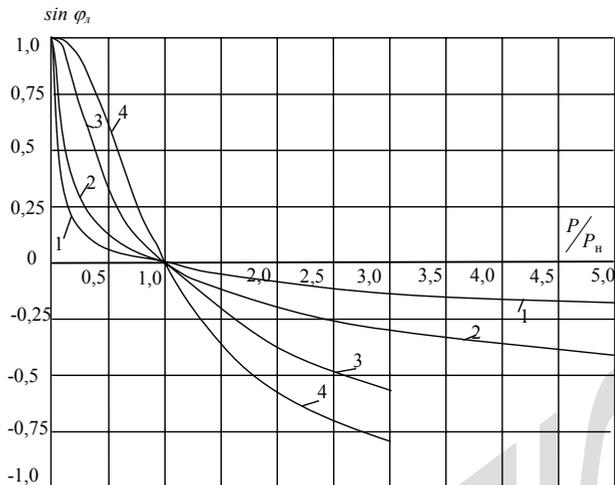


Рис.1.1. Зависимости относительной величины реактивной составляющей тока в линии от отношения передаваемой мощности к натуральной при различных волновых длинах линий $\lambda=0,05\text{рад}(1)$; $0,1\text{рад}(2)$; $0,25\text{рад}(3)$; $0,5\text{рад}(4)$

Для того, чтобы не определять активную и реактивную составляющие тока нагрузки для вычисления $\sin \varphi_L$ можно пользоваться преобразованной формулой

$$\sin \varphi_L = \frac{\lambda \left(\frac{P_n}{P} - \frac{P}{P_n} \right)}{\sqrt{1 + \lambda^2 \left(\frac{P_n}{P} - \frac{P}{P_n} \right)^2}}, \quad (1.7)$$

где P - передаваемая по линии активная мощность, P_n - натуральная мощность линии, равная

$$P_n = \frac{3U_\phi^2}{2} = 3U_\phi I_n. \quad (1.8)$$

При отсутствии компенсации реактивного тока на линии этот ток протекает через трансформатор и поглощается генераторами электростанции, что приводит к значительным осложнениям условий работы генераторов и трансформаторов.

Проанализируем режим напряжений в схеме рис. 1.2.

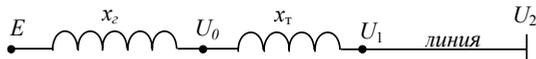


Рис.1.2. Простейшая однолинейная эквивалентная схема выдачи мощности в энергетическую систему: E - э.д.с генератора, x_z - его синхронное индуктивное сопротивление, x_r - индуктивное сопротивление трансформатора

В этой схеме все сопротивления приведены к одной стороне (например, стороне ВН трансформатора). Совмещая с вещественной осью напряжение U_0 на выводах генератора получаем э.д.с. E генератора при чисто активной нагрузке линии.

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \left\{ I + jI_n \lambda \left[1 - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right] \right\} jx_z + U_0 = \\ &= U_0 - I_n \lambda \left[1 - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right] x_z + jIx_z, \end{aligned} \quad (1.9)$$

откуда действующее значение э.д.с. генератора равно

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{\left\{ U_0 - I_n \lambda \left[1 - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right] x_z \right\}^2 + I^2 x_z^2} = \\ &= U_0 \sqrt{\left\{ 1 - \frac{I_n}{U_0} \lambda \left[1 - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right] x_z \right\}^2 + \frac{I^2}{U_0^2} x_z^2} = \\ &= U_0 \sqrt{\left\{ 1 - \frac{\lambda x_z}{z} \left[1 - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right] \right\}^2 + \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \left(\frac{x_z}{z} \right)^2}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Следует заметить, что под x_z понимается синхронное индуктивное сопротивление генераторов, поскольку речь идет о стационар-

ных режимах их работы. В этом случае отношение x_2/z для турбогенераторов составляет около $x_2/z \approx 2$, а для гидрогенераторов $x_2/z \approx 1$ при их работе на линии электропередачи сверхвысокого напряжения, поскольку максимальная передаваемая по таким линиям мощность, как правило, не превышает натуральную мощность линии.

В случае работы генераторов на линии электропередачи высокого напряжения отношение x_2/z может быть значительно меньше, поскольку по этим линиям обычно передается мощность больше натуральной.

Поэтому на рис. 1.3 приведены данные при отношениях x_2/z вплоть до 0,25.

При уменьшении отношения I/I_n э.д.с. E уменьшается по отношению к напряжению на его зажимах и при некотором значении I/I_n достигает величины U_0 . Режим работы генераторов при $E < U_0$ чрезвычайно неблагоприятен из-за перегрева лобовых частей обмоток, ускоренного старения их изоляции и повреждения прилегающего железа.

Поэтому примем в качестве нижнего предела $E=U_0$. Тогда критическое отношение I/I_n (соответствующее равенству $E=U_0$) при отсутствии реактивной составляющей в токе нагрузки определится из уравнения

$$\left\{ 1 - \frac{\lambda x_2}{z} \left[1 - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right] \right\}^2 + \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \left(\frac{x_2}{z} \right)^2 = 1, \quad (1.11)$$

решение которого получаем в виде

$$\left(\frac{I}{I_n} \right)_{кр}^2 = \sqrt{1 - \frac{1 + 2\lambda \frac{z}{x_2} - \sqrt{\left(1 + 2\lambda \frac{z}{x_2} \right)^2 - 4\lambda^2}}{2\lambda^2}}}. \quad (1.12)$$

Результаты расчетов по этой формуле приведены на рис.1.3.

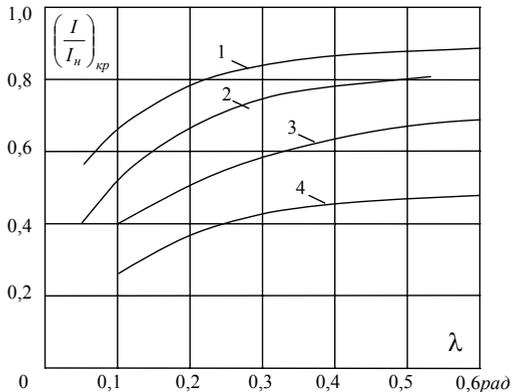


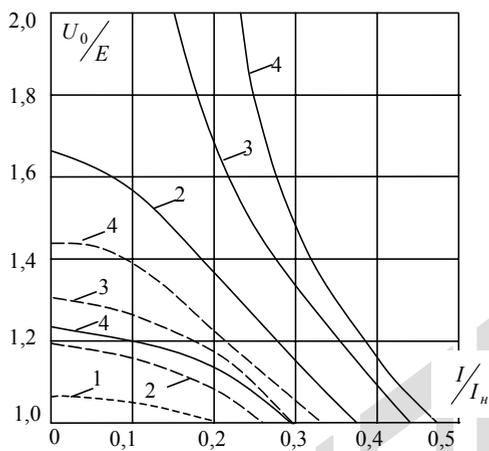
Рис. 1.3. Зависимости критического отношения $\left(\frac{I}{I_n}\right)_{кр}$ от волновой длины линии λ при различных отношениях $\frac{x_2}{z} = 0,25$ (кривая 1); $0,5$ (2); $1,0$ (3); и $2,0$ (4)

Как видно, при увеличении длины линии отношение $\left(\frac{I}{I_n}\right)_{кр}$ нарастает. Также увеличивается отношение $\left(\frac{I}{I_n}\right)_{кр}$ при уменьшении отношения x_2/z . Следовательно, генераторы, выдающие мощность на линии сверхвысокого напряжения, перегружаются реактивным током линий электропередачи уже при незначительном уменьшении передаваемой мощности по сравнению с натуральной мощностью линий, особенно при относительно большой длине линий. Генераторы, выдающие мощность через линии высокого напряжения работают в лучших условиях. Но и для них нагрузка линии меньше $0,5 I_n$ является критической.

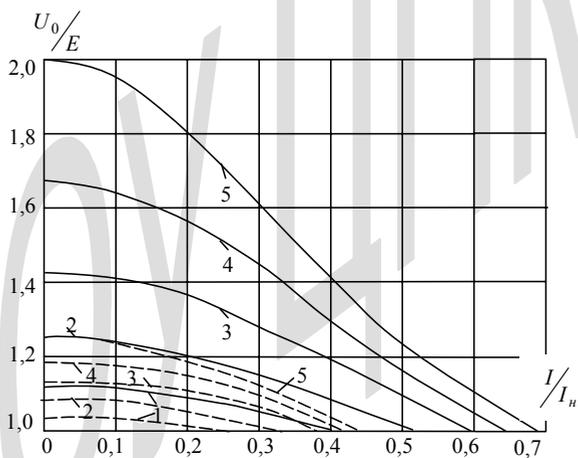
При уменьшении I/I_n ниже критического значения регулятор прекращает регулировать ток возбуждения генератора и э.д.с. E прекращает изменяться. Поэтому дальнейшее уменьшение отношения I/I_n приводит к увеличению U_0 согласно (1.10).

$$\frac{U_0}{E} = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \lambda \frac{x_2}{z} \left[1 - \left(\frac{I}{I_n}\right)^2\right]\right\}^2 + \left(\frac{I}{I_n}\right)^2 \left(\frac{x_2}{z}\right)^2}} \quad (1.13)$$

Результаты вычислений отношения U_0/E для тех же условий, что и на рис. 1.3 приведены на рис. 1.4.



а)



б)

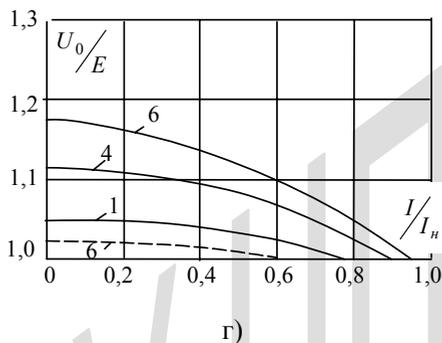
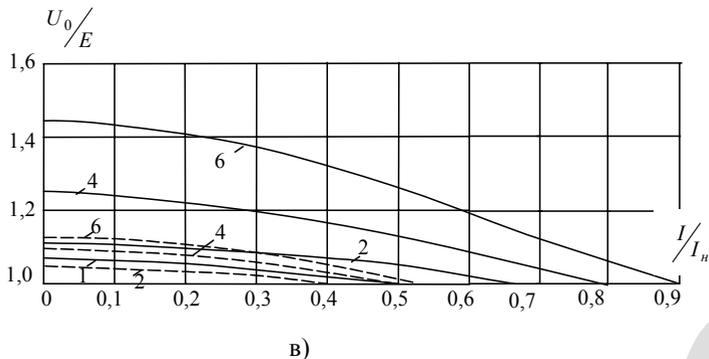


Рис.1.4. Зависимости отношения U_0/E от отношения I/I_n без компенсации зарядной мощности линий (сплошные линии) и при 60%-ной компенсации зарядной мощности линии (штриховые линии) при различных отношениях $x_z/z = 2(a)$; 1(б); 0,5(в) и 0,25(г) и различных волновых длинах линий $\lambda = 0,1$ рад (кривые 1); 0,2рад (кривые 2); 0,3рад (кривые 3); 0,4рад (кривые 4); 0,5рад (кривые 5); 0,6рад (кривые 6)

Как видно, напряжение U_0 может достигнуть недопустимых величин. В частности на холостом ходу линий $I = 0$ согласно (1.13) отношение

$$\frac{U_0}{E} = \frac{1}{1 - \lambda \frac{x_z}{z}}. \quad (1.13a)$$

Для ограничения повышения напряжения на выводах генераторов и соответственно на генераторных обмотках трансформаторов устанавливаются компенсаторы реактивной мощности: синхронные компенсаторы (СК) и статические тиристорные компенсаторы (СТК), подключаемые к третичным обмоткам трансформаторов. При 100%-ой компенсации избыточной реактивной мощности линий повышения напряжения U_0 отсутствуют. Действительно, для учета компенсации избыточной зарядной мощности линий формулу (1.3) необходимо дополнить множителем $1-\beta$, где β - степень компенсации зарядной мощности линии

$$\beta = \frac{Q_p}{Q_{з.л}} = \frac{3U_\phi I_p}{3U_\phi I_n \lambda} = \frac{I_p}{I_n \lambda} \quad (1.14)$$

Тогда формула (1.3) примет вид

$$I_{p.л} = I_n \lambda \left[1 - \beta - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right]. \quad (1.15)$$

Соответственно в формулах (1.10), (1.12), (1.13) при множителе λ появляется дополнительный множитель $(1-\beta)$, например, согласно (1.13)

$$\frac{U_0}{E} = \frac{1}{\sqrt{\left\{ 1 - \lambda \frac{x_z}{z} \left[1 - \beta - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right] \right\}^2 + \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \left(\frac{x_z}{z} \right)^2}}. \quad (1.16)$$

На рис.1.5 приведены результаты расчетов по формуле (1.16) необходимой степени компенсации линии, чтобы в режиме ее холостого хода ($I=0$) отношение U_0/E не превысило заданной величины $(U_0/E)=1,1$,

$$\beta = 1 - \frac{z}{\lambda x_z} \left[1 - \left(\frac{E}{U_0} \right) \right]. \quad (1.17)$$

Как видно, при увеличении волновой длины линии λ необходимая степень компенсации зарядной мощности линии быстро нарастает, приближаясь к 100% ($\beta = 1$) при больших длинах линий.

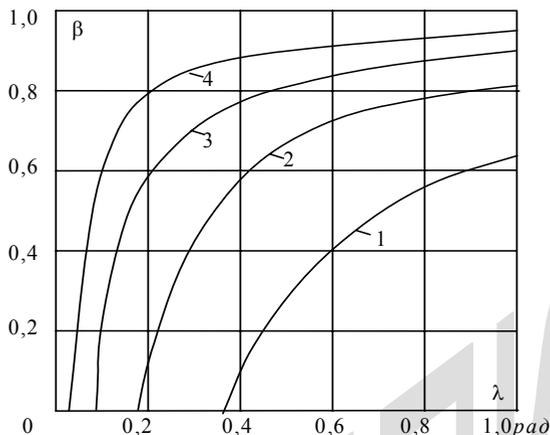


Рис.1.5. Зависимости необходимой степени компенсации зарядной мощности линии для ограничения отношения $U_0/E \leq 1,10$ от волновой длины линии при различных значениях отношения $x_2/z = 0,25$ (кривая 1); 0,5(2); 1,0(3); 2,0(4)

Обычно компенсацию зарядной мощности линии осуществляют по обоим концам линий, чтобы при разомкнутом приемном конце линии напряжение промышленной частоты было ограничено. При этом, как правило, степень компенсации зарядной мощности линий не превосходит 60%, поскольку в противном случае пропускная способность линий резко снижается [2]. При этом проблема повышения напряжения сверх наибольшего рабочего напряжения сохраняется, хотя и в меньшей степени, чем при отсутствии компенсации (см. рис.1.4, штриховые линии). Наиболее неблагоприятные условия сохраняются у генераторных трансформаторов (см. рис.1.4 а,б).

Решить проблему компенсации избыточной зарядной мощности линий электропередачи и вместе с тем проблему ограничения напряжения на выводах генераторов и, соответственно, на первичной обмотке трансформаторов можно с помощью управляемых шунтирующих реакторов, ток которых изменяется по закону (1.2). В этом случае

$$\beta = 1 - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \quad (1.18)$$

и согласно формуле (1.16) при передаче чисто активной мощности по линии

$$\frac{E}{U_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \left(\frac{x_z}{z} \right)^2}.$$

(1.19)

Это означает, что при любом токе в линии э.д.с. E генераторов всегда больше напряжения на их зажимах ($E > U_0$) и в пределе при $I=0$ $E = U_0$.

В этом случае, при наличии индуктивной составляющей в токе нагрузки (см. формулу (1.5) при $\varphi_{нз} < 0$) соотношение (1.8) примет вид

$$E = U_0 + (I \cos \varphi_{нз} - jI \sin \varphi_{нз}) jx_z = U_0 + Ix_z \sin \varphi_{нз} + jIx_z \cos \varphi_{нз} \quad (1.20)$$

и действующее значение э.д.с. E

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{(U_0 + Ix_z \sin \varphi_{нз})^2 + I^2 x_z^2 \cos^2 \varphi_{нз}} = \\ &= \sqrt{U_0^2 + 2U_0 Ix_z \sin \varphi_{нз} + I^2 x_z^2} = \\ &= U_0 \sqrt{1 + 2 \frac{I}{U_0} x_z \sin \varphi_{нз} + \frac{I^2}{U_0^2} x_z^2}. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Как видно и в этом случае при наличии управляемых по закону (1.3) реакторов на линии во всех режимах ее работы $E > U_0$.

То, что изложенное имеет не чисто теоретическое значение, а имеет непосредственное отношение к реальной ситуации в электрических сетях, подтверждается опубликованными результатами исследований [3]. По данным этой публикации повышения напряжения промышленной частоты в электрических сетях России при минимальных нагрузках достигают $1,4 U_{ф.н.р}$ (наибольшего рабочего фазного напряжения). Поэтому задача насыщения электрических сетей управляемыми шунтирующими реакторами весьма актуальна.

Следует отметить, что установка компенсирующих устройств не на линиях, а на генераторном напряжении ограничивает повышение напряжения на обмотке НН трансформаторов. Но при этом реактивный ток через трансформатор не уменьшается, что приводит к неблагоприятным последствиям (см.гл.3). Установка компенсирующих устройств непосредственно на линиях решает обе проблемы:

- ограничения повышения напряжения на зажимах генераторов и на трансформаторах;
- нормализация условий работы трансформаторов и генераторов.

Для того, чтобы не допускать чрезмерного повышения напряжения на обмотке ВН трансформаторов и соответственно на линиях электропередачи при повышениях напряжения на стороне НН трансформаторов, они снабжаются устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), обеспечивающими регулирование напряжения на высокой стороне в пределах $\pm(9\div 16)\%$ от номинального напряжения. Таким образом, задача регулирования напряжения на линии перекладывается с генераторов, у которых напряжение регулируется изменением тока возбуждения, на трансформаторы, где эта задача решается чрезвычайно сложно и дорого (см. гл.2).

1.3. Условия работы трансформаторов на понижающих подстанциях и на межсистемных электропередачах

При установке трансформаторов (автотрансформаторов) на межсистемных электропередачах и на понижающих подстанциях условия работы трансформаторов осложняются тем, что при отсутствии регулируемых устройств компенсации реактивной мощности напряжение на входе трансформаторов нестабильно. Оценку этого напряжения можно произвести по эквивалентной схеме рис. 1.6, где под x_c следует понимать индуктивное сопротивление системы, а в качестве э.д.с. генераторов E – напряжение в системе.



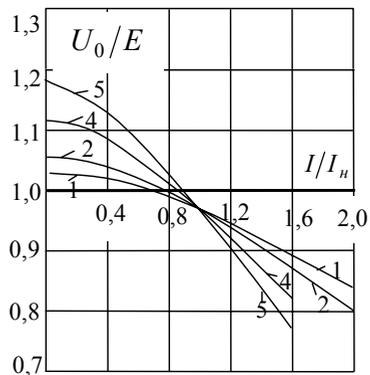
Рис.1.6. Расчетная эквивалентная схема

При этом сохраняет справедливость формула (1.13) для соотношения напряжений в начале линии и за индуктивностью системы. Результаты вычислений по этой формуле приведены на рис. 1.7.

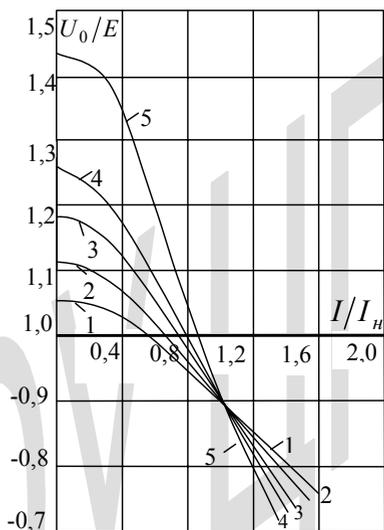
Как видно, в этом случае отклонение напряжения на входе трансформатора происходит в обе стороны: как в большую, так и в меньшую при $I/I_n > 0,7 \div 0,9$. Причем увеличение длин линии, как и увеличение относительной величины индуктивного сопротивления системы x_c / z , приводит к увеличению отклонения напряжения при изменении нагрузки линии.

Необходимо отметить, что повышение напряжения в рассматриваемом случае промежуточных подстанций значительно меньше, чем в случае генераторных подстанций из-за значительно меньшего индуктивного сопротивления системы x_c .

Тем не менее колебания напряжения могут быть весьма существенными, особенно при передаче мощности больше натуральной ($I > I_n$) даже при относительно малых длинах линий ($\lambda \approx 0,1 \text{ рад}$). По этой причине используются регулируемые устройства компенсации реактивной мощности (СТК), которые поддерживают напряжение на шинах подстанции.



а)



б)

Рис 1.7. Зависимости отношения напряжения на входе трансформатора и э.д.с. системы E от отношения I/I_n при различных отношениях $x_c/z = 0,25$ (а) и $0,5$ (б) и при различных волновых длинах линий $\lambda = 0,1$ рад(кривые 1); $0,2$ рад(2); $0,3$ рад(3); $0,4$ рад(4); $0,6$ рад(5)

Для этого ток компенсатора I_k должен изменяться в соответствии с законом, получаемым из уравнения (см. соотношение (1.16))

$$\left\{ 1 - \lambda \frac{x_c}{z} \left[1 - \frac{I_k}{I_n \lambda} - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \right] \right\}^2 + \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \left(\frac{x_c}{z} \right)^2 = 1, \quad (1.22)$$

где I – ток в линии (за трансформатором). После преобразований получаем

$$I_k = I_n \lambda \left\{ 1 - \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 - \frac{z}{\lambda x_c} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{x_c}{z} \right)^2 \left(\frac{I}{I_n} \right)^2} \right] \right\}.$$

(1.23)

Регулируемый компенсатор может управляться и непосредственно от сигнала по отклонению напряжения на шинах подстанции.

Однако, при этом через трансформатор (автотрансформатор) протекает реактивный ток согласно соотношению (1.3), что приводит к неблагоприятным последствиям (см. гл. 3). Для исключения возможности протекания реактивного тока через трансформаторы необходимо использовать управляемые компенсаторы реактивной мощности с законом управления согласно (1.3) (см. [4]).

1.4. Условия работы трансформаторов в аварийных режимах

Наиболее тяжелым аварийным режимом для трансформаторов является режим короткого замыкания на линии электропередачи, причем при коротком замыкании вблизи трансформатора ток короткого замыкания наибольший. Ток короткого замыкания зависит также от сопротивления системы z_c . Для унификации требований к трансформаторам ГОСТом 11677-85 определены мощности короткого замыкания примыкающих систем (см. табл. 1.1) для трансформаторов мощностью от 1000 кВА и более.

Таблица 1.1

Класс напряжения обмотки трансформатора, кВ	Мощность короткого замыкания сети, МВА	
	для трансформаторов класса напряжения до 110 кВ	для трансформаторов класса напряжения 110 кВ и выше
До 10 вкл.	500	2000
Свыше 10 до 35	2500	5000
110	-	15000
150	-	20000
220	-	25000
330	-	35000
500	-	50000
750	-	75000

При этом установившееся значение тока короткого замыкания определяется по формуле

$$\begin{aligned}
 I_{к.з.у} &= \frac{U_{ф.ном}}{x_c + x_{тр}} = \frac{U_{ф.ном}}{x_{тр} \left(1 + \frac{x_c}{x_{тр}} \right)} = \frac{U_{ф.ном} U_{к.з}}{U_{к.з} x_{тр}} \frac{1}{1 + \frac{U_{ф.ном}}{x_{тр}} \frac{x_c}{U_{ф.ном}}} = \\
 &= \frac{100 I_{ном}}{U_{к.з} \%} \frac{1}{1 + \frac{U_{ф.ном}}{U_{к.з}} \frac{U_{к.з}}{x_{тр}} \frac{x_c}{U_{ф.ном}}} = \frac{100 I_{ном}}{U_{к.з} \%} \frac{1}{1 + \frac{100 I_{ном}}{U_{к.з} \%} \frac{1}{I_{с.к.з}}} = \\
 &= \frac{100 I_{ном}}{U_{к.з} \%} \frac{1}{1 + \frac{100 I_{ном} U_{ф.ном}}{U_{к.з} \% I_{с.к.з} U_{ном}}} = \frac{100 I_{ном}}{U_{к.з} \%} \frac{1}{1 + \frac{100 S_{т.ном}}{U_{к.з} \% S_{с.к.з}}} = \\
 &= 100 \frac{I_{ном}}{U_{к.з} \% + \frac{100 S_{т.ном}}{S_{с.к.з}}}, \tag{1.24}
 \end{aligned}$$

где $I_{ном}$ - номинальный ток трансформатора, $S_{Т.ном} = 3I_{ном} \cdot U_{ф.ном}$ - номинальная мощность фазы трансформатора, $U_{к.з}$ - напряжение короткого замыкания трансформатора, $U_{к.з} \% = 100U_{к.з} / U_{ф.ном}$, $S_{с.к.з} = 3I_{с.к.з} \cdot U_{ф.ном}$ - мощность системы в режиме ее короткого замыкания при неизменном значении $U_{ф.ном}$. Причем напряжением короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называется напряжение, приложенное к одной из обмоток при короткозамкнутой другой обмотке, когда в обеих обмотках трансформатора протекает номинальный ток (см. гл. 3).

Например для трансформатора класса 500 кВ мощностью 500 МВА с $U_{к.з} \% = 10,5\%$ расчетный ток к.з по отношению к его номинальному току составит

$$\frac{I_{к.з}}{I_{ном}} = \frac{100}{10,5 + 100 \frac{500}{50000}} = \frac{100}{11,5} = 8,7.$$

Для относительно маломощных трансформаторов (мощностью менее 1000кВт) установившийся ток к.з определяется без учета сопротивления примыкающей системы

$$I_{к.з} = \frac{U_{ф.ном}}{x_T} = \frac{U_{ф.ном}}{U_{к.з}} \frac{U_{к.з}}{x_2} = \frac{100}{U_{к.з} \%} I_{ном} \quad (1.25)$$

с ограничением $I_{к.з} \leq 25I_{ном}$.

Например, для двухобмоточного трансформатора ТМ 400/35 мощностью 400 кВА на напряжение 35 кВ ($U_{к.з} \% = 6,5\%$)

$$I_{к.з} = \frac{100}{6,5} I_{ном} = 15,4 I_{ном}.$$

При возникновении короткого замыкания возникает переходный процесс, определяемый тем обстоятельством, что мгновенное значение тока нормального режима в момент короткого замыкания отличается по величине от мгновенного значения установившегося тока короткого замыкания. Это различие определяется прежде всего различием сдвига фаз тока и напряжения в предшествующем нормальном режиме и в последующем режиме к.з (см. рис.1.8).

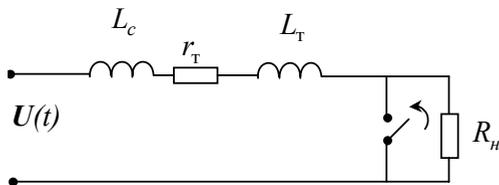


Рис.1.8. Расчетная эквивалентная схема при к.з. на линии

Действительно, в нормальном режиме в токе через трансформатор преобладает активная составляющая ($\cos \varphi \approx 0,95$), тогда как в режиме к.з ток через трансформатор в основном индуктивный, поскольку при этом

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_c + x_T}{r_T} \gg 1.$$

Наиболее опасен момент короткого замыкания, совпадающий с переходом напряжения через нуль, когда в предшествующем режиме ток тоже близок к нулю, а в последующем (режим к.з.) максимален.

Тогда при синусоидальном напряжении

$$U(t) = U_m \sin \omega t,$$

ток в предшествующем режиме

$$i(t) = \frac{U_m}{\sqrt{(x_c + x_T)^2 + (r_T + R_n)^2}} \cdot \sin \left(\omega t - \operatorname{arctg} \frac{x_c + x_T}{r_T + R_n} \right), \quad (1.26)$$

а в последующем режиме к.з., возникающем в момент времени

$$\omega t_0 = \operatorname{arctg} \frac{x_c + x_T}{r_T + R_n},$$

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{U_m}{\sqrt{(x_c + x_T)^2 + r_T^2}} \cdot \sin \left(\omega t - \operatorname{arctg} \frac{x_c + x_T}{r_T} \right) + \\ &+ \frac{U_m}{\sqrt{(x_c + x_T)^2 + r_T^2}} e^{-\frac{\omega T}{x_c + x_T} \left(t - \frac{1}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{x_c + x_T}{r_T + R_n} \right)} \approx \\ &\approx \frac{U_m}{x_c + x_T} \left(e^{-\frac{\omega T}{x_c + x_T} t} - \cos \omega t \right), \end{aligned} \quad (1.27)$$

ПОСКОЛЬКУ

$$\operatorname{arctg} \frac{x_c + x_T}{r_T + R_n} \approx 0, \quad \operatorname{arctg} \frac{x_c + x_T}{r_T} \approx \frac{\pi}{2},$$

$$\sqrt{(x_c + x_T)^2 + r_T^2} \approx x_c + x_T$$

и коэффициент затухания

$$\alpha = \frac{1}{T} = \frac{r_T}{L_T + L_c} = \frac{\omega r_T}{x_T + x_c}.$$

Максимум тока будет достигнут вблизи максимума косинусоиды, когда $\omega t \approx \pi$ (рис.1.9),

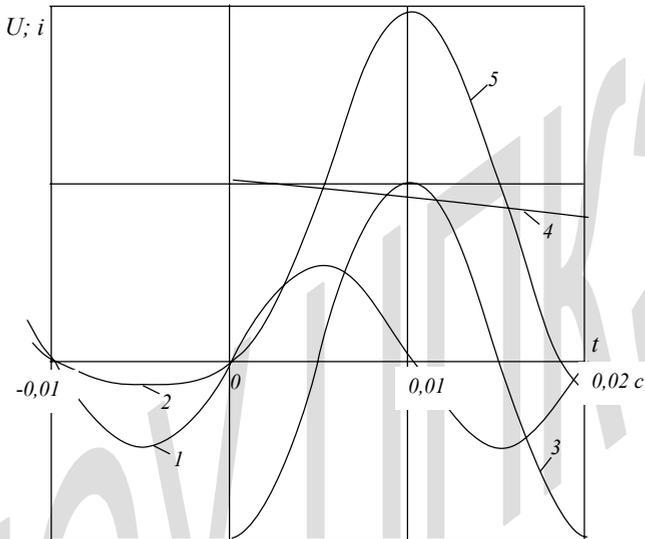


Рис.1.9. Ток в переходном процессе при возникновении короткого замыкания на выводах трансформатора: 1- напряжение сети, 2- ток предшествующего режима, 3- установившийся ток режима к.з., 4- аperiodическая составляющая тока к.з., 5- ток в переходном режиме

$$i_{к.з.м} \approx \frac{U_m}{x_c + x_T} \left(e^{-\frac{\pi \cdot r_T}{x_c + x_T}} + 1 \right). \quad (1.28)$$

Он значительно превосходит амплитуду тока установившегося режима к.з.

$$i_{к.з.ум} \approx \frac{U_M}{x_c + x_T}. \quad (1.28a)$$

Многообразие возможных ситуаций в реальных условиях работы трансформаторов определило целесообразность стандартизации расчетных условий для трансформаторов. Согласно упомянутому ГОСТ 11677-85 наибольший ток короткого замыкания (ударный ток) определяется по формуле

$$I_{к.з.уд.} = k_{y.д} \sqrt{2} I_{к.з.у}, \quad (1.29)$$

где $k_{y.д}$ определяется по таблице 1.2 в зависимости от соотношения реактивного и активного сопротивлений трансформатора.

Таблица 1.2

x_T/r_T	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14 и более
$k_{y.д}$	1,07	1,15	1,24	1,38	1,48	1,55	1,61	1,68	1,74	1,8

При этом полное сопротивление короткого замыкания трансформаторов определяется из соотношения

$$z_{к.з} = \frac{U_{к.з}}{I_{ном}} = \frac{U_{к.з} \%}{100 I_{ном}} U_{ф.ном}, \quad (1.30)$$

а величины $U_{к.з} \%$ приведены во всех каталогах на трансформаторы.

Активное сопротивление трансформатора определяется соотношением

$$r_{к.з} = \frac{\Delta P_{к.з}}{3 I_{ном}^2}, \quad (1.31)$$

где $\Delta P_{к.з}$ - мощность потерь к.з. трансформатора приводимая в каталогах, а номинальный ток трансформатора определяется по данным о его номинальной мощности S_n и номинальном напряжении $U_{ном}$

$$I_{ном} = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{ном}}. \quad (1.32)$$

При известных значениях z и r индуктивное сопротивление к.з. рассчитывается по формуле

$$x_{к.з} = \sqrt{z_{к.з}^2 - r_{к.з}^2}. \quad (1.33)$$

Значительное увеличение тока в режиме к.з. по сравнению с номинальным током может привести к повреждению обмоток транс-

форматоров, если не приняты соответствующие меры, обеспечивающие необходимую механическую прочность обмоток (см. гл.4).

Большой ток к.з. оказывает влияние на электромагнитные процессы в трансформаторах, что также необходимо учитывать при их проектировании (см. гл.4).

Необходимо отметить, что в настоящее время появились первые трансформаторы в электрических сетях с напряжением короткого замыкания, близким к 100% или равным ему [5]. Эти трансформаторы позволяют обеспечить регулируемую компенсацию реактивной мощности в электрических сетях. Для этого типа трансформаторов режим короткого замыкания одной из обмоток (обмотки управления) является номинальным режимом его работы. Следовательно, установившийся ток к.з. такого трансформатора является его номинальным током. При использовании в качестве управляющего ключа, замыкающего обмотку управления, выключателя (например, вакуумного) может возникнуть апериодическая составляющая в токе, наибольшая величина которой (в соответствии с вышеизложенным) равна амплитуде номинального тока. При этом максимальное значение суммарного тока близко к двойной амплитуде номинального тока.

При использовании в качестве управляющего ключа тиристоров апериодическая составляющая возникнуть не может (включение тиристоров происходит при переходе тока через ноль) и максимальная величина тока, как в установившемся, так и в переходном режимах, равна амплитуде номинального тока.

ГЛАВА 2. КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

2.1. Конструктивные схемы трансформаторов и автотрансформаторов

Простейший трансформатор содержит две соосные обмотки с различным числом витков N_1 и N_2 . Отношение числа витков этих обмоток определяет коэффициент трансформации

$$k_T = \frac{N_2}{N_1}, \quad (2.1)$$

где $N_2 \geq N_1$.

При этом отношение напряжений на обеих обмотках соответствует отношению их числа витков

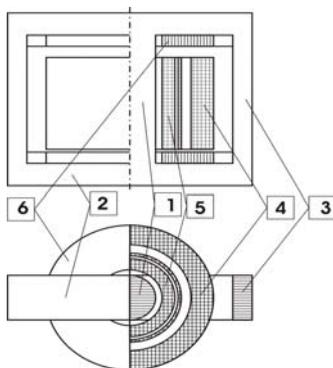
$$\frac{U_2}{U_1} = k_T. \quad (2.2)$$

При наличии трех коаксиальных обмоток с числом витков N_1 ; N_2 ; и N_3 (трехобмоточные трансформаторы) различаются три коэффициента трансформации

$$k_{T12} = \frac{N_2}{N_1}; \quad k_{T13} = \frac{N_3}{N_1}; \quad k_{T23} = \frac{N_3}{N_2}, \quad (2.3)$$

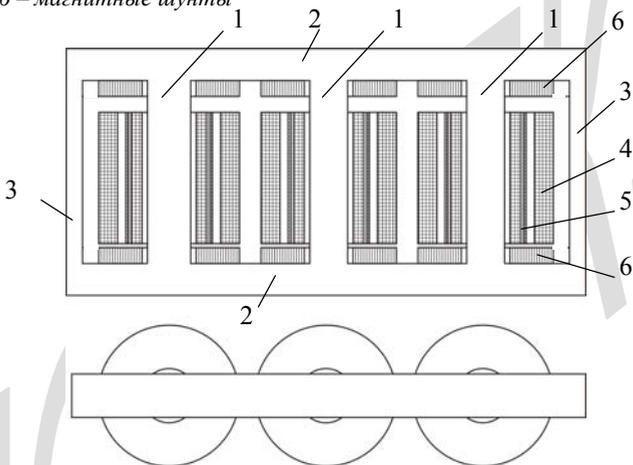
определяющие соотношение напряжений трех обмоток.

Связь между обмотками трансформаторов обеспечивается его магнитным полем. При разомкнутой одной обмотке двухобмоточного трансформатора ток протекает по одной обмотке, подсоединенной к электрической сети. Этот ток создает магнитное поле трансформатора, которое индуцирует напряжение во вторичной обмотке. Для уменьшения тока холостого хода силовые трансформаторы изготавливаются с магнитопроводами – замкнутыми магнитными системами, состоящими из стержней, расположенных внутри обмоток и ярем, окружающих обмотки (см.рис.2.1).



а)

1 – стержень; 2 – ярма; 3 – боковые ярма; 4 – обмотка ВН; 5 – обмотка НН; 6 – магнитные шунты



б)

Рис.2.1. Схемы однофазного (а) и трехфазного (б) двухобмоточных трансформаторов

Магнитопровод уменьшает сопротивление магнитному потоку и поэтому уменьшает ток, необходимый для создания магнитного потока (см.гл.3).

Обмотка низшего напряжения располагается, как правило, непосредственно вокруг стержня магнитопровода (естественно при обеспечении необходимой изоляции между витками обмотки и стержнем магнитопровода). Вокруг обмотки низшего напряжения (НН) рас-

полагается обмотка высшего напряжения (ВН) на расстоянии от обмотки НН, определяемым необходимой электрической прочностью.

В трехобмоточном трансформаторе между обмотками НН и ВН располагается обмотка среднего напряжения (СН).

При большой мощности трансформаторов наружный диаметр внешней обмотки оказывается настолько велик, что исключает возможность «вписать» трансформатор по ширине в железнодорожный габарит (см.рис.2.2).

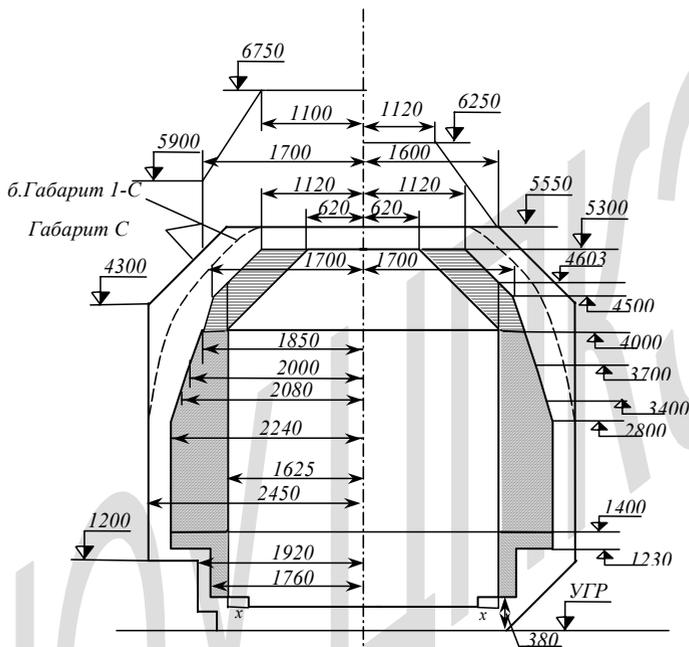


Рис.2.2 Допустимые железнодорожные габариты

В этом случае изменяется схема обмоток и магнитопровода: обмотки разделяются на две равные части, соединенные последовательно и располагающиеся вокруг двух стержней (см.рис.2.3).

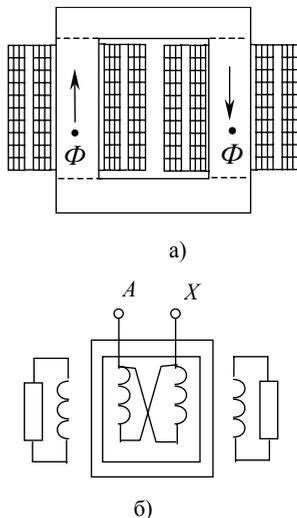


Рис.2.3. Схемы двухстержневого однофазного двухобмоточного трансформатора с расщепленными обмотками: а – при последовательном соединении двух частей обеих обмоток, б – при отсутствии электрической связи между двумя частями одной из обмоток

В этом случае исключается необходимость устройства боковых ярем, поскольку магнитный поток замыкается по второму стержню, вокруг которого витки намотаны в противоположном направлении. Остаются только ярма, соединяющие стержни магнитопровода. При этом достигается большая экономия электротехнической стали (см.гл.3).

Две части одной из обмоток в этом случае могут не иметь электрической связи и работать на независимых потребителях (см. рис.2.3б). Такие обмотки называются расщепленными.

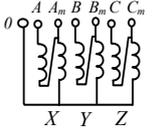
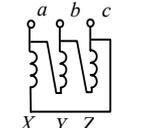
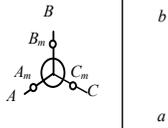
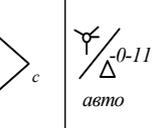
В трехфазном трансформаторе (в трехфазной группе однофазных трансформаторов) обмотки могут быть соединены в звезду и в треугольник. Как правило, обмотки ВН соединяются в звезду, но бывают и исключения (см.рис.2.4).

Схема соединения обмоток			Диаграммы векторов ЭДС		Условные обозначения
ВН	НН		ВН	НН	

а)

Схемы соединения обмоток			Диаграммы векторов ЭДС			Условные обозначения
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	

б)

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов ЭДС		Условные обозначения
ВН и СН	НН	ВН и СН	НН	
				

в)

Рис.2.4. Схемы и группы соединений двухобмоточных (а) и трехобмоточных (б) трансформаторов и автотрансформаторов (в)

Группу соединений обмоток трансформаторов характеризуют угловым смещением векторов линейных э.д.с. обмотки НН (в трехобмоточном трансформаторе и обмотки СН) по отношению к векторам линейных э.д.с. обмотки ВН. Группа обозначается числом единичных угловых смещений (единичное угловое смещение равно 30°), причем угол смещения отсчитывается от вектора линейной э.д.с. ВН по часовой стрелке до одноименного вектора э.д.с. НН (или СН). Например, для двухобмоточного трансформатора с соединением обмоток ВН звездой, а обмоток НН треугольником сдвиг по фазе линейных э.д.с. составляет 330° или 11 раз по 30° . Соответственно условное обозначение группы соединения обмоток: звезда – треугольник – 11 (см.рис.2.4).

В автотрансформаторах две коаксиальные обмотки имеют не только электромагнитную, но и электрическую связь (см.рис.2.4, в и рис. 2.5).

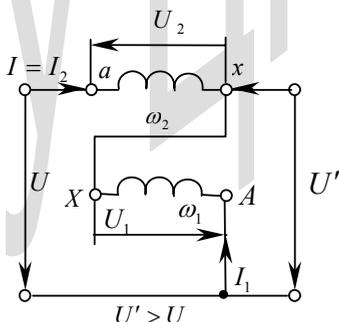


Рис.2.5. Соединения обмоток автотрансформаторов

При этом часть обмотки высшего напряжения используется в качестве обмотки среднего напряжения. В режиме холостого хода напряжения обмоток ВН и СН пропорциональны числу их витков.

В режиме опыта короткого замыкания (обмотка СН закорочена) токи в обмотках ВН I_1 и СН I_2 обратно – пропорциональны числу их витков.

Поскольку обмотка СН составляет часть обмотки ВН, на изготовление автотрансформатора затрачивается меньше материалов, чем на изготовление трансформатора той же мощности. Уменьшаются также и потери мощности. Причем, чем меньше различие напряжений ВН и СН, тем более экономичен автотрансформатор по сравнению с трансформатором.

2.2. Конструкции магнитопроводов

Магнитопровод в трансформаторостроении используется для значительного уменьшения тока холостого хода по сравнению с нагрузочным током. При этом в отсутствие противодействующих факторов магнитный поток сосредотачивается в магнитопроводе, поскольку в нем сопротивление магнитному потоку R_m на несколько порядков меньше, чем в воздухе

$$R_m = \frac{\ell}{\mu S}, \quad (2.4)$$

где ℓ - длина магнитопровода, μ - его магнитная проницаемость, S - его активное сечение.

Магнитопровод собирается из отдельных тонких пластин из электротехнической стали толщиной 0,35; 0,30 или 0,27 мм с нагревостойким и маслостойким изоляционным покрытием с толщиной на одной стороне около 5 мкм. Изоляция между пластинами необходима для исключения возможности создания замкнутых контуров для индуктированного магнитным потоком тока в магнитопроводе. Эти токи могут вызвать перегрев магнитопровода и создают добавочные потери в нем. Кроме того, индуктированные магнитным потоком вихревые токи создают встречный магнитный поток, вытесняющий основной поток из сердечника, что может привести к перегреву примыкающих к сердечнику частей обмоток и самого сердечника.

Максимум магнитного потока в магнитопроводе может быть определен соотношением

$$\Phi = SB_0, \quad (2.5)$$

где S - активная площадь магнитопровода, B_0 - амплитуда магнитной индукции, допускаемая в пределах 1,65 - 1,7 Тл для исключения насыщения стали в нормальных режимах работы трансформатора и при допустимом повышении напряжения.

Создаваемая в магнитопроводе э.д.с. определяется соотношением

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(SB_0 \sin \omega t) = -\omega SB_0 \cos \omega t. \quad (2.6)$$

Эффективное значение э.д.с. согласно (2.6) равно

$$E = \frac{\omega SB_0}{\sqrt{2}}. \quad (2.7)$$

При образовании контура тока в магнитопроводе, охватывающего все его активное сечение, ток в этом контуре определяется соотношением

$$I = \frac{E}{R} = \frac{\omega SB_0}{\sqrt{2R}}, \quad (2.8)$$

где R – активное сопротивление контура, определяемое в основном межлистовой изоляцией.

Потери мощности при протекании индуктивного тока в одном контуре с учетом (2.8) равны

$$\Delta P_1 = I^2 R = \frac{\omega^2 S^2 B_0^2}{2R}. \quad (2.9)$$

Магнитодвижущая сила одного контура с током равна

$$\sqrt{2}I = \Phi_1 R_m = B_1 S \frac{\ell_m}{\mu S} = \frac{B_1 \ell_m}{\mu}, \quad (2.10)$$

где $\Phi_1 = B_1 S$ – встречный магнитный поток, создаваемый индуктированным током, B_1 – магнитная индукция встречного магнитного потока, R_m – магнитное сопротивление магнитопровода, ℓ_m – средняя длина магнитного потока в магнитопроводе. Следовательно, магнитная индукция, создаваемая одним контуром с током с учетом (2.8), равна

$$B_1 = \frac{\sqrt{2}\mu I}{\ell_m} = \frac{\mu\omega SB_0}{R\ell_m}. \quad (2.11)$$

Число контуров с индуктированным током, при котором основная часть магнитного потока, создаваемого намагничивающим током в обмотке, вытесняется из сердечника, равно

$$n_k = \frac{B_0}{B_1} = \frac{B_0 \ell_m}{\sqrt{2}\mu I} = \frac{R\ell_m}{\mu\omega S}. \quad (2.12)$$

Предельные потери мощности во всех n_k контурах с током в магнитопроводе

$$\Delta P_{n_k} = n_k \Delta P_1 = \frac{\omega \cdot S \cdot B_0^2 \ell_m}{2\mu}, \quad (2.13)$$

не зависят от сопротивления изоляции магнитопровода.

Результаты расчетов по приведенным формулам при $S=0,5 \text{ м}^2$, $\ell_m=5 \text{ м}$ и различных значениях сопротивления контуров с током приведены в табл.2.1.

Таблица 2.1

$R, \text{ Ом}$	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
$I, \text{ А}$	183	91,5	36,6	18,3	19,15	3,7	1,83	0,92	0,37	0,18
$\Delta P_{1,} \text{ кВт}$	33,6	16,8	6,7	3,4	1,7	0,67	0,34	0,17	0,007	0,034
n_{κ}	6	12	30	63	100	100	100	100	100	100
$\Delta P_{n,\kappa} \text{ кВт}$	201	202	208	214	170	67	34	17	6,7	3,4

Из табл. 2.1 следует, что в магнитопроводе при относительно малом сопротивлении изоляции может выделяться достаточно большая мощность, чтобы вызвать разогрев магнитопровода до опасной температуры со всеми вытекающими последствиями вплоть до возгорания масла. С учетом нескольких возможных контуров с током возможные потери мощности в магнитопроводе оказываются сравнимыми с потерями в обмотках. При этом было принято, что больше ста контуров образоваться не могут (исходя из реальной высоты стержня магнитопровода).

С учетом данных табл. 2.1 можно принять в качестве безопасного сопротивления контуров с током $R \geq 1000 \text{ Ом}$.

При площади сечения магнитопровода $S=0,5 \text{ м}^2$ с учетом коэффициента заполнения магнитопровода $k_{зан} = 0,85$ эквивалентный диаметр магнитопровода

$$d_{\varnothing} = \sqrt{\frac{4S}{\pi \cdot k_{\varnothing}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,5}{\pi \cdot 0,85}} = 0,865 \text{ м}.$$

При этом длина контура тока по изоляции составляет около $0,7d_{\varnothing}$, а остальное по пластинам, сопротивление которых несравнимо меньше, чем по изоляции. Из полной длины контура $0,7d_{\varnothing}$ длина изоляции составит

$$\ell_{из} = \frac{\delta}{\Delta + \delta} 0,7d_{\varnothing}, \quad (2.14)$$

где δ - толщина изоляции, Δ - толщина листа стали.

Ширина пакета составляет $0,9d_{\varnothing}$.

При длине листа $\ell_{л}$ стержня магнитопровода полная площадь пакета составляет $\Pi = \ell_{л} \cdot 0,9d_{\varnothing}$.

По одной половине пакета ток течет в одну сторону, по другой – в другую. Следовательно, эффективная площадь пакета

$$\Pi_{эф} = 0,5\Pi = 0,45\ell_{л} \cdot d_{\varnothing} \quad (2.15)$$

и, следовательно, полное активное сопротивление контура тока равно

$$R = \frac{\rho \cdot 0,7}{0,45 \ell_{\lambda}} \cdot \frac{\delta}{\Delta + \delta} = 1,55 \frac{\rho}{\ell_{\lambda}} \frac{\delta}{\Delta + \delta}.$$

(2.16)

Отсюда необходимое удельное объемное сопротивление изоляции

$$\rho = 0,645 R_{\text{дон}} \cdot \ell_{\lambda} \frac{\Delta + \delta}{\delta}. \quad (2.17)$$

Подставляя в эту формулу $R_{\text{дон}}=1000$ Ом, $\Delta=0,35$ мм, $\delta=0,005$ мм получим

$$\rho = 0,645 \cdot 1000 \cdot \frac{0,355}{0,005} \ell_{\lambda} \approx 5 \cdot 10^4 \ell_{\lambda} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

В соответствии с вышеизложенным роль межлистовой изоляции чрезвычайно важна. Однако в ряде случаев влияние этой изоляции практически полностью ликвидируется в результате механической обработки листов стали в процессе их раскроя. При наличии заусениц на краях заготовок, полученных в процессе их раскроя, с размером более 5 мкм изоляция листов полностью шунтируется по краям, что приводит к образованию контуров тока с очень малым сопротивлением. Поэтому после раскроя листов необходимо удалять заусеницы, включая в технологический процесс очистку кромок листов после резки.

На некоторых трансформаторных заводах для улучшения изоляции между листами наносят дополнительно лаковое покрытие (лак КФ-965, ГОСТ 15030-78) толщиной до 10 мкм, что значительно увеличивает надежность межлистовой изоляции.

Магнитопровод силового трансформатора состоит из двух элементов, играющих существенно различную роль в проведении магнитного потока: стержней и ярем. Вокруг стержней устанавливаются коаксиально обмотки: как правило сначала обмотка низшего напряжения и затем (с соответствующим изоляционным расстоянием) обмотка высшего напряжения.

Ярма служат для обеспечения замкнутого контура для магнитного потока. Соответственно различают ярма горизонтальные, перпендикулярные стержню (стержням) и вертикальные, параллельные стержням. Части магнитопровода, находящиеся в зоне сопряжения стержней и ярем, называются углами.

Магнитопроводы однофазных силовых трансформаторов выполняются обычно броневые типа, когда замыкающие магнитный контур ярма располагаются с двух сторон от обмоток (рис.2.6). При таком расположении ярем достигается уменьшение высоты магнито-

провода и экономия стали. Действительно сечение ярем однофазного трансформатора должно быть не менее активного сечения стержня $S_{ст}$. Тогда высота одностороннего яра прямоугольной формы определится отношением

$$h_{я.0} = \frac{S_{ст}}{e_{я}}, \quad (2.18)$$

где $e_{я}$ – ширина яра.

Соответственно высота бокового яра (и высота магнитопровода в целом) (см. рис.2.6).

$$H_{м} = H_{я.б} = H_{ст} + 2h_{я.0} = H_{ст} + \frac{2S_{ст}}{e_{я}}. \quad (2.19)$$

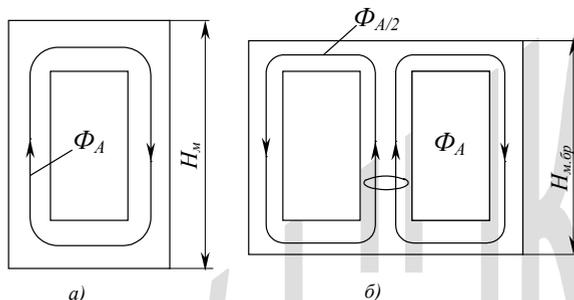


Рис.2.6. Магнитопровод однофазного трансформатора: с односторонним яром (а) и с двухсторонним яром(б) – броневой магнитопровод

Высота двухсторонних ярем (броневое типа) вдвое меньше, поскольку вместе они обеспечивают необходимое сечение для проведения магнитного потока

$$h_{я.бр} = \frac{S_{ст}}{2e_{я}} \quad (2.20)$$

и полная высота магнитопровода

$$H_{м.бр} = 2h_{я.бр} + H_{ст} = H_{ст} + \frac{S_{ст}}{e_{я}}. \quad (2.21)$$

Трехфазные трансформаторы выпускаются в двух исполнениях: стержневом и бронестержневом.

В трехстержневом варианте замкнутый контур для магнитного потока образуется ярами и стержнями (рис.2.7).

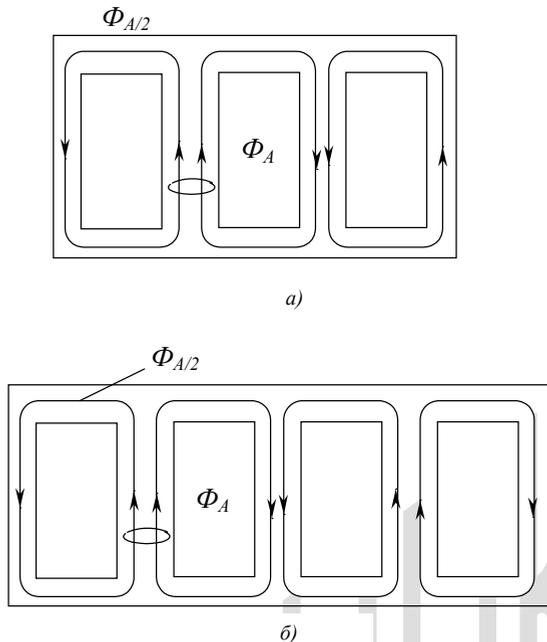


Рис. 2.7. Магнитопровод трехфазного трансформатора: стержневой (а) и бронестержневой (б)

Действительно при симметричной нагрузке трансформатора сумма токов в трех фазах всегда равна нулю. Соответственно и сумма магнитных потоков равна нулю. Например, при максимуме тока (а, следовательно, и магнитного потока) в одной фазе в других фазах ток противоположен по направлению и равен половине максимального. Соответственно магнитный поток по выходе из стержня одной фазы по ярмам доходит до двух других стержней, разделяясь на две равные части. Поэтому в этом случае ярма имеют максимальное сечение, как и в стержневом варианте однофазного трансформатора.

В бронестержневом варианте магнитный поток замыкается как по стержням, так и по боковым ярмам. Поскольку сопротивление магнитному потоку по стержням оказывается меньше из-за наличия согласной м.д.с. сечение боковых ярем $S_{я.б}$ принимается меньшим, чем основных ярем $S_{я.0}$ между соседними стержнями.

$$S_{я.0} = 0,57S_{\Sigma}; \quad S_{я.б} = 0,43S_{\Sigma}, \quad (2.22)$$

где S_{Σ} - суммарное сечение ярем, необходимое для проведения магнитного потока без насыщения ярем.

При большой мощности трансформатора обмотки каждой фазы трансформаторов располагаются вокруг двух стержней (рис.2.3). При этом боковые ярма не требуются, т.к. магнитный поток замыкается по двум стержням, переходя из одного стержня в другой по соединяющим их ярмам.

Поперечное сечение стержней магнитопровода, вокруг которых располагаются обмотки в форме круговых цилиндров, как правило, имеют ступенчатую форму фигуры, вписанной в окружность (см. рис.2.8).

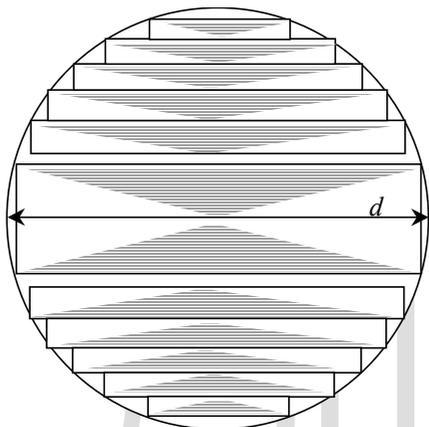


Рис.2.8. Поперечное сечение стержня магнитопровода

Размер пакетов этой фигуры подбирается таким образом, чтобы обеспечить возможно более высокое заполнение круга активным материалом (электротехнической листовой сталью), составляющее около 0,9 от площади круга. С учетом межлистовой изоляции общий коэффициент заполнения сечения круга составляет примерно $0,96 \cdot 0,9 \approx 0,86$.

В местах соединения стержней и ярм или в углах (встык – прямой, косой, рис.2.9) сопротивление магнитному потоку возрастает из-за необходимости его перехода из одного листа к другому по немагнитному материалу (воздуху, маслу). Это приводит к увеличению тока холостого хода трансформатора и, соответственно, потерь холостого хода. Поэтому стыкам уделяется особое внимание, с выполнением по возможности более точной подгонки стыкуемых листов.

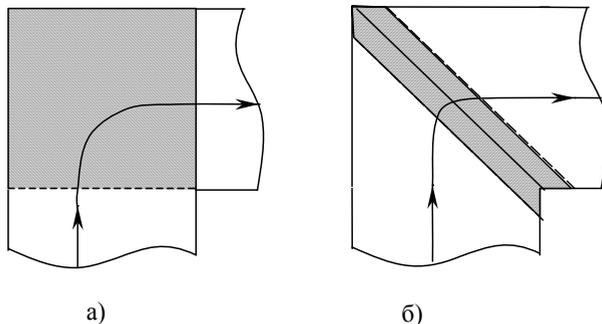


Рис. 2.9. Схемы угловых соединений: а – прямой стык, б – косой стык

Конструкция магнитопровода должна обеспечивать надежное скрепление и механическую прочность структуры, собранной из тонких пластин стали, массой до нескольких десятков тонн. Кроме того, в процессе эксплуатации трансформатора при коротком замыкании возникают усилия между обмотками, достигающие тысяч кило Ньютонов.

Поэтому после завершения сборки магнитопровода его стержни опрессовываются и стягиваются бандажами из стеклоленты (см. рис. 2.10).

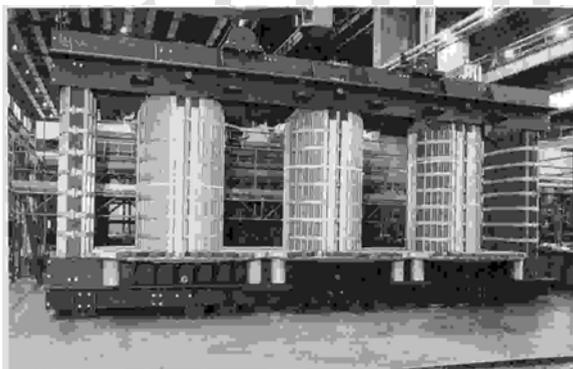


Рис.2.10. Общий вид трехфазного трансформатора с магнитопроводом броневого типа

Ярма стягиваются ярмовыми балками (как правило стальными, на некоторых заводах – из стеклопластика). Стальные ярмовые

балки стягиваются стальными шпильками, изолированными от балок и ярем для исключения возможности создания контуров для вихревых токов. Тем не менее наличие проводящих массивных элементов (балок), пронизываемых магнитным полем рассеяния трансформаторов, приводит к циркуляции вихревых токов в них, их разогреванию до недопустимо высоких температур, при которых происходит разложение масла, а в некоторых случаях и его возгорание.

Нагревание стенок бака вихревыми токами, индуцируемыми потоком рассеяния, привело к решению установки на них (стенках) магнитных шунтов, представляющих собой пакеты полос электротехнической стали, располагаемые вертикально на всю высоту обмоток или горизонтально между обмотками (в случае трехфазного исполнения трансформаторов). При этом магнитопровод по существу состоит из двух отдельных частей:

- основная часть, составляющая остов трансформатора;
- дополнительная часть, предназначенная для замыкания потока рассеяния трансформатора.

Причем эта дополнительная часть значительно усложняет конструкцию бака трансформатора, а расход стали на нее заметно увеличивает расход электротехнической стали.

Однако, полностью задачу канализации магнитного потока рассеяния пристенные шунты не решают: стяжные ярменные банки и другие металлические конструктивные элементы трансформатора пронизываются магнитным потоком, вызывая их перегрев. Кроме того, создание пути магнитному потоку с малым сопротивлением приводит к большему отклонению магнитных силовых линий от вертикали, индуктированию больших вихревых токов в крайних частях обмоток и, соответственно, к их перегреву (см.рис.2.11).

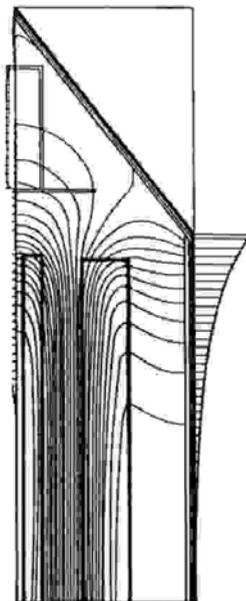


Рис 2.11. Магнитный поток рассеяния при наличии пристенных магнитных шунтов

По изложенным причинам необходимо изменить установившуюся конструкцию трансформаторов, полностью исключив возможность проникновения магнитного потока рассеяния в металлические конструктивные элементы трансформатора, включая стенки и крышки бака.

Такая задача решается с помощью специальных магнитных шунтов, прикрывающих сверху и снизу торцевые части обмоток [5.6]. Такие магнитные шунты являются естественной частью магнитопровода, примыкают к ярмам магнитопровода и таким образом направляют собранный магнитный поток рассеяния в ярма магнитопровода. При использовании пристенных магнитных шунтов отпадает необходимость применения пристенных магнитных шунтов. При этом добавочные потери от вихревых токов в трансформаторах становятся минимальными (см. § 3.4).

2.3. Конструкции обмоток

Обмотки силовых трансформаторов выполняются коаксиальными. Внутри располагается обмотка низшего напряжения, затем обмотка среднего напряжения (при ее наличии) и затем обмотка высшего напряжения. Между обмотками разного уровня напряжений располагается главная масло-барьерная изоляция, причем барьеры представляют собой коаксиальные цилиндры из электроизоляционного картона. Обмотки должны быть также надежно изолированы от магнитопровода, стенок бака и деталей крепления трансформатора.

Для уменьшения потерь от вихревых токов поперечные (радиальные) и продольные (осевые) размеры резко различны. Поперечный размер прямоугольных медных проводов изменяется от 1,4 до 5,6 мм, а продольный размер – от 3,75 до 16 мм. Поперечный размер прямоугольных алюминиевых проводов изменяется от 1,8 до 5,6 мм, а продольный от 3,75 до 18 мм.

Для обеспечения необходимого сечения витков они набираются из нескольких параллельных проводов (в поперечном направлении).

По конструкции различают цилиндрические, винтовые и катушечные обмотки (рис. 2.12).

Особенностью цилиндрической обмотки является плотная намотка витков без зазоров по высоте обмотки (естественно с изоляцией между витками). В зависимости от мощности трансформаторов цилиндрическая обмотка может быть выполнена из одного, двух или нескольких слоев. Между соседними слоями устраивается усиленная изоляция и масляные каналы для охлаждения обмотки.

Винтовые обмотки отличаются тем, что соседние витки обмотки разделяются охлаждающими каналами. Эти обмотки могут быть одноходовыми, двухходовыми или многоходовыми. Для выравнивания тока по проводам витков применяется транспозиция проводников.

Катушечная обмотка состоит из ряда последовательно соединенных катушек, намотанных в виде плоских спиралей. Соседние катушки разделены каналами, предназначенными для охлаждения обмотки. Такая конструкция применяется для обмоток высшего (и среднего) напряжения трансформаторов.

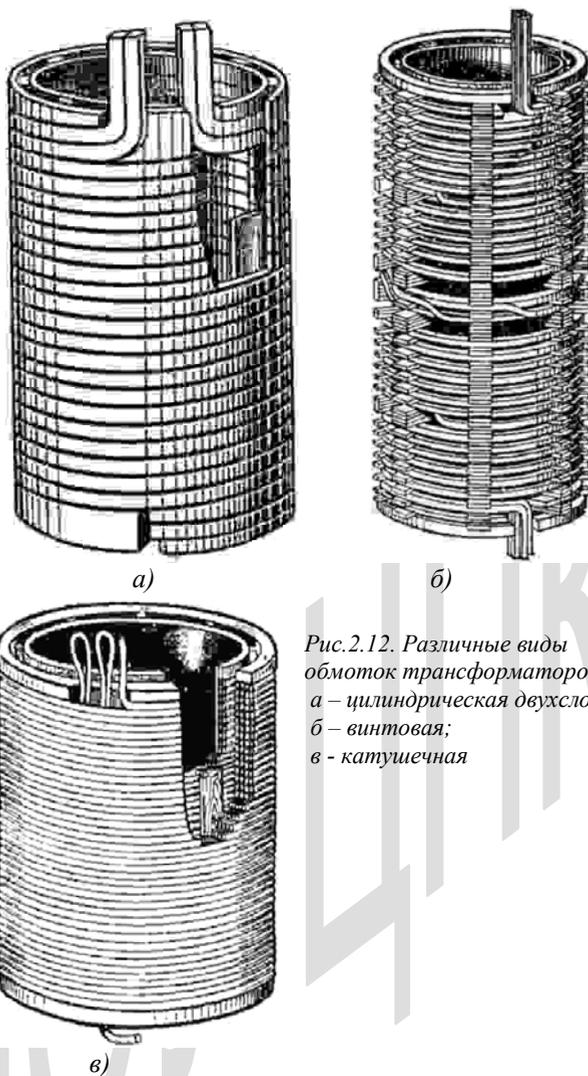


Рис. 2.12. Различные виды обмоток трансформаторов:
а – цилиндрическая двухслойная;
б – винтовая;
в – катушечная

2.4. Охлаждение трансформаторов

Потери мощности в силовых трансформаторах при номинальном токе составляют от 1% (по отношению к номинальной мощности) при номинальной мощности трансформатора 2,5÷4 МВА до 0,22% при номинальной мощности 267 МВА и менее при дальнейшем увеличении номинальной мощности трансформатора. Следовательно, мощность теплового потока, которую необходимо отвести от трансформатора составляет от 25÷40 кВт для трансформаторов относительно малой мощности до 580 кВт и более для трансформаторов большой мощности. Соответственно при увеличении мощности трансформатора усложняется система охлаждения.

При мощности трансформаторов до 10÷16 МВА их охлаждение обеспечивается (вертикальными) трубчатыми радиаторами, присоединяемыми непосредственно к их баку (см. рис.2.13).

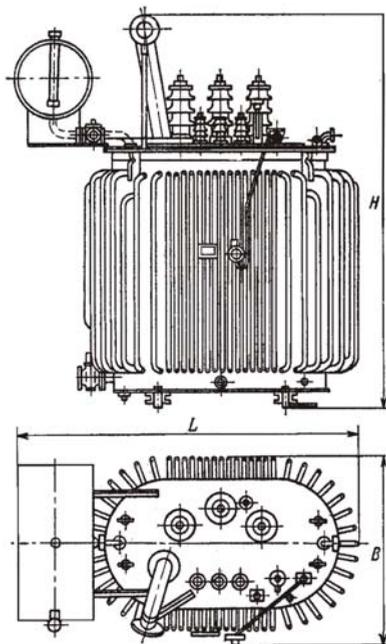


Рис. 2.13. Естественное масляное охлаждение трансформатора

В этом случае нагретое масло из бака поступает сверху в трубы, а охлажденное масло с нижней части труб поступает в бак. С поверхности труб тепловой поток рассеивается в окружающее пространство путем излучения и конвекции воздуха. Такая система охлаждения называется естественной масляной и обозначается буквой М. При необходимости вокруг бака располагаются два ряда труб.

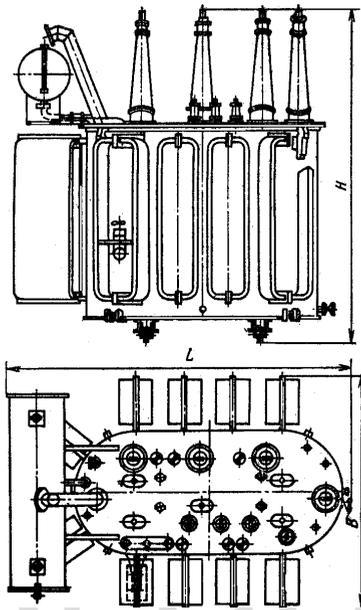


Рис.2.14. Бак с радиаторами

Дальнейшее увеличение теплопроводящей способности достигается путем установки на баке радиаторов (рис.2.14), представляющих собой ряды параллельных труб, соединенных коллекторами, присоединенными к баку сверху и снизу.

Увеличение эффективности теплоотвода от радиаторов достигается установкой на них вентиляторов, усиливающих потоки воздуха по сравнению с естественной его циркуляцией путем конвекции. Такая система охлаждения называется масляной с дутьем и обозначается буквой Д.

Принудительная усиленная циркуляция масла в баке осуществляется путем установки насосов, встроенных в маслопровод, соединяю-

щий бак с радиаторами. Такая система охлаждения называется масляной с дутьем и принудительной циркуляцией масла и обозначается буквами ДЦ.

Некоторые производители предпочитают не усложнять конструкцию бака трансформатора и собирают систему охлаждения отдельно от бака, устанавливаемую на отдельном фундаменте. В ней имеется необходимое количество радиаторов, соединенных общим коллектором, который в свою очередь соединен с баком только двумя трубами с встроенным насосом, обеспечивающим движение масла от бака трансформатора к выносному охладителю и обратно. Эта система охлаждения обозначается ВДЦ.

Принятая при конструировании трансформатора система охлаждения должна обеспечивать ограничение температуры обмоток на уровне 65°C, поверхности магнитопровода и конструктивных элементов - 75°C, масла в верхних слоях - 60°C (с расширителем), что необходимо контролировать в эксплуатации. В случае превышения указанных значений температуры принимаются соответствующие меры вплоть до ограничения нагрузки трансформатора.

ГЛАВА 3. НОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

3.1. Основные соотношения, характеризующие работу трансформаторов

Рассмотрим вначале наиболее простой случай двухобмоточного трансформатора пофазного исполнения в искусственных условиях опыта холостого хода и опыта короткого замыкания.

В опыте холостого хода одна из коаксиальных обмоток трансформатора (будем называть ее первичной) соединена с источником напряжения (мощности), а другая обмотка (вторичная) разомкнута. Протекающий по первичной обмотке ток холостого хода $I_{1,0}$ создает магнитное поле с напряженностью

$$H_0 = \frac{\sqrt{2}I_{1,0}N_1}{\ell_m},$$

(3.1)

где N_1 – число витков в первичной обмотке, ℓ_m – средняя длина контура, охватывающего обмотку с током (средняя длина магнитных силовых линий). Распределение напряженности магнитного поля показано на рис 3.1.

Магнитная индукция в магнитопроводе равна

$$B_0 = \mu H_0 = \frac{\sqrt{2}\mu I_{1,0}N_1}{\ell_\mu}. \quad (3.2)$$

Между внутренним краем первичной обмотки и магнитопроводом индукция

$$B_0 = \frac{\sqrt{2}\mu_0 I_{1,0}N_1}{\ell_\mu}. \quad (3.3)$$

Длина магнитной силовой линии вне магнитопровода несколько меньше, чем по магнитопроводу (см.рис.3.1). Поскольку $\mu \gg \mu_0$ (на три порядка), магнитная индукция в магнитопроводе значительно больше, чем вне его (см. рис.3.1б).

Основная часть магнитного потока

$$\Phi_0 = B_0 S_{ct} = \frac{\sqrt{2}\mu}{\ell_m} I_{1,0} N_1 S_{ct} \quad (3.4)$$

сосредоточена внутри магнитопровода (S_{ct} – сечение магнитопровода). Поэтому можно считать, что в режиме холостого хода трансформатора магнитный поток полностью замыкается по магнитопроводу (рис.3.1а).

При этом магнитный поток полностью охватывает все витки обеих обмоток (первичной и вторичной). Это означает, что индуцируемые в них э.д.с. E_1 и E_2 пропорциональны числу витков в них

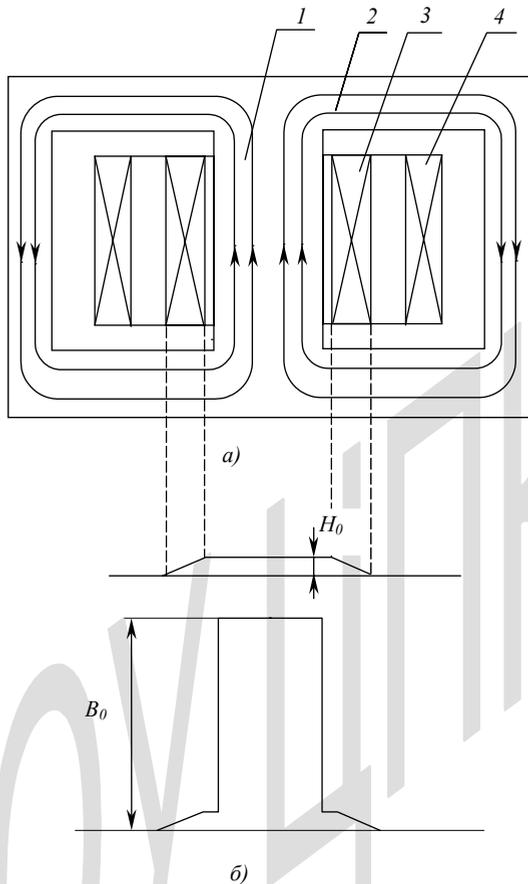


Рис. 3.1. Схема однофазного двухобмоточного трансформатора с магнитопроводом бронзового типа (а): 1 – стержень, 2 – ярмо, 3 – первичная обмотка, 4 – вторичная обмотки; и распределение магнитного поля в радиальном направлении в режиме холостого хода (б)

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{\kappa_T}, \quad (3.5)$$

где κ_T – отношение напряжений обмотки высшего и низшего напряжений (коэффициент трансформации), или иначе

$$E_{2,0} = \kappa_T E_{1,0}. \quad (3.6)$$

Связь между э.д.с. $E_{1,0}$ первичной обмотки и магнитным потоком определяется соотношением

$$\sqrt{2}E_{1,0} = \omega N_1 \Phi_0 = 2\pi \cdot f \cdot N_1 B_0 S_{CT}, \quad (3.7)$$

где S_{CT} – активное сечение стержня магнитопровода.

Поскольку обычно задается максимальная индукция в магнитопроводе при номинальном напряжении $B_0 \approx 1,7 \text{ Тл}$ могут варьироваться величины N_1 и S_{CT} , причем таким образом, что их произведение сохраняется неизменным

$$N_1 S_{CT} = \frac{\sqrt{2}E_{1,0}}{\omega B_0} = const. \quad (3.8)$$

При заданном (известном) числе витков N_1 сечение магнитопровода равно

$$S_{CT} = \frac{\sqrt{2}U_{\phi.1}}{\omega B_0 N_1}. \quad (3.9)$$

При выводе формулы (3.4) предполагалось, что магнитопровод однороден с магнитной проницаемостью μ . В действительности стержни и яра магнитопровода собираются из пакетов листов электротехнической стали, которые состыковываются в так называемых «углах» (см. выше). При состыковке этих элементов неизбежны зазоры с диэлектрической постоянной μ_0 . Для учета этого обстоятельства перепишем формулу (3.4) в виде

$$\begin{aligned} \sqrt{2}I_{1,0}N_1 &= \Phi_0 R_m = B_0 S_{CT} \left(\frac{\ell_\mu}{\mu S_{CT}} + \frac{\ell_{cm}}{\mu_0 S_{CT}} \right) = \\ &= B_0 \left(\frac{\ell_\mu}{\mu} + \frac{\ell_{cm}}{\mu_0} \right) = B_0 \frac{\ell_m}{\mu} \left(1 + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\ell_{cm}}{\ell_\mu} \right), \end{aligned} \quad (3.10)$$

где R_m – магнитное сопротивление магнитному потоку, S_{CT} – активное сечение стали сердечника, ℓ_μ – средняя длина магнитного потока в магнитопроводе (без стыков), ℓ_{cm} – длина стыков.

Суммарная длина стыков на пути магнитного потока может достигать 1 мм. При длине пути магнитного потока в магнитопроводе

порядка нескольких метров добавочный член в (скобках) в формуле (3.10) имеет порядок

$$\frac{\mu}{\mu_0} \cdot \frac{\ell_{cm}}{\ell_{\mu}} \approx 4000 \frac{1 \cdot 10^{-3}}{5} = 0,8.$$

Следовательно, магнитное сопротивление стыков сравнимо с магнитным сопротивлением всего магнитопровода и им нельзя пренебрегать.

Из (3.10) определяем индуктивную составляющую тока холостого хода трансформатора

$$I_{1,0} = \frac{B_0}{\sqrt{2}} \frac{\ell_{\mu}}{\mu N_1} \left(1 + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\ell_{cm}}{\ell_{\mu}} \right), \quad (3.11)$$

откуда следует, что ток холостого хода трансформатора пропорционален средней длине пути магнитного потока и магнитной индукции в магнитопроводе и обратно - пропорционален числу витков магнитопровода. Что касается учета влияния стыков, то оно может быть наиболее точно определено в опыте холостого хода трансформатора по измеренному значению тока $I_{1,0}$ и известным величинам B_0 , ℓ_{μ} , μ , μ_0 .

Совместное решение двух уравнений (3.7) и (3.10) позволяет определить связь между током и напряжением в режиме холостого хода трансформатора.

$$\frac{E_{1,0}}{I_{1,0}} = x_{1,0} = \frac{2\pi \cdot \mu \cdot f \cdot N_1^2 S_{CT}}{\ell_{\mu} \left(1 + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\ell_{cm}}{\ell_{\mu}} \right)}, \quad (3.12)$$

где $x_{1,0}$ – индуктивное сопротивление трансформатора на холостом ходу. Поскольку при заданном напряжении произведение $N_1 S_{CT} = const$ (см. формулу (3.7)), индуктивное сопротивление трансформатора пропорционально числу витков N_1 и обратно – пропорционально длине пути магнитного потока в магнитопроводе.

Активная составляющая тока холостого хода определяется потерями в стали и меди.

Активное сопротивление трансформатора в режиме холостого хода определяется в основном потерями в стали ΔP_0 , поскольку потери на нагрев проводов при малом токе холостого хода пренебрежимо малы,

$$r_{1,0} = \frac{\Delta P_0}{I_{1,0}^2}. \quad (3.13)$$

Следовательно, отношение активного и индуктивного сопротивлений трансформатора на холостом ходу равно

$$\begin{aligned} \frac{r_{1,0}}{x_{1,0}} &= \frac{\Delta P_0}{I_{1,0}} \frac{1}{E_{1,0}} \leq \frac{0,1 \cdot 10^{-2} P_{ном}}{I_{1,0} E_{1,0}} \approx \frac{0,1 \cdot 10^{-2} U_{1,0} I_{1,ном}}{I_{1,0} U_{1,0}} = \\ &= \frac{0,1 \cdot 10^{-2} I_{1,ном}}{I_{1,0}} \approx \frac{0,1 \cdot 10^{-2}}{0,5 \cdot 10^{-2}} = 0,2, \end{aligned} \quad (3.14)$$

поскольку для мощных трансформаторов $\Delta P_0 \leq 0,1 \cdot 10^{-2} P_{ном}$ ($P_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора) и $I_{1,0} \approx 0,5 \cdot 10^{-2} I_{1,ном}$ ($I_{1,ном}$ – номинальный ток первичной обмотки трансформатора) и $E_{1,0} \approx U_{1,0}$. Следовательно, полное сопротивление трансформатора в режиме холостого хода

$$z_{1,0} = \sqrt{x_{1,0}^2 + r_{1,0}^2} = x_{1,0} \sqrt{1 + 0,2^2} \approx 1,02 x_{1,0}$$

мало отличается от его индуктивного сопротивления. Однако из-за активного сопротивления цепи ток холостого хода отстает по фазе от напряжения не на 90° , а на меньший угол (см. рис.3.2)

$$\varphi_0 = 90^\circ - \arctg 0,2 \approx 80^\circ.$$

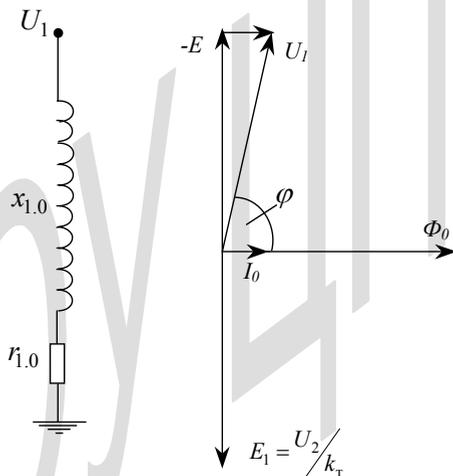


Рис. 3.2. Эквивалентная схема (а) и векторная диаграмма (б) двухобмоточного повышающего трансформатора на холостом ходу ($I_2=0$)

Таким образом, сдвиг по фазе э.д.с. E_1 и напряжения на первичной обмотке составляет 170° , а абсолютные величины E_1 и $U_{1.0}$ практически одинаковы

$$U_{1.0} = I_{1.0} z_{1.0} = I_{1.0} \sqrt{x_{1.0}^2 + r_0^2} = I_{1.0} x_{1.0} \sqrt{1 + \left(\frac{r_0}{x_{1.0}}\right)^2} \approx E_{1.0} 1,02,$$

т.е. различие находится в пределах точности измерений.

Энергия магнитного поля трансформатора в режиме холостого хода с учетом непрерывности магнитного потока в магнитопроводе равна

$$\begin{aligned} W_0 &= \frac{1}{2} (B_0 H_0 V_m + B_{cm} H_{cm} V_{cm}) \approx \frac{1}{2} \left(\frac{B_0^2}{\mu} S_{CT} \ell_\mu + \frac{B_0^2}{\mu_0} S_{CT} \ell_{cm} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \frac{B_0^2}{\mu} S_{CT} \ell_\mu \left(1 + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\ell_{cm}}{\ell_\mu} \right) = \frac{\mu}{\ell_\mu} S_{CT} (I_{1.0} N_1)^2 \left(1 + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\ell_{cm}}{\ell_\mu} \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

где $V_m = S_{CT} \cdot \ell_\mu$ - объем магнитопровода, $V_{cm} = S_{CT} \cdot \ell_{cm}$ - объем стыков, причем в последнем выражении B_0 подставлено из (3.2).

Соответственно мощность магнитного поля трансформатора в режиме холостого хода (на одну фазу) равна

$$\begin{aligned} Q_0 &= \omega W_0 = \frac{\omega B_0^2}{2 \mu} S_{CT} \ell_\mu \left(1 + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\ell_{cm}}{\ell_\mu} \right) = \\ &= \frac{\omega \cdot \mu}{\ell_\mu} S_{CT} (I_{1.0} N_1)^2 \left(1 + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\ell_{cm}}{\ell_\mu} \right). \end{aligned} \quad (3.16)$$

Из формулы (3.16) следует, что мощность магнитного поля трансформатора в магнитопроводе (его реактивная мощность в режиме холостого хода) пропорциональна объему магнитопровода и квадрату индукции в нем, а также возрастает при увеличении объема стыков.

В опыте короткого замыкания к первичной обмотке трансформатора прикладывается такое напряжение, чтобы ток во вторичной обмотке был равен номинальному току. Это напряжение называется напряжением короткого замыкания трансформатора. Как правило, для двухобмоточных силовых трансформаторов оно составляет от десяти до пятнадцати процентов от номинального напряжения: $U_{1.к.з.} = (0,10 \div 0,15) U_{1.ном.}$

Поскольку в опыте короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора напряжение на ней равно нулю, магнитный поток,

охватывающий одновременно все витки обеих обмоток, отсутствует (см. рис.3.3).

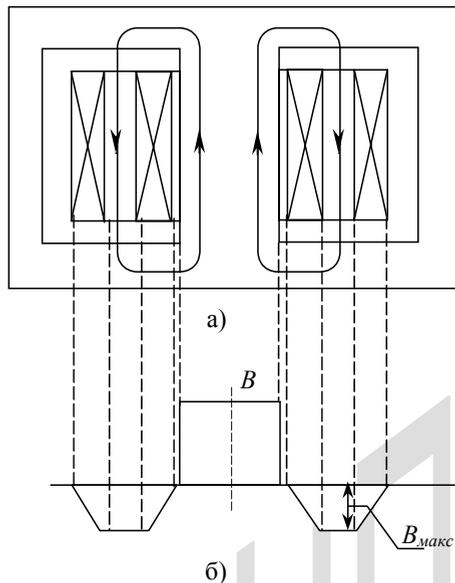


Рис. 3.3. Распределение магнитного потока двухобмоточного повышающего трансформатора в режиме опыта короткого замыкания

Соответственно отсутствует и ток намагничивания. В первичной и вторичной обмотках протекают токи противоположного направления, соотношение между которыми аналогично соотношению напряжений в опыте холостого хода

$$I_1 N_1 = -I_2 N_2, \quad (3.17)$$

поскольку создаваемые ими магнито-движущие силы равны по величине и противоположны по знаку.

Создаваемый м.д.с. вторичной (внешней) обмотки встречный магнитный поток (по отношению к потоку, создаваемому первичной обмоткой) ликвидирует поток в боковых ярмах и прилегающих к ним участках основных ярем. В результате магнитный поток меняет путь и замыкается по межобмоточному пространству в области, ограниченной наружной поверхностью внешней обмотки ВН и внутренней поверхностью внутренней обмотки НН (см. рис. 3.3).

По выходе из области расположения обмоток в обычных конструкциях трансформаторов часть (около половины) магнитного пото-

ка направляется в ярма (и замыкается по боковым ярмам), а другая часть пронизывает конструктивные элементы трансформатора: стяжные балки ярем, бак трансформатора и т.п. (см. рис. 2.11).

Это обстоятельство послужило основанием к введению термина, определяющего магнитный поток в опыте к.з., - поток рассеяния. Некоторые производители принимают меры для улавливания потока рассеяния по выходе из зоны расположения обмоток, особенно при изготовлении трансформаторов большой единичной мощности.

Для этой цели применяются специальные (приярменные) магнитные шунты, направляющие большую часть магнитного потока в ярма. Для упрощения анализа в дальнейшем будет использована именно такая конструкция трансформатора.

В рассматриваемом случае опыта короткого замыкания напряженность магнитного поля максимальна в межобмоточном пространстве, а в пределах расположения обмоток уменьшается от максимального значения до нуля (см.рис.3.3). В межобмоточном пространстве напряженность магнитного поля равна

$$H_{max} = \frac{\sqrt{2}}{\ell_0} I_{1,ном} N_1, \quad (3.18)$$

где ℓ_0 – высота окна магнитопровода.

Соответственно магнитная индукция в межобмоточном пространстве равна

$$B_{max} = \mu_0 H_{max} = \frac{\sqrt{2}\mu_0}{\ell_0} I_{1,ном} N_1. \quad (3.19)$$

Магнитный поток в межобмоточном пространстве

$$\Phi_{м.об} = B_{max} S_3 = B_{max} \pi d_{12} a_{12}, \quad (3.20)$$

где a_{12} – ширина зазора между обмотками, d_{12} -его средний диаметр.

В зоне внутренней (первичной) обмотки магнитная индукция изменяется согласно рис. 3.3

$$B_2 = B_{max} \frac{r - 0,5(d_{12} - a_{12} - 2a_1)}{a_1}, \quad (3.21)$$

где r – радиус окружности внутри обмотки, a_1 – ширина первичной обмотки.

Магнитный поток во внутренней (первичной) обмотке равен

$$\begin{aligned}\Phi_{об.1} &= 2\pi B_{\max} \int_{0,5(d_{12}-a_{12}-2a_1)}^{0,5(d_{12}-a_{12})} \frac{r-0,5(d_{12}-a_{12}-2a_1)}{a_1} r dr = \\ &= \frac{a_1}{2} \pi B_{\max} \left(d_{12} - a_{12} - \frac{2}{3} a_1 \right).\end{aligned}\quad (3.22)$$

В зоне внешней (вторичной) обмотки магнитная индукция уменьшается

$$B_1 = B_{\max} \frac{0,5(d_{12} + a_{12} + 2a_2) - r}{a_2}, \quad (3.23)$$

где a_2 – ширина вторичной обмотки.

Магнитный поток в этой зоне равен

$$\begin{aligned}\Phi_{об.1} &= 2\pi B_{\max} \int_{0,5(d_{12}+a_{12})}^{0,5(d_{12}+a_{12}+2a_2)} \frac{0,5(d_{12} + a_{12} + 2a_2) - r}{a_2} r dr = \\ &= \pi B_{\max} \frac{a_2}{2} \left(d_{12} + a_{12} + \frac{2}{3} a_2 \right).\end{aligned}\quad (3.24)$$

Суммарный поток во всех трех зонах согласно (3.17), (3.20), (3.22), (3.24) равен

$$\begin{aligned}\Phi &= \pi B_{\max} \left[d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right) + \frac{1}{2} (a_2 - a_1) \left(a_{12} + \frac{2(a_1 + a_2)}{3} \right) \right] = \\ &= \frac{\sqrt{2}\mu_0}{\ell_0} I_{1,ном} N_1 S_{эк},\end{aligned}\quad (3.25)$$

где эквивалентное поперечное сечение магнитного потока равно

$$S_{эк} = \pi \left[d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right) + \frac{1}{2} (a_2 - a_1) \left(a_{12} + \frac{2(a_1 + a_2)}{3} \right) \right]. \quad (3.26)$$

Это сечение $S_{эк}$ меньше реального сечения согласно рис.3.3, поскольку согласно (3.25) оно предполагает одинаковую индукцию B_{\max} во всем сечении.

Энергия магнитного потока в межобмоточном пространстве согласно (3.18), (3.19) равна

$$W_{м.об} = \frac{1}{2} B_{\max} H_{\max} V_{м.об} = \frac{\mu_0}{\ell_0} (I_{1,ном} N_1)^2 \pi d_{12} a_{12}. \quad (3.27)$$

Энергия магнитного поля в зоне расположения внутренней (первичной) обмотки с учетом (3.19), (3.21) равна

$$\begin{aligned}
 W_{об.2} &= \frac{1}{2} \int_{0,5(d_{12}-a_{12}-a_1)}^{0,5(d_{12}-a_{12})} B(r) \cdot H(r) dV_{об.1} = \\
 &= \frac{2\pi\ell_0 B_{макс}^2}{2\mu_0} \int_{0,5(d_{12}-a_{12}-2a_1)}^{0,5(d_{12}-a_{12})} \frac{[r - 0,5(d_{12} - a_{12} - 2a_1)]^2}{a_1^2} r dr = \\
 &= \frac{\pi\mu_0}{3\ell_0} (N_1 I_{1.ном})^2 a_1 \left(d_{12} - a_{12} - \frac{a_1}{2} \right), \quad (3.28)
 \end{aligned}$$

где $dV_{об.1} = 2\pi \cdot r \cdot \ell_0 dr$.

Энергия магнитного поля в зоне расположения внешней (вторичной) обмотки равна

$$\begin{aligned}
 W_{об.1} &= \frac{1}{2} \int_{0,5(d_{12}+a_{12})}^{0,5(d_{12}+a_{12}+2a_2)} B(r) \cdot H(r) dV_{об.2} = \\
 &= \frac{2\pi\ell_0 B_{макс}^2}{2\mu_0} \int_{0,5(d_{12}+a_{12})}^{0,5(d_{12}+a_{12}+2a_2)} \frac{[0,5(d_{12} + a_{12} + 2a_2) - r]^2}{a_2^2} r dr = \\
 &= \frac{\pi\mu_0}{3\ell_0} (N_1 I_{1.ном})^2 a_2 \left(d_{12} + a_{12} + \frac{a_2}{2} \right), \quad (3.29)
 \end{aligned}$$

где $dV_{об.2} = 2\pi \cdot r \cdot \ell_0 dr$.

Суммарная энергия магнитного потока трансформатора в режиме опыта к.з. равна

$$\begin{aligned}
 W_{м.к.з.} &= W_{м.об} + W_{об.1} + W_{об.2} = \\
 &= \frac{\pi\mu_0 (N_1 I_{1.ном})^2}{\ell_0} \left[d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) + \frac{1}{3} (a_2 - a_1) \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \right] = \\
 &= \frac{\mu_0 (N_1 I_{1.ном})^2}{\ell_0} S_{эф}, \quad (3.30)
 \end{aligned}$$

где эффективное сечение магнитного потока

$$S_{эф} = \pi \left[d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) + \frac{1}{3} (a_2 - a_1) \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \right], \quad (3.31)$$

меньше эквивалентного его сечения согласно (3.26) поскольку магнитный поток в зоне расположения обмоток неполностью сцепляется со

всеми витками обмоток. Иными словами часть магнитного потока не участвует в индуктировании э.д.с. в обмотках трансформатора.

Мощность магнитного поля трансформатора в режиме опыта к.з.

$$Q_{\text{м.к.з.}} = \omega W_{\text{м.к.з.}} \approx \frac{\omega \mu_0 \pi}{\ell_0} (N_1 I_{1.\text{ном}})^2 d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right). \quad (3.32)$$

Отношение мощностей магнитного поля трансформатора в режиме опыта его короткого замыкания и холостого хода согласно (3.16) и (3.32) равно

$$\frac{Q_{\text{м.к.з.}}}{Q_{\text{м.0}}} \approx \frac{\mu_0}{\mu} \frac{\ell_{\mu}}{\ell_0} \frac{\pi d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \left(\frac{I_{1.\text{ном}}}{I_{1.0}} \right)^2}{S_{\text{СТ}} \left(1 + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\ell_{\text{ст}}}{\ell_{\mu}} \right)}. \quad (3.33)$$

Для мощных трансформаторов ток холостого хода составляет не более 0,5% от номинального тока, отношение $\pi d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) : S_{\text{СТ}} \approx 1$; отношение $\ell_{\mu} / \ell_0 \approx 3$; отношение $\mu / \mu_0 \approx 3000$, отношение $\ell_{\text{ст}} / \ell_{\mu} \approx 1/6000$. При этих данных отношение $Q_{\text{м.к.з.}} / Q_{\text{м.0}} \approx 30$.

В номинальном режиме работы трансформатора (при номинальном напряжении и номинальном токе) ток намагничивания создает поток в магнитопроводе, охватывающий все витки обеих обмоток, а номинальный ток нагрузки создает магнитный поток такой же по величине, как в опыте короткого замыкания, отличающийся лишь по фазе, поскольку ток нагрузки никогда не бывает чисто-индуктивным, как в опыте короткого замыкания. Следовательно, энергия магнитного поля трансформатора сосредоточена в области расположения обмоток. Это означает, что основную роль в передаче электроэнергии от одной обмотки к другой играет магнитный поток вне магнитопровода. Поэтому магнитный поток, создаваемый током нагрузки следует называть рабочим магнитным потоком. И только часть этого потока, которую не удастся уловить с помощью магнитных шунтов, проникающую в конструктивные элементы трансформатора, можно называть потоком рассеяния. Отсюда следует важный вывод о целесообразности канализации рабочего магнитного потока, создания для него канала с минимальными препятствиями, обеспечивающего минимальное добавочное магнитное сопротивление после выхода из зоны расположения обмоток.

Связь между энергией магнитного поля трансформатора в режиме опыта короткого замыкания и номинальным током определяется соотношением

$$W_{\text{м.к.з.}} = L_{\text{к.з.}} I_{1.\text{ном}}^2 \quad (3.34)$$

Приравнивая выражения (3.31) и (3.34) для энергии магнитного поля трансформатора в режиме опыта короткого замыкания получаем формулу для индуктивности трансформатора в режиме опыта к.з.

$$\begin{aligned} L_{\text{к.з.}} &\approx \frac{\mu_0 \pi N_1^2}{\ell_0} \left[d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) + \frac{1}{3} (a_2 - a_1) \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \right] \approx \\ &\approx \frac{\mu_0 N_1^2}{\ell_0} S_{\text{эф}} \approx \frac{\mu_0 \pi N_1^2}{\ell_0} d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right). \end{aligned} \quad (3.35)$$

Соответственно индуктивное сопротивление трансформатора в режиме опыта к.з. равно

$$x_{1.\text{к.з.}} = \omega L_{\text{к.з.}} = \frac{\omega \mu_0 N_1^2}{\ell_0} S_{\text{эф}} \approx \frac{\omega \mu_0 \pi N_1^2}{\ell_0} d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right). \quad (3.36)$$

Отношение индуктивных сопротивлений трансформатора в режимах опытов холостого хода и к.з. согласно (3.12) и (3.36)

$$\frac{x_{1.\text{к.з.}}}{x_{1.0}} = \frac{\mu_0}{\mu} \frac{S_{\text{эф}}}{S_{\text{СТ}}} \frac{\ell_{\mu}}{\ell_0} \left(1 + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\ell_{\text{см}}}{\ell_0} \right). \quad (3.37)$$

Поскольку $S_{\text{эф}} \approx S_{\text{СТ}}$; $\ell_{\mu} \approx 3\ell_0$ отношение $\frac{x_{1.\text{к.з.}}}{x_{1.0}} \approx$

$$\approx \frac{\mu_0}{\mu} \approx 1,5 \cdot 10^{-3}. \text{ Т.е. индуктивное сопротивление трансформатора на}$$

холостом ходу на три порядка больше, чем в режиме опыта короткого замыкания.

Для оценки активного сопротивления трансформатора в опыте к.з. воспользуемся тем обстоятельством, что потери в трансформаторах в этом режиме не превышают 0,5% их номинальной мощности, т.е.

$$I_{1.\text{ном}}^2 r_{1.\text{к.з.}} \leq 0,005 \cdot U_{1.\text{ном}} I_{1.\text{ном}},$$

откуда

$$r_{1.\text{к.з.}} \leq \frac{0,005 U_{1.\text{ном}}}{I_{1.\text{ном}}} \approx 0,005 \frac{U_{1.\text{ном}}}{U_{1.\text{к.з.}}} z_{1.\text{к.з.}} = (0,05 \div 0,033) z_{1.\text{к.з.}},$$

т.к. отношение $U_{1.\text{к.з.}}/U_{1.\text{ном}} = 0,1 \div 0,15$ для мощных трансформаторов.

Индуктивное сопротивление трансформатора в режиме опыта к.з. согласно (1.32)

$$x_{1.к.з.} = z_{1.к.з.} \sqrt{1 - \left(\frac{r_{1.к.з.}}{z_{1.к.з.}} \right)^2} \approx 0,999 z_{1.к.з.}.$$

Следовательно, при анализе условий работы силовых трансформаторов в режиме опыта к.з. их активным сопротивлением можно пренебречь. Однако в общем случае в режиме опыта к.з. трансформатора его эквивалентная схема соответствует рис.3.4а. При этом ток и магнитный поток отстают от приложенного напряжения $U_{1.к.з.}$ практически на 90° (см. рис.3.4б).

Полученные выше соотношения позволяют выразить величину магнитного потока Φ в опыте короткого замыкания через напряжение короткого замыкания.

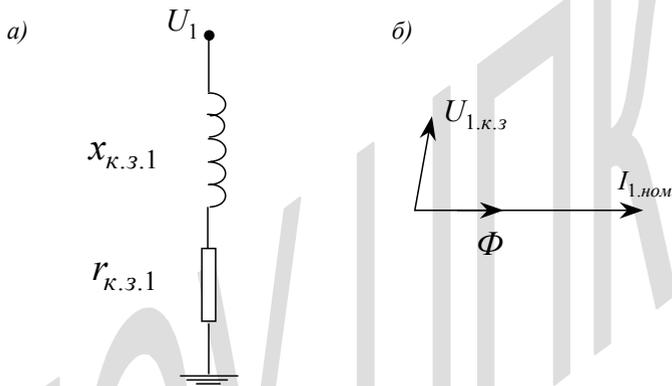


Рис. 3.4. Эквивалентная схема (а) и векторная диаграмма (б) двухобмоточного трансформатора в режиме опыта к.з.

Действительно, согласно (3.36)

$$I_{1.ном} \approx \frac{U_{1.к.з.}}{x_{1.к.з.}} = \frac{U_{1.к.з.} \ell_0}{2\pi \cdot f \cdot \mu_0 N_1^2 S_{эф}}, \quad (3.38)$$

Подставляя это выражение для $I_{1.ном}$ в формулу (3.25), получим величину магнитного потока в опыте к.з.

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} U_{1.к.з.} S_{эк}}{2\pi \cdot f \cdot N_1 S_{эф}}. \quad (3.39)$$

Из формулы (3.7) определяем величину магнитного потока в опыте холостого хода

$$\Phi_0 = \frac{\sqrt{2}E_{1,0}}{2\pi \cdot f \cdot N_1} \approx \frac{\sqrt{2}U_{1,ном}}{2\pi \cdot f \cdot N_1}. \quad (3.40)$$

Из этих двух выражений определяем соотношение между магнитными потоками вне магнитопровода Φ и внутри магнитопровода Φ_0 трансформатора при номинальном токе и номинальном напряжении

$$\Phi = \Phi_0 \frac{U_{1,к.з.}}{U_{1,ном}} \frac{S_{к.з.}}{S_{эф}} = \Phi_0 \frac{U_{1,к.з.} \%}{100\%} \frac{S_{эк}}{S_{эф}}. \quad (3.41)$$

Следовательно, величина магнитного потока вне магнитопровода меньше, чем внутри него в отношении $U_{1,к.з.}/U_{1,ном}$ с поправочным коэффициентом $S_{эк}/S_{эф}$, определяющим некоторое увеличение Φ (до 25% и более). Тот факт, что величина магнитного потока вне магнитопровода при номинальном токе составляет небольшую часть магнитного потока внутри магнитопровода при номинальном напряжении, и послужил основанием для неудачного его названия «поток рассеяния». Однако мощность этого относительно малого по величине потока превосходит мощность потока в магнитопроводе почти на два порядка (см. выше), что и определяет его главенствующую роль в процессе обмена мощностью между обмотками.

Обычно при конструировании трансформаторов этот коэффициент увеличения рабочего магнитного потока не учитывается, что приводит к занижению сечения магнитопровода и соответственно к перегрузке магнитопровода (индукция в магнитопроводе при нагрузке трансформатора $B_{0,p.} > B_0$).

Соотношения (3.36), (3.38) позволяют определить необходимое число витков трансформатора

$$\begin{aligned} N_1 &= \sqrt{\frac{U_{1,к.з.}}{I_{1,ном}} \frac{\ell_0}{2\pi \cdot f \cdot \mu_0 S_{эф}}} \approx \sqrt{\frac{U_{1,к.з.}}{I_{1,ном}} \frac{\ell_0}{2\pi^2 \cdot f \cdot \mu_0 d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right)}} = \\ &= \sqrt{\frac{U_{1,к.з.} \%}{100\%} \frac{U_{1,ном}}{I_{1,ном}} \frac{\ell_0}{2\pi^2 \cdot f \cdot \mu_0 d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right)}}. \quad (3.42) \end{aligned}$$

Более точное решение получается при учете второго члена в квадратных скобках в формуле (3.35). Как видно, число витков транс-

форматора увеличивается с ростом номинального напряжения и относительной величины напряжения к.з., а также высоты окна магнитопровода и уменьшается при увеличении номинального тока (мощности) трансформатора и ширины зазора между обмотками a_{12} .

Высота окна магнитопровода ℓ_0 определяется необходимой высотой обмотки $\ell_{об}$, и необходимыми изоляционными расстояниями между краями обмоток и ярмами (приарменными магнитными шунтами). Минимальная величина зазора между обмотками $a_{12,мин}$ также определяется необходимым изоляционным расстоянием между первичной и вторичной обмотками. При этом, однако, следует иметь в виду, что согласно (3.42) увеличение зазора a_{12} приводит к уменьшению числа витков в обмотках. Это обстоятельство может привести к экономии меди и, соответственно, к снижению стоимости трансформатора. Поэтому при проектировании трансформатора целесообразно проварьировать $a_{12} \geq a_{12,мин}$ для отыскания наиболее экономичного варианта.

Толщины обмоток определяются простыми соотношениями

$$a_1 = \frac{N_1 S_{np.1}}{\ell_{об.1} \kappa_{зап.1}} = \frac{N_1 I_{1,ном}}{\ell_{об.1} J_{1,ном} \kappa_{зап.1}}, \quad (3.43)$$

$$a_2 = \frac{N_2 S_{np.2}}{\ell_{об.2} \kappa_{зап.2}} = \frac{N_2 I_{2,ном}}{\ell_{об.2} J_{2,ном} \kappa_{зап.2}} = \frac{N_1 I_{1,ном}}{\ell_{об.2} J_{2,ном} \kappa_{зап.2}}, \quad (3.44)$$

где $\kappa_{зап.1}$ и $\kappa_{зап.2}$ – коэффициенты заполнения площади поперечного сечения обмоток проводниковым материалом, $S_{np.1}$ и $S_{np.2}$ – сечения витков первичной и вторичной обмоток, $N_1 S_{np.1}$ и $N_2 S_{np.2}$ – полные сечения проводникового материала обмоток, $N_1 S_{np.1} / \kappa_{зап.1}$ и $N_2 S_{np.2} / \kappa_{зап.2}$ – полные сечения обмоток с учетом изоляции проводов и свободных объемов в обмотках, включая масляные каналы для охлаждения обмоток, $J_{1,ном}$ и $J_{2,ном}$ – оптимальные плотности тока в обмотках при номинальном токе (как правило, $J_{1,ном} = 1,75 \div 2,5 \text{ А/мм}^2$; $J_{2,ном} = 1,5 \div 2 \text{ А/мм}^2$).

Средний диаметр зазора между обмотками d_{12} определяется суммой диаметра сердечника магнитопровода $d_{СТ}$, двойного изоляционного расстояния между обмотками $2a_{из.1,0}$, двойной толщины первичной обмотки $2a_1$ и величиной зазора a_{12}

$$d_{12} = d_{CT} + 2a_{из.1.0} + 2a_1 + a_{12}. \quad (3.45)$$

Диаметр сердечника d_{CT} определяется через необходимое его сечение с использованием формулы (3.7)

$$d_{CT} = \sqrt{\frac{4S_{CT}}{\pi k_3}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2\sqrt{2}U_{1.ном}}{fB_0 N_1}}, \quad (3.46)$$

где k_3 – коэффициент заполнения сталью сечения окружности диаметром d_{CT} .

Индукция в магнитопроводе в режиме холостого хода задается при проектировании трансформатора.

Таким образом, в уравнении (3.42) оказывается одно неизвестное N_1 , которое определяется однозначно методом последовательных приближений.

После определения числа витков первичной обмотки и соответственно числа витков вторичной обмотки через коэффициент трансформации определяется необходимое сечение стального сердечника магнитопровода по формуле (3.7). С учетом полученных соотношений можно преобразовать формулу (3.32) для мощности потока рассеяния в режиме опыта к.з. Подставляя число витков N_1 согласно (3.42) в формулу (3.32), получаем

$$Q_{м.к.з.} = U_{1.к.з.} I_{1.ном} = \frac{U_{1.к.з.} \%}{100\%} I_{1.ном} U_{1.ном} = Q_{к.з.}. \quad (3.47)$$

Следовательно, мощность рабочего магнитного потока в режиме опыта к.з. равна мощности трансформатора в этом режиме. Иными словами вся мощность трансформатора в режиме к.з. сосредоточена в его магнитном поле.

Условия работы понижающих трансформаторов отличаются от условий работы повышающих. В этом случае передача электромагнитной энергии происходит от внешней обмотки к внутренней, т.к. обмотка низшего напряжения располагается как правило непосредственно вокруг стержня магнитопровода.

Режим холостого хода для понижающих и повышающих трансформаторов одинаков: в обоих случаях магнитный поток сосредоточен в основном в магнитопроводе, охватывая все витки обеих обмоток со всеми вытекающими последствиями. Однако, в режиме к.з. внутренней обмотки путь замыкания магнитного потока существенно изменяется. Дело в том, что при короткозамкнутой внутренней обмотке охватывающий ее магнитный поток не может существовать. По-

скольку магнитный поток создается током в наружной обмотке высокого напряжения, он должен полностью замыкаться вне обмотки низшего напряжения (см.рис.3.5).

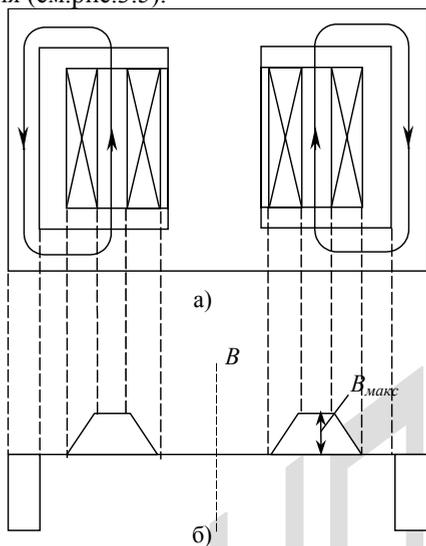


Рис. 3.5. Распределение магнитного потока понижающего трансформатора в режиме опыта к.з.

Индуктируемый в обмотке низкого напряжения ток ограничивает зону распространения рабочего магнитного потока внутренним диаметром внутренней обмотки. В результате магнитный поток замыкается по боковым ярам а стержень в этом случае не нагружен.

Однако, поскольку сопротивление магнитному потоку в стержне и в ярах практически одинаково и достаточно мало, основное сопротивление магнитному потоку определяется путем магнитного потока в межобмоточном пространстве и соответственно высотой окна магнитопровода и эквивалентной площадью потока $S_{эк}$. Поэтому параметры трансформатора в режиме опыта к.з. у повышающих и понижающих трансформаторов одинаковы. Это не означает, однако, что также одинаковы параметры повышающих и понижающих трансформаторов при рабочих нагрузках и в реальных режимах к.з.

Таким образом, основные электрические параметры трансформаторов оказываются известными на основании анализа двух искусственных режимов: опыт холостого хода и опыт короткого замыкания.

На основе этих параметров можно произвести анализ реальных рабочих и аварийных режимов работы трансформаторов и автотрансформаторов.

При отсутствии приярменных магнитных шунтов (что справедливо для большинства современных трансформаторов) необходимо учесть отклонение магнитного потока от осевого направления (см.рис.2.11). В этом случае характеристики трансформаторов в опыте короткого замыкания определяются обычно не высотой окна магнитопровода ℓ_0 , а высотой обмоток $\ell_{об}$, поделенной на коэффициент Роговского [9]

$$\kappa_p \approx 1 - \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi \ell_{об}}. \quad (3.48)$$

Коэффициент κ_p всегда меньше единицы ($\kappa_p < 1$), что определяет отношение $\ell_{об}/\kappa_p > \ell_{об}$.

С учетом этого коэффициента индуктивное сопротивление трансформатора в опыте к.з. при отсутствии приярменных магнитных шунтов равно (см. формулу (3.37))

$$x_{к.з.} = \frac{\omega \mu_0}{\ell_{об}} N_1^2 S_{эф} \kappa_p. \quad (3.49)$$

Соответственно число витков первичной обмотки трансформатора без приярменных магнитных шунтов

$$N_1 = \sqrt{\frac{U_{к.з.} \% U_{1,ном}}{100\% I_{1,ном}} \frac{\ell_{об}}{2\pi^2 \cdot f \cdot \mu_0 d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \cdot \kappa_p}}. \quad (3.50)$$

В зависимости от соотношения величин ℓ_0 и $\ell_{об}/\kappa_p$ изменяется отношение числа витков трансформаторов при наличии и отсутствии приярменных шунтов.

Потери активной мощности в режиме холостого хода трансформаторов определяются потерями мощности в стали на перемагничивание и приближенно оцениваются при использовании соотношения

$$\Delta P_0 = p_{СТ} G_{СТ}, \quad (3.51)$$

где $p_{СТ}$ – удельные потери в стали, составляющие в зависимости от качества стали от 0,85 до 1,5 Вт/кг массы стали.

Потери активной мощности в режиме опыта к.з. определяются в основном потерями в обмотках от номинальных токов в них и добавочными потерями от вихревых токов в проводах и конструктивных элементах трансформатора. Потери в проводах фазы определяются соотношениями

$$\Delta P_{np} = \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa}^2 R_{\kappa} \kappa_{\partial,\kappa}, \quad (3.52)$$

где κ – порядковый номер обмотки (первичной ($\kappa=1$), вторичной ($\kappa=2$))

$$R_{\kappa} = \frac{\rho \pi d_{cp,\kappa} N_{\kappa}}{S_{\kappa}}, \quad (3.53)$$

где ρ – удельное сопротивление проводов при расчетной температуре, $d_{cp,\kappa}$ – средний диаметр κ -ой обмотки, N_{κ} – число витков κ -ой обмотки, S_{κ} – сечение проводов κ -ой обмотки.

Коэффициент добавочных потерь зависит от размера проводов ϕ_1 перпендикулярного оси обмоток, активного сечения проводов $S_{np,\kappa}$, числа витков N_{κ} и высоты обмотки $\ell_{об,\kappa}$, промышленной частоты

$$\kappa_{\partial,\kappa} = 1 + 1,73 \cdot 10^{-12} \left(\frac{S_{np,\kappa} N_{\kappa} \phi_{\kappa} f}{\rho \cdot \kappa \phi \ell_{об,\kappa}} \right)^2, \quad (3.54)$$

где $\kappa_{\phi} \approx 0,95$ – коэффициент формы проводов, учитывающий сглаживание острых его четырех углов. Для уменьшения добавочных потерь, вызываемых вихревыми токами в сечении проводов, перпендикулярном магнитному потоку, размер ϕ_{κ} принимается в диапазоне 1,5 – 2,5 мм

Поставляя значение $S_{\kappa} = I_{\kappa} / J_{\kappa}$ (J_{κ} – плотность тока в проводах) и соотношение токов $I_1 / I_2 = N_2 / N_1$ согласно (3.51), (3.52) получаем выражение для потерь в проводах

$$\begin{aligned} \Delta P_{np} &= I_1 \cdot \rho \cdot \pi d_{cp,1} N_1 J_1 \kappa_{\partial,1} + I_2 \cdot \rho \cdot \pi d_{cp,2} N_2 J_2 \kappa_{\partial,2} = \\ &= I_2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot N_2 (d_{cp,1} J_1 \kappa_{\partial,1} + d_{cp,2} J_2 \kappa_{\partial,2}) = \\ &= I_1 \cdot \rho \cdot \pi \cdot N_1 (d_{cp,1} J_1 \kappa_{\partial,1} + d_{cp,2} J_2 \kappa_{\partial,2}). \end{aligned} \quad (3.55)$$

Добавочные потери в металлических конструктивных элементах трансформатора определяются, как правило, по результатам опыта к.з. как разность полных потерь активной мощности и потерь в проводах (с учетом добавочных потерь в них). При наличии приярменных магнитных шунтов эти потери не превышают 10% от потерь в прово-

дах. При отсутствии приярменных шунтов добавочные потери значительно возрастают и могут быть сравнимы с потерями в проводах. Поэтому установка приярменных магнитных шунтов обязательна для трансформаторов большой мощности и целесообразна для трансформаторов средней мощности.

При расположении обмоток однофазного трансформатора на двух стержнях (см. рис.2.3а) параметры холостого хода определяются теми же формулами, что и у одностержневого трансформатора (см. формулы (3.1) (3.16)).

Для определения параметров двухстержневых трансформаторов в режиме опыта к.з. во всех формулах необходимо удвоить высоту окна магнитопровода ℓ_0 (см. формулы (3.18) – (3.42)), как и высоту обмоток $\ell_{об}$ в формулах (3.43), (3.44), (3.48), (3.49), (3.50), (3.54). Это означает, в частности, что в двухстержневом варианте число витков трансформатора увеличивается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с одностержневым трансформатором. Однако, при этом диаметр стержня магнитопровода уменьшается согласно формуле (3.46). Уменьшаются и толщины обмоток в $\sqrt{2}$ раз согласно формулам (3.43), (3.44). В результате диаметр обмоток значительно уменьшается. Уменьшается и масса магнитопровода.

3.2. Работа трансформаторов под нагрузкой

В номинальном рабочем режиме к первичной обмотке трансформатора приложено номинальное напряжение, определяющее появление потока намагничивания, и по обеим обмоткам протекает номинальный ток, формирующий рабочий магнитный поток, замыкающийся в межобмоточном пространстве. Следовательно, в номинальном рабочем режиме сосуществуют два магнитных потока: поток намагничивания в магнитопроводе, охватывающий все витки обеих обмоток, и рабочий магнитный поток, аналогичный потоку в опыте к.з., охватывающему лишь одну обмотку (и то не полностью), связанную с источником электроэнергии (от которой энергия передается другой обмотке, связанной с нагрузкой).

Необходимо подчеркнуть, что соответствие магнитных потоков в опыте короткого замыкания и при номинальном токе нагрузки соблюдается только по величине магнитного потока и по пути его замыкания. В опыте короткого замыкания ток в первичной обмотке практически чисто индуктивный, т.е. отстает по фазе от напряжения на первичной обмотке почти на 90° , также как и поток намагничивания. Соответственно и рабочий магнитный поток практически совпадает по фазе (расхождение в пределах 10°) с потоком намагничивания. В нагрузочном режиме ток через трансформатор никогда не бывает чисто индуктивным, а может быть активно-индуктивным или активно-емкостным или даже чисто-емкостным в режиме холостого хода линии. Поэтому рабочий магнитный поток никогда не совпадает по фазе с потоком намагничивания, а всегда опережает поток намагничивания. При чисто активном токе нагрузки это опережение составляет около 90° , а при чисто-емкостной нагрузке около -180° .

В зависимости от условий работы трансформатора (повышающий или понижающий) рабочий магнитный поток накладывается на поток намагничивания в стержнях магнитопровода или в ярмах, что требует специального анализа [9].

Эквивалентная схема трансформатора в рабочем режиме вмещает две рассмотренных в § 3.1 эквивалентных схемы: холостого хода (рис.3.2) и опыта к.з. (рис.3.4).

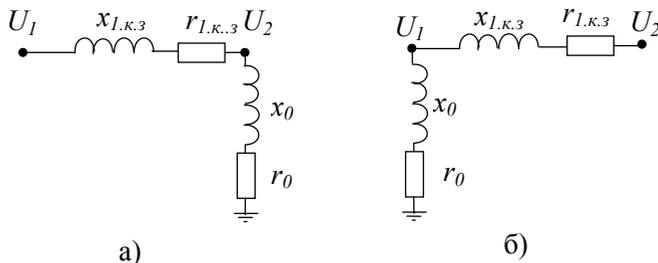


Рис. 3.6. Эквивалентная схема двухобмоточного трансформатора в нагруженном режиме: повышающего (а) и понижающего (б)

Если ток нагрузки чисто активный ($\cos\varphi_2=0$) падение напряжения от него на индуктивном сопротивлении трансформатора (активным сопротивлением можно пренебречь см. § 3.1) упреждает напряжение на трансформаторе на 90° (см. рис.3.7). Это приводит к уменьшению напряжения на индуктивности намагничивания трансформатора и на вторичной обмотке трансформатора.

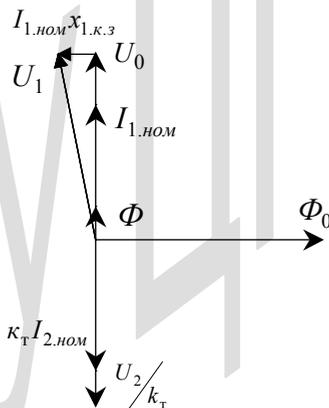


Рис.3.7. Векторная диаграмма напряжений и токов двухобмоточного трансформатора при чисто активной нагрузке

Однако это уменьшение чрезвычайно мало. При номинальном активном токе напряжение на индуктивности x_0 (э.д.с. трансформатора) равно

$$\begin{aligned} U_0 &= \sqrt{U_{1.ном}^2 - (I_{1.ном} x_{к.з.})^2} = \\ &= \sqrt{U_{1.ном}^2 - U_{к.з.}^2} = U_{1.ном} \sqrt{1 - \left(\frac{U_{к.з.}}{U_{1.ном}}\right)^2}. \end{aligned} \quad (3.56)$$

Подставляя максимальное значение $U_{к.з.}$ силовых двухобмоточных трансформаторов $U_{к.з.} = 0,15U_{1.ном}$ получаем

$$U_0 = U_{1.ном} \sqrt{1 - 0,15^2} = 0,989U_{1.ном}. \quad (3.57)$$

Таким уменьшением U_0 , находящимся в пределах точности измерений, можно пренебречь. Следовательно можно пренебречь и уменьшением тока намагничивания $I_{1,0}$ и соответственно потока намагничивания Φ_0 . Тем не менее надо иметь в виду, что в трансформаторе при номинальном активном токе существуют два отдельных потока: создаваемый током намагничивания поток в сердечнике и создаваемый током нагрузки рабочий поток в межобмоточном пространстве, замыкающийся либо по боковым ярмам либо по сердечнику в зависимости от того является ли трансформатор повышающим или понижающим (см. §.3.1). Эти потоки сдвинуты на 90° один по отношению к другому (рис.3.7).

В стержне повышающего трансформатора оба эти потока соединяются, причем суммарный поток равен

$$\begin{aligned} \Phi_{0,\Sigma} &= \frac{1}{2} \sqrt{(0,989\Phi_0)^2 + \Phi_0^2 \left(\frac{U_{к.з.} \% S_{ЭК}}{100\% S_{ЭФ}}\right)^2} = \\ &= \frac{1}{2} \Phi_0 \sqrt{0,98 + \left(\frac{U_{к.з.} \% S_{ЭК}}{100\% S_{ЭФ}}\right)^2} = \\ &\leq \frac{1}{2} \Phi_0 \sqrt{0,98 + (0,15 \cdot 1,25)^2} = \frac{1}{2} \Phi_0 \cdot 1,01. \end{aligned} \quad (3.58)$$

Таким образом, при активной нагрузке магнитный поток в стержне практически не отличается от магнитного потока в режиме холостого хода трансформатора.

У понижающих трансформаторов этот дополнительный поток складывается с потоком в ярме, но его влияние также пренебрежимо мало при номинальном напряжении на его первичной обмотке.

При произвольном токе нагрузки смешанного активно-реактивного характера и при фиксированном напряжении на первичной обмотке повышающего трансформатора $U_{1,ном}$ напряжение U_2 вторичной обмотки согласно схеме рис. 3.6 равно

$$\begin{aligned} U_2 &= U_{1,ном} + I_1 z_{к.з.} \sin \varphi = U_{1,ном} + \frac{U_{1.к.з.} \%}{100\%} U_{1,ном} \frac{I_1}{I_{1,ном}} \sin \varphi = \\ &= U_{1,ном} \left(1 + \frac{U_{1.к.з.} \%}{100\%} \frac{I_1}{I_{1,ном}} \sin \varphi \right). \end{aligned} \quad (3.59)$$

Например, при чисто емкостной нагрузке, соответствующей номинальному току ($I_1 = I_{1,ном}$; $\varphi = \pi/2$),

$$U_2 = U_{1,ном} \left(1 + \frac{U_{1.к.з.} \%}{100\%} \right) \leq 1,15 U_{1,ном}.$$

А при чисто индуктивной нагрузке ($I_1 = I_{1,ном}$; $\varphi = -\pi/2$)

$$U_2 = U_{1,ном} \left(1 - \frac{U_{1.к.з.} \%}{100\%} \right) \geq 0,85 U_{1,ном}.$$

Физически это явление можно объяснить следующим образом. При активно-индуктивной нагрузке повышающего трансформатора рабочий магнитный поток

$$\Phi = \Phi_0 \frac{U_{1.к.з.} \%}{100\%} \cdot \frac{I_1}{I_{1,ном}} \cdot \frac{S_{ЭК}}{S_{ЭФ}} \sin \varphi \quad (3.60)$$

совпадает по фазе с потоком намагничивания (см.рис. 3,8 а).

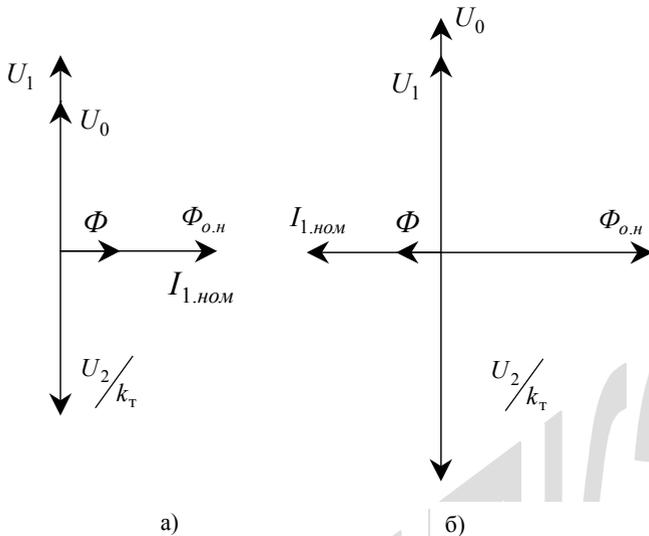


Рис. 3.8. Векторные диаграммы двухобмоточного трансформатора при чисто индуктивной (а) и чисто емкостной нагрузке (б)

Создаваемый ток в вторичной обмотке встречным потоком рабочий поток направляется в межобмоточное пространство (рис.3.9а).

При этом э.д.с. E_1 должна бы увеличиться на величину

$$\Delta E_1 = -U_{к.з.} \cdot \frac{I_1}{I_{1.ном}} \sin \varphi, \quad (3.61)$$

т.к. увеличивается поток, охватывающий первичную обмотку. Но это невозможно, т.к. напряжение на первичной обмотке задано (поддерживается регулятором возбуждения генераторов на электростанции). Поэтому уменьшается ток намагничивания $I_{0.н}$ и соответственно поток намагничивания под нагрузкой $\Phi_{0.н}$ ($\varphi < 0$)

$$\Phi_{0.н} = \Phi_0 \left(1 + \frac{U_{к.з.} \%}{100\%} \cdot \frac{I_1}{I_{1.ном}} \sin \varphi \right). \quad (3.62)$$

В результате вторичная обмотка ВН охватывается меньшим потоком, чем на холостом ходу, что приводит к понижению э.д.с. E_2 вторичной обмотки и напряжению на ней. Определяемый формулой (3.62) магнитный поток намагничивания замыкается по боковым ярам.

Поэтому при индуктивной нагрузке повышающего трансформатора через боковые ярма магнитный поток уменьшается по сравнению с холостым ходом.

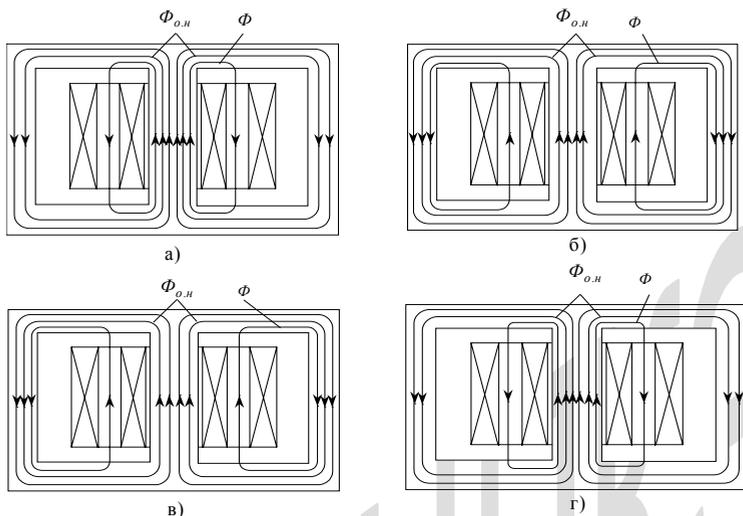


Рис. 3.9. Распределение магнитных потоков под нагрузкой у повышающих (а,б) и понижающих (в,г) трансформаторов при смешанной активно-индуктивной (а,в) и активно-емкостной (б,г) нагрузках

Напротив, при активно-емкостной нагрузке рабочий магнитный поток опережает магнитный поток намагничения на 180° (см.рис.3.8, б), т.е. направлен встречно потоку намагничивания. При этом охватывающий первичную обмотку магнитный поток (рис.3.9.б) уменьшается, что должно было бы привести к уменьшению напряжения на первичной обмотке. Поскольку оно задано, увеличивается ток намагничивания и, соответственно, поток намагничивания согласно формуле (3.62), компенсирующий встречный рабочий магнитный поток. В результате увеличивается поток в боковых ярмах, что приводит к их перегрузке магнитным потоком в пределе до $15\div 20\%$ (см. рис.3.9в).

Появление дополнительного потока, охватывающего только вторичную обмотку, приводит к повышению напряжения на ней в соответствии с формулой (3.59).

Суммарный магнитный поток в стержне повышающего трансформатора согласно (3.60), (3.62) равен

$$\Phi_{н.} = \Phi_0 \left[1 + \frac{U_{к.з.} \%}{100\%} \cdot \frac{I_1}{I_{1.ном}} \cdot \left(1 - \frac{S_{эк}}{S_{эф}} \right) \sin \varphi \right]. \quad (3.63)$$

Поскольку $S_{эк}/S_{эф} > 1$ суммарный магнитный поток в стержне повышающего трансформатора немного уменьшается по сравнению с холостым ходом при активно-емкостной нагрузке ($\varphi > 0$) и немного увеличивается при активно-индуктивной нагрузке ($\varphi < 0$).

Для понижающих трансформаторов ситуация существенно изменяется. Поскольку в этом случае напряжение задано на внешних обмотках, а рабочий магнитный поток, совпадающий по направлению с потоком намагничивания при активно-индуктивной нагрузке, замыкается по боковым ярмам (см.рис.3.9, в), поток намагничивания уменьшается согласно (3.62) и соответственно уменьшается магнитный поток в стержне. В боковых ярмах при этом магнитный поток немного увеличивается по сравнению с потоком холостого хода

$$\sum \Phi_{я.н} = \Phi_0 \left[1 + \frac{U_{к.з.} \%}{100\%} \cdot \frac{I_1}{I_{1.ном}} \cdot \left(1 - \frac{S_{эк}}{S_{эф}} \right) \sin \varphi \right], \quad (3.64)$$

из-за различия $S_{эк}$ и $S_{эф}$ ($S_{эк}/S_{эф} > 1$).

Соответственно уменьшается напряжение на внутренней обмотке, охватываемой только потоком намагничивания.

Напротив, при активно-емкостной нагрузке понижающего трансформатора рабочий магнитный поток, направленный против потока намагничивания, приводит к увеличению потока намагничивания согласно (3.62), компенсирующему этот встречный поток ($\varphi > 0$). В результате суммарный магнитный поток в стержне увеличивается согласно (3.63). Соответственно увеличивается поток, охватывающий внутреннюю обмотку НН, что приводит к увеличению напряжения на ней. А суммарный поток в боковых стержнях согласно (3.64) несколько уменьшается. Причем магнитный поток, сцепляющийся со всеми витками внешней обмотки, сохраняется неизменным.

Увеличение магнитного потока в стержне понижающих трансформаторов и в боковых ярмах повышающих трансформаторов при активно-емкостной нагрузке в пределе на $U_{к.з.} \%$ приводит к значительному увеличению потерь мощности в этих элементах магнитопровода, повышению их температуры, значительному увеличению содержания высших гармонических в токе намагничивания, что при соответствующей ситуации в сети может привести к резонансному повышению напряжения соответствующей гармоники. Для исключения этих явле-

ний необходимо увеличить сечение этих элементов магнитопровода в отношении

$$\frac{S_n}{S_0} = \frac{U_{к.з. \%}}{100\%}, \quad (3.65)$$

где S_n – необходимое сечение перегруженных магнитным потоком элементов магнитопровода под нагрузкой, S_0 – сечение магнитопровода, определяемое потоком намагничивания на холостом ходу трансформатора.

При компенсации индуктивной составляющей тока нагрузки трансформатора, например, с помощью управляемых компенсаторов реактивной мощности [4,5] опасность перегрузки магнитным потоком элементов магнитопровода исключается, обеспечивая наиболее благоприятные условия работы трансформаторов.

Таким образом, рабочие режимы трансформаторов оказывают существенное влияние на протекающие в них физические процессы, в частности на распределение магнитных потоков и их величину и фазу. Причем активная нагрузка трансформатора практически не изменяет суммарный поток по сравнению с потоком холостого хода. Реактивная нагрузка трансформаторов приводит к значительному изменению потокораспределения в трансформаторе, что требует принятия соответствующих мер. Основной результат влияния реактивной нагрузки заключается в изменении тока и соответственно потока намагничивания, что приводит к значительному увеличению потерь в стали магнитопровода.

Согласно вышеизложенному напряжение на обмотке трансформаторов, питающей нагрузку, (обмотка ВН повышающего трансформатора и обмотка НН понижающего трансформатора) изменяется в широких пределах, что недопустимо по условиям эксплуатации. В связи с такой ситуацией обмотка ВН дополняется, как правило, регулируемой частью с отпайками, механическое переключение которых позволяет удерживать напряжение на нагрузке в допустимых пределах (см. §2.3).

Избежать этих колебаний напряжения можно при 100%-ной компенсации реактивной мощности нагрузки, что может быть обеспечено при установке шунтирующего нагрузку компенсатора реактивной мощности [4,5]. В этом случае полностью отпадает необходимость устройства РПН у трансформаторов, что определяет существенное уменьшение стоимости трансформаторов (до 30%) и повышение надежности их работы.

Следовательно, причиной значительных колебаний напряжения на трансформаторах является нескомпенсированная реактивная

составляющая тока нагрузки. Она приводит к существенным осложнениям в работе трансформатора, в частности, к значительным изменениям тока и соответственно потока намагничивания и перегрузкам стержней и ярем магнитным потоком, что необходимо учитывать при проектировании трансформаторов [6]. При чисто активной нагрузке ($\varphi=0$) эти нежелательные явления отсутствуют. Напряжение на выходе трансформатора стабильно при обеспечении стабильности напряжения на входе трансформатора. Магнитный поток во всех элементах магнитопровода мало изменяется при изменении активной нагрузки трансформаторов.

3.3. Особенности работы автотрансформаторов

Как показано в §.2.1, у автотрансформаторов обмотка низшего напряжения является частью обмотки высшего напряжения (рис. 3.10).

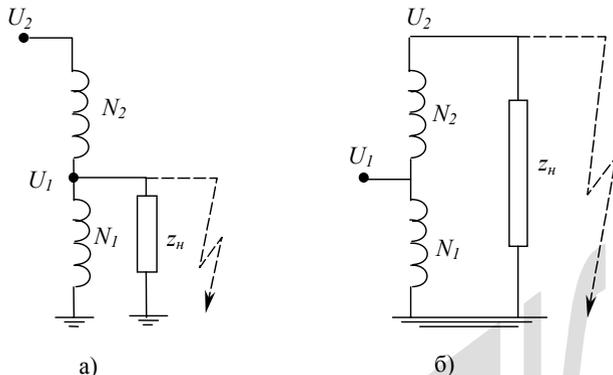


Рис. 3.10. Схемы автотрансформаторов:
а – понижающего; б – повышающего

Как и у трансформаторов, в режиме холостого хода у автотрансформаторов магнитный поток практически полностью сосредоточен в магнитопроводе и охватывает все витки обмотки. Поэтому напряжение на обеих частях обмотки пропорционально числу витков обмотки [7]

$$U_1 = \frac{N_1}{N_1 + N_2} U_2, \quad (3.66)$$

где U_1 – напряжение общей части обмотки, U_2 – высшее напряжение, являющееся суммой напряжений на двух частях обмотки. Причем напряжение U_1 – совпадает по фазе с напряжением U_2 .

В случае повышающего автотрансформатора намагничивающий ток протекает только по общей части обмотки с числом витков N_1 и соответственно определяется формулой (3.11). Индуктивное сопротивление холостого хода определяется формулой (3.12), а магнитный поток в магнитопроводе определяется формулой (3.4).

В случае понижающего автотрансформатора намагничивающий ток протекает по обеим частям обмотки с числом витков $N_1 + N_2$. Поэтому он меньше

$$I_{02} = \frac{B_0}{\sqrt{2}} \frac{\ell_\mu}{\mu(N_1 + N_2)} \left(1 + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\ell_{cm}}{\ell_\mu} \right), \quad (3.67)$$

а магнитный поток в магнитопроводе такой же, как и у повышающего автотрансформатора

$$\Phi_0 = B_0 F_{CT}.$$

Соответственно сохраняется соотношение (3.66) напряжений в обеих частях обмотки.

В режиме опыта короткого замыкания понижающего автотрансформатора обмотка низшего напряжения в числом витков N_1 и соответственно часть обмотки высшего напряжения с тем же числом витков оказывается закороченной. Приложенное напряжение к части обмотки высшего напряжения с числом витков N_2 вызывает ток в этой части обмотки, создающий магнитный поток в магнитопроводе. Этот магнитный поток индуцирует в короткозамкнутой части ток, создающий направленный встречно магнитный поток. В результате магнитный поток вытесняется из стержня магнитопровода в межобмоточное пространство (см. рис.3.11б).

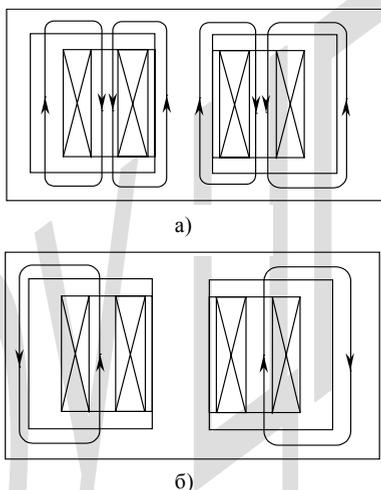


Рис.3.11. Схемы циркуляции магнитных потоков в повышающих (а) и понижающих (б) автотрансформаторах в условиях короткого замыкания

При этом индуктивное сопротивление короткого замыкания определяется формулой (3.36), которая справедлива и в рассматриваемом случае при замене числа витков N_1 на N_2 . Поскольку магнитный поток полностью вытеснен из стержня магнитопровода, м.д.с. в обеих

частях обмотки одинаковы по величине и противоположны по направлению

$$\sqrt{2}N_1 I_{1.к.з.} = -\sqrt{2}N_2 I_{2.к.з.} \quad (3.68)$$

и, следовательно, токи в обеих частях обмотки обратно - пропорциональны числу витков в них

$$\frac{I_{1.к.з.}}{I_{2.к.з.}} = -\frac{N_1}{N_2}. \quad (3.69)$$

Это означает, что при одинаковом числе витков в обеих частях обмотки в режиме опыта к.з. токи одинаковы по величине и противоположны по направлению. Следовательно, одинаковы и номинальные токи в обеих частях обмотки несмотря на разное число витков в обмотке высшего ($N_1 + N_2$) и низшего (N_1) напряжения. В этом заключается принципиальное отличие автотрансформаторов от трансформаторов, что позволяет обеспечить существенную экономию меди в автотрансформаторах.

Напряжение к.з. понижающего автотрансформатора соответствует напряжению на незаконченной части обмотки ВН при номинальном токе в ней

$$\begin{aligned} U_{2.к.з.} &= I_{2.к.з.} \cdot X_{2.к.з.} = \frac{\omega\mu_0\pi}{\ell_0} I_{2.ном.} N_2^2 d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) = \\ &= \frac{\omega\mu_0\pi}{\ell_0} I_{2.ном.} (N_B - N_H)^2 d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) = \\ &= \frac{\omega\mu_0\pi}{\ell_0} I_{2.ном.} N_B^2 \left(1 - \frac{N_H}{N_B} \right)^2 d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right). \end{aligned} \quad (3.70)$$

Следовательно, в отличие от трансформаторов напряжение к.з. понижающих автотрансформаторов определяется не полным числом витков $N_B = N_1 + N_2$, а только частью витков, равной $N_2 = N_B - N_H$.

И чем больше отношение $\frac{N_2}{N_1} = \frac{N_B - N_H^2}{N_H} = \frac{N_B}{N_H} - 1$, тем больше напряжение к.з. понижающего автотрансформатора.

Значительное понижение напряжения короткого замыкания автотрансформаторов по сравнению с трансформаторами при заданных их номинальных напряжениях и мощности и одинаковом числе витков в обмотке ВН определяет значительное уменьшение колебаний напряжения на нагрузочной обмотке автотрансформаторов. Однако, в режиме сетевого к.з. такой автотрансформатор подвергается воздей-

вию значительно больших токов к.з. В связи с этим необходимо увеличить число витков в обеих частях обмотки ВН. При этом, поскольку число витков входит также в слагаемые a_1 и a_2 (см. формулы (3.43), (3.44)) для обеспечения одинакового напряжения к.з. трансформатора и автотрансформатора число витков автотрансформатора необходимо увеличить не вдвое, а несколько меньше. Тем не менее, при таком значительном увеличении числа витков автотрансформатора по сравнению с трансформатором (у автотрансформатора в каждой половине обмотки число витков должно быть таким же, как у трансформатора в обмотке ВН) расход меди у автотрансформатора и у трансформатора будет почти одинаковый. Правда в этом случае сечение стали магнитопровода примерно в два раза меньше, чем у трансформатора согласно формуле (3.9). Поскольку медь значительно дороже стали такой метод повышения напряжения короткого замыкания у понижающего автотрансформатора экономически нецелесообразен.

Таким образом, применение понижающих автотрансформаторов связано с трудностями обеспечения их стойкости к токам сетевых коротких замыканий.

По изложенным причинам напряжение к.з. у автотрансформаторов обычно меньше, чем у трансформаторов, той же мощности и того же номинального напряжения (8,2%; 9,5% против 12÷15% у трансформаторов).

В случае повышающего автотрансформатора (рис.3.10б) в режиме холостого хода соотношение между напряжениями U_1 и U_2 такое же, как и для понижающего автотрансформатора (см. формулу (3.66)). Однако, ситуация в режиме опыта к.з. существенно отличается. Действительно, при коротком замыкании на стороне высшего напряжения при поддержании низшего напряжения U_1 источником напряжения обе части обмотки ВН оказываются под напряжением, равным по величине (независимо от соотношения числа витков N_1 и N_2) и противоположным по знаку. Это означает, что токи в обеих частях обмотки также противоположны по знаку. В результате каждая из частей обмоток охватывается магнитным потоком, создаваемым током в ней (см. рис.3.11а). Соответственно магнитная индукция в межобмоточном пространстве равна

$$\begin{aligned} B_{\max} &= \frac{\sqrt{2}\mu_0}{\ell_0} (I_{1.\text{ном}} N_1 + I_{2.\text{ном}} N_2) = \\ &= \frac{2\sqrt{2}\mu_0}{\ell_0} I_{1.\text{ном}} N_1 = \frac{2\sqrt{2}\mu_0}{\ell_0} I_{2.\text{ном}} N_2. \end{aligned} \quad (3.71)$$

И рабочий магнитный поток

$$\Phi = B_{\max} S_{\text{эк}} = \frac{2\sqrt{2}\mu_0}{\ell_0} I_{1,\text{ном}} N_1. \quad (3.72)$$

При $N_1=N_2$ токи $I_{1,\text{ном}}=I_{2,\text{ном}}$ и

$$B_{\max} = \frac{2\sqrt{2}\mu_0}{\ell_0} I_{2,\text{ном}} (N_1 + N_2). \quad (3.73)$$

Следовательно, согласно (3.30) энергия магнитного поля повышающего автотрансформатора в опыте к.з. равна

$$W_{\text{м.к.з.}} = \frac{\mu_0 (N_1 + N_2)^2 I_{2,\text{ном}}^2}{\ell_0} S_{\text{эф}} = L_{\text{к.з.}} I_{2,\text{ном}}^2, \quad (3.74)$$

откуда индуктивность повышающего автотрансформатора в режиме опыта к.з.

$$L_{\text{к.з.}} = \frac{\mu_0 (N_1 + N_2)^2}{\ell_0} S_{\text{эф}} \quad (3.75)$$

и индуктивное сопротивление повышающего автотрансформатора в режиме опыта к.з.

$$x_{\text{к.з.}} = \frac{\omega\mu_0 (N_1 + N_2)^2}{\ell_0} S_{\text{эф}} = \frac{\omega\mu_0 N_{\text{BH}}^2}{\ell_0} S_{\text{эф}}, \quad (3.76)$$

где $N_{\text{BH}} = N_1 + N_2$.

Таким образом, индуктивное сопротивление к.з. повышающих трансформаторов и автотрансформаторов при одинаковых геометрических размерах магнитопровода и обеих частей обмоток и одинаковом числе витков одинаковы.

При $N_1 \neq N_2$ согласно (3.30), (3.68)

$$\begin{aligned} W_{\text{м.к.з.}} &= \frac{4\mu_0 (N_{\text{BH}} + N_{\text{HH}})^2 I_{2,\text{ном}}^2}{\ell_0} S_{\text{эф}} = \\ &= \frac{4\mu_0 N_{\text{BH}}^2 \left(1 - \frac{N_{\text{HH}}}{N_{\text{BH}}}\right)^2 I_{2,\text{ном}}^2}{\ell_0} S_{\text{эф}}. \end{aligned} \quad (3.77)$$

Соответственно, индуктивное сопротивление повышающего автотрансформатора

$$x_{\text{к.з.}} = \frac{4\omega\mu_0 N_{\text{BH}}^2 \left(1 - \frac{N_{\text{HH}}}{N_{\text{BH}}}\right)^2}{\ell_0} S_{\text{эф}}. \quad (3.78)$$

Чем больше отношение $\frac{N_{HH}}{N_{BH}} = \frac{N_1}{N_1 + N_2}$, тем меньше $x_{к.з.}$

автотрансформатора, и в пределе при $N_{HH}/N_{BH} = 1$ $x_{к.з.} = 0$, что соответствует действительности (прямое короткое замыкание). При отношении $N_{HH}/N_{BH} = 0,5$ $x_{к.з.}$ соответствует формуле (3.76). При дальнейшем уменьшении отношения N_{HH}/N_{BH} $x_{к.з.}$ увеличивается.

Соответственно напряжение короткого замыкания повышающего автотрансформатора равно

$$U_{2.к.з.} = I_{2.ном} x_{к.з.} = \frac{4\omega\mu_0}{\ell_0} I_{2.ном} N_{BH}^2 \left(1 - \frac{N_{HH}}{N_{BH}}\right)^2 S_{эф}. \quad (3.79)$$

В отличие от трансформатора напряжение короткого замыкания автотрансформатора зависит от соотношения числа витков в обмотках.

В связи с изложенным число витков в обмотках ВН и НН повышающих автотрансформаторов и трансформаторов одинаковых параметров (напряжение, мощность, $U_{к.з.}$) одинаково и определяется формулой (3.42).

Различие заключается лишь в том, что обмотка низшего напряжения составляет часть обмотки высшего напряжения и поэтому расход проводникового материала в автотрансформаторах значительно снижается.

Более того, в нагруженном режиме автотрансформаторов токи обмоток ВН и НН в их общей части противоположны по знаку, и через эту общую часть протекает разность токов обмоток ВН и НН, а не их сумма

$$I_{1\Sigma} = I_1 + I_2 = -I_2 \frac{N_1 + N_2}{N_1} + I_2 = -I_2 \frac{N_2}{N_1}, \quad (3.80)$$

т.к. в этом случае справедливо соотношение

$$I_1 N_1 = -I_2 (N_1 + N_2). \quad (3.81)$$

Например, если число витков обмотки низшего напряжения N_1 вдвое меньше числа витков обмотки ВН ($N_1 = N_2$) суммарный ток в общей части обмоток такой же, как в отдельной части обмотки ВН

$$I_{1\Sigma} = I_2,$$

несмотря на то, что ток в цепи НН $I_1 = -2I_2$. Это означает, что обе части обмотки могут быть выполнены с одинаковым сечением проводов, а не с существенно различным, как в трансформаторах.

Значительная экономия проводникового материала является основным преимуществом автотрансформаторов по сравнению с трансформаторами.

Чем больше витков обмотки ВН оказывается в общей части обмоток (чем больше N_1/N_2), тем меньше ток в общей части обмоток и наоборот, чем меньше витков обмотки ВН оказывается в общей части обмоток, тем больше ток в общей их части.

Совмещение обмотки НН с частью обмотки ВН приводит и к уменьшению потерь мощности в автотрансформаторе. Согласно (3.52), (3.53), (3.77) потери мощности в обмотках автотрансформатора равны

$$\begin{aligned} \Delta P &= \kappa_{\partial,2} I_2^2 R_2 + \kappa_{\partial,1} (I_1 - I_2)^2 R_1 = \\ &= \kappa_{\partial,2} I_2 \rho \pi d_{cp,2} N_2 J_2 + \kappa_{\partial,1} (I_1 - I_2) \rho \pi d_{cp,1} N_1 J_1 = \\ &= I_2 \rho \pi N_2 (d_{cp,2} J_2 \kappa_{\partial,2} + d_{cp,1} J_1 \kappa_{\partial,1}) = \\ &= I_1 N_1 \frac{N_2}{N_1 + N_2} (d_{cp,2} J_2 \kappa_{\partial,2} + d_{cp,1} J_1 \kappa_{\partial,1}). \end{aligned} \quad (3.82)$$

Сравнение этой формулы с формулой (3.55) показывает, что потери мощности в автотрансформаторе меньше. Действительно, в формуле (3.55) N_2 – полное число витков обмотки ВН, а в формуле (3.82) N_2 – отдельная часть обмотки ВН. Например, при $N_1 = N_2$ у автотрансформатора N_2 – половина витков обмотки ВН.

Следующим существенным преимуществом автотрансформаторов по сравнению с трансформаторами является возможность значительного уменьшения высоты обмоток, поскольку обмотка ВН разделена на две части, а высота обмотки определяется допустимой продольной напряженностью поля. При $N_1 = N_2$ высота обмоток автотрансформатора может быть снижена вдвое по сравнению с трансформаторами. При этом необходимое число витков обмоток изменится незначительно, поскольку суммарная высота обмотки ВН сохраняется (см. формулу (3.42)). Это чрезвычайно существенно, поскольку при конструировании трансформаторов на высшие классы напряжения ограничивающим фактором является их транспортная высота.

Следует иметь в виду, однако, что этими преимуществами обладают автотрансформаторы с отношением числа витков обмоток $N_1/(N_1 + N_2) \geq 0,3$ ($N_1/N_2 > 0,43$). При большой разности номинальных напряжений обмоток НН и ВН эти преимущества пропадают.

В нагруженном режиме автотрансформатора рабочий магнитный поток накладывается на поток намагничивания. В результате происходит изменение потока намагничивания. У повышающего авто-

трансформатора в соответствии с рис. 3.12а при индуктивной нагрузке рабочий поток и поток намагничивания в стержне совпадают по направлению.

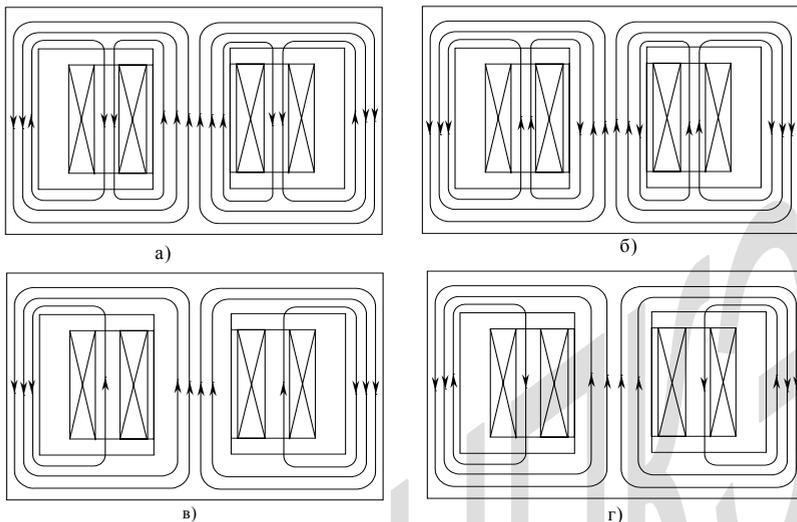


Рис.3.12. Схемы распределения магнитных потоков в нагрузочных режимах работы повышающих (а,б) и понижающих (в,г) автотрансформаторов при активно-индуктивной (а,в) и активно-емкостной (б,г) нагрузках

Причем общая часть обмотки (обмотка НН) охватывается только половиной рабочего потока.

Следовательно, для сохранения напряжения на общей части обмотки поток намагничивания уменьшается на

$$\Delta\Phi = \frac{1}{2}\Phi_0 \frac{U_{1,к.з.} \%}{100\%} \frac{I_1}{I_{1,ном}} \sin\varphi, \quad (3.83)$$

где $\varphi < 0$.

В результате намагничивающий ток в первичной обмотке снижается

$$I_{0,н.} = I_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{U_{1,к.з.} \%}{100\%} \frac{I_1}{I_{1,ном}} \sin\varphi \right), \quad (3.84)$$

и соответственно снижается поток намагничивания в стержне

$$\Phi_{0,р.} = \Phi_0 + \frac{1}{2}\Phi_0 \frac{U_{1,к.з.} \%}{100\%} \frac{I_1}{I_{1,ном}} \sin\varphi, \quad (3.85)$$

а суммарный магнитный поток в стержне с учетом рабочего потока немного увеличивается

$$\begin{aligned}\Phi_{0.p.\Sigma} &= \Phi_{0.p} - \frac{1}{2} \Phi_0 \frac{U_{1.к.з.} \%}{100\%} \frac{S_{\text{эк}}}{S_{\text{эф}}} \frac{I_1}{I_{1.ном}} \sin \varphi = \\ &= \Phi_0 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{U_{1.к.з.} \%}{100\%} \left(1 - \frac{S_{\text{эк}}}{S_{\text{эф}}} \right) \frac{I_1}{I_{1.ном}} \sin \varphi \right].\end{aligned}\quad (3.86)$$

При этом суммарный поток в боковых ярах согласно рис.3.12а уменьшается

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{я}} &= \Phi_{0.p} + \frac{1}{2} \Phi_0 \frac{U_{1.к.з.} \%}{100\%} \frac{S_{\text{эк}}}{S_{\text{эф}}} \frac{I_1}{I_{1.ном}} \sin \varphi = \\ &= \Phi_0 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{U_{1.к.з.} \%}{100\%} \left(\frac{S_{\text{эк}}}{S_{\text{эф}}} + 1 \right) \frac{I_1}{I_{1.ном}} \sin \varphi \right].\end{aligned}\quad (3.87)$$

С учетом изложенного суммарное потокоцепление в общей части обмотки автотрансформатора не изменяется, а в отдельной части обмотки ВН уменьшается, что приводит к уменьшению напряжения на этой части обмотки на величину

$$\Delta U_2 = (U_{2.0} - U_{1.0}) \cdot \left(\frac{U_{1.к.з.} \%}{100\%} \frac{I_1}{I_{1.ном}} \right) \sin \varphi, \quad (3.88)$$

где $U_{1.0}$ и $U_{2.0}$ - напряжения на обмотках НН и ВН на холостом ходу трансформатора.

В связи с изложенным эквивалентная схема повышающего автотрансформатора отличается от эквивалентной схемы повышающего трансформатора, приведенной на рис.3.6б (см.рис.3.13).

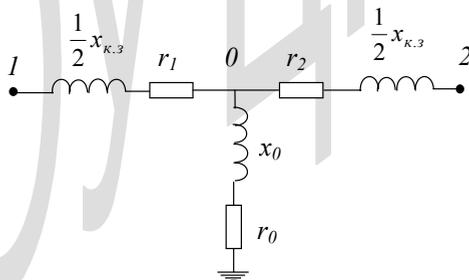


Рис.3.13. Эквивалентная схема повышающего автотрансформатора в нагрузочном режиме

Поскольку каждая из частей обмотки ВН охватывается одинаковым магнитным потоком равным половине рабочего магнитного

потока, полное индуктивное сопротивление $x_{к.з.}$ может быть разделено на две равные части, соответствующие двум частям магнитного потока. Соответственно уменьшение тока намагничивания определяется только половиной рабочего потока, что отражается в эквивалентной схеме тем, что напряжение в точке (0) понижается от тока нагрузки на половине индуктивного сопротивления к.з. В точке 2 на выходе автотрансформатора напряжение дополнительно понижается за счет падения напряжения от тока нагрузки на второй половине $x_{к.з.}$.

При емкостной нагрузке рабочий магнитный поток опережает поток намагничивания на 180° , поэтому его наложение на поток намагничивания в стержне должно бы было привести к уменьшению магнитного потока, охватывающего общую часть обмоток. Но поскольку напряжение на этой части обмотки повышающего трансформатора задано, потокосцепление измениться не может. Следовательно, магнитный поток намагничивания возрастает на величину, определяемую формулой (3.83) при $\varphi > 0$.

С учетом рабочего магнитного потока суммарный магнитный поток в стержне согласно (3.86) немного уменьшается. При этом суммарный магнитный поток в боковых ярмах согласно (3.87) увеличивается. В результате суммарное потокосцепление в общей части обмотки автотрансформатора не изменяется, а в отдельной части обмотки ВН увеличивается, что приводит к увеличению напряжения на обмотке ВН на величину, определяемую формулой (3.88).

Поскольку у понижающего автотрансформатора полный рабочий магнитный поток охватывает только одну обмотку (см. рис.3.11б), разделить его индуктивное сопротивление на две части невозможно. Изменение потока намагничивания в нагрузочном режиме (рис. 3.12) определяется полным рабочим потоком, и эквивалентная схема автотрансформатора не отличается от эквивалентной схемы трансформатора.

Таким образом, широко используемая эквивалентная схема рис.3.13 для расчета нагрузочных режимов трансформаторов и понижающих автотрансформаторов в этих случаях принципиально неприменима по изложенным выше причинам. Эта схема справедлива только для повышающих автотрансформаторов, а также для двухобмоточных трансформаторов с раздельным расположением обмоток (на двух разных стержнях, соединенных ярмами, как у сварочных трансформаторов).

Выполненный анализ работы автотрансформаторов под нагрузкой позволяет оценить их преимущества по сравнению с трансформаторами и сделать заключение о целесообразности компенсации реактивной составляющей нагрузки до автотрансформатора, чтобы исключить перегрузки магнитопровода добавочным магнитным потоком и соответственно колебания напряжения на нагрузке. При этом можно отказаться от уст-

ройства РПН в автотрансформаторах, обеспечивая значительное снижение их стоимости и повышение надежности их работы.

3.4. Конструктивные меры уменьшения добавочных потерь мощности от магнитного потока вне магнитопровода.

Расчет магнитных шунтов

По выходе из межобмоточного пространства рабочий магнитный поток направляется по путям наименьшего магнитного сопротивления во все стороны (см.рис. 3.13).

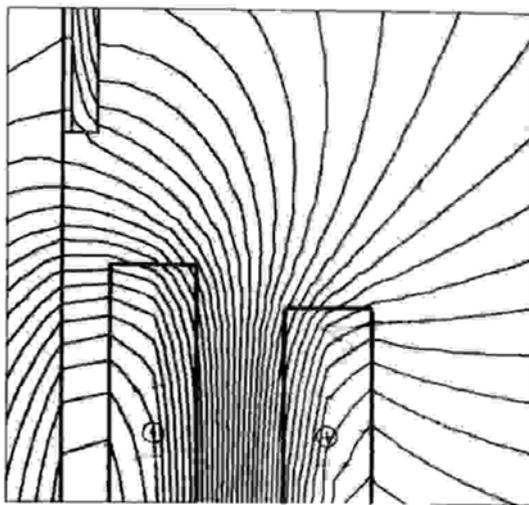


Рис. 3.13. Картина распределения рабочего магнитного потока однофазного двухобмоточного трансформатора при наличии настенных магнитных шунтов

Часть этого потока направляется непосредственно в ярмо. Приближенно она может быть оценена по отношению сечения магнитного потока под ярмом и полного сечения магнитного потока (см. рис.3.14)

$$\Phi_{я} = \Phi \frac{2\delta_{я} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right)}{\pi d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right)} = \Phi \frac{2\delta_{я}}{\pi d_{12}}, \quad (3.89)$$

где $\delta_{я}$ – толщина ярма.

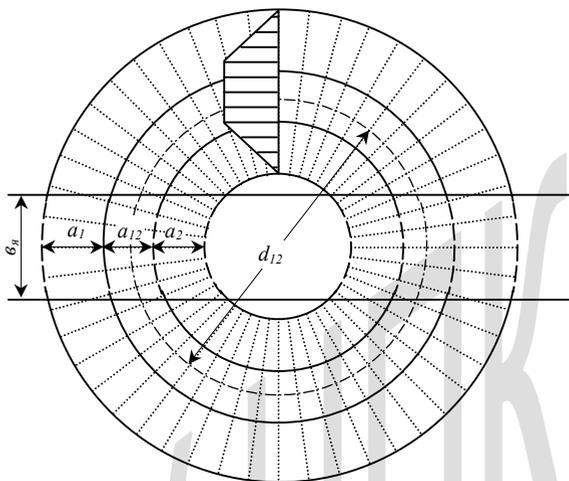


Рис. 3.14. Кольцевой магнитный шунт

Остальная часть рабочего магнитного потока

$$\Phi_p = \Phi \left(1 - \frac{2\delta_{я}}{\pi d_{12}} \right) \quad (3.90)$$

распространяется вне магнитопровода (см. рис. 3.13) проникая в ярма, стяжные балки ярем, крышку и дно бака, стенки бака, индуктируя в этих металлических конструкциях трансформатора вихревые токи и соответственно вызывая добавочные потери мощности.

Эти токи создают встречные магнитные потоки, препятствующие проникновению магнитного потока за указанные металлические конструктивные элементы. В результате область распространения магнитного потока рассеяния оказывается ограниченной этими элементами внутри бака трансформатора (рис. 3.13).

Для уменьшения потерь мощности в стенках бака применяют магнитные шунты на стенках бака, представляющие собой пакеты лис-

товой электротехнической стали, расположенные вдоль высоты обмоток. Их сечение выбирается таким образом, чтобы индукция в шунтах не превышала заданной (например 1 Тл). Суммарная площадь сечения всех настенных шунтов

$$\sum S_m = \frac{\Phi_p}{B_{доп}}. \quad (3.91)$$

Причем шунты располагаются неравномерно: на кратчайшем расстоянии от обмотки расстояние между параллельными шунтами минимально, а при удалении в обе стороны расстояние между шунтами увеличивается пропорционально увеличению расстояния от стенки бака до обмотки.

При наличии магнитных шунтов на стенках бака, высота которых превышает высоту обмоток, магнитный поток практически не попадает в стенки бака, но при этом увеличивается нормальная к боковой поверхности проводов составляющая магнитного потока (см. рис. 3.13), что вызывает дополнительные потери мощности в крайних витках проводов, их перегрев и разрушение изоляции (вплоть до ее обугливания).

Наиболее целесообразно устройство приярменных шунтов, прикрывающих сверху и снизу обмотки и межобмоточные зазоры (см. рис. 3.3).

В этом случае основная часть рабочего магнитного потока по выходе из области расположения обмоток направляется к шунтам (см. рис. 3.15).

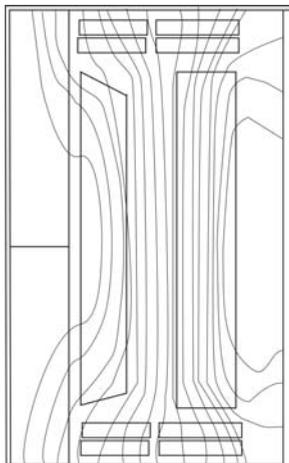


Рис.3.15. Рабочий магнитный поток в двухобмоточном трансформаторе при наличии приярменных магнитных шунтов и отсутствии настенных магнитных шунтов

Попадая в шунт, также как часть рабочего потока Φ_y попадает в ярма, часть рабочего потока Φ_p по шунту переходит в ярма и по ярмам обеспечивается его замыкание. Поскольку магнитный поток направляется к ярмам по 4-м различным направлениям (рис. 3.16) сечение каждого шунта определяется одной четвертой частью Φ и допустимой индукцией $B_{доп}$

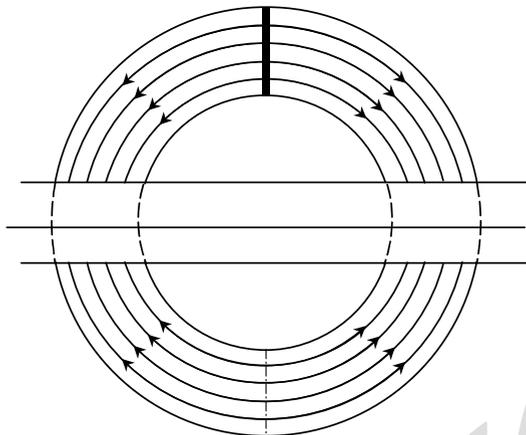


Рис.3.16. Направления распространения магнитного потока в кольцевом магнитном шунте

$$S_{\text{м}} = \frac{\Phi_p}{4B_{\text{дон}}}, \quad (3.92)$$

а высота магнитных приярменных шунтов равна

$$h_{\text{м}} = \frac{S_{\text{м}}}{a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2}} = \frac{\Phi_p}{4B_{\text{дон}} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right)}. \quad (3.93)$$

Приярменные шунты состыкуются с ярами таким образом, что ширина поверхности соприкосновения (через изоляционный слой ~ 3 мм) шунта с ярмом вдвое превышает высоту шунта $h_{\text{м}}$, поскольку через эту же поверхность выходит в ярмо часть потока $\Phi_{\text{я}}$, направляющаяся в ярмо непосредственно после выхода из межобмоточного пространства.

Расход материала (электротехнической стали) на приярменные магнитные шунты меньше, чем на пристенные баковые, а эффективность их значительно выше. Действительно магнитные шунты непрозрачны для магнитного потока. Поэтому все конструктивные элементы трансформаторов, расположенные вне области, ограниченной шунтами, оказываются недостижимыми для магнитного потока и соответственно в них нет дополнительных потерь.

Наличие магнитных шунтов, в которые поток входит вдоль листов стали при минимальном их магнитном сопротивлении, приво-

дит к резкому ограничению нормальной к большей поверхности проводов в крайних витках обмоток составляющей магнитного потока и соответственно к резкому уменьшению потерь в них и к их сохранности.

Поэтому приярменные шунты предпочтительнее пристенных магнитных шунтов. Причем при наличии пристенных магнитных шунтов эффективность приярменных шунтов снижается, т.к. магнитное сопротивление магнитному потоку, направляющемуся к пристенным шунтам, сравнимо с магнитным сопротивлением потоку, направляющемуся к приярменным шунтам.

Расчеты показывают, что при наличии приярменных и отсутствии настенных шунтов только около 5% рабочего магнитного потока замыкается в обход приярменных магнитных шунтов. Такой малый поток не может вызывать заметных добавочных потерь. Поэтому устройство настенных магнитных шунтов при наличии приярменных шунтов нецелесообразно.

Известно несколько конструкций приярменных магнитных шунтов, впервые примененных Запорожским трансформаторным заводом для мощных трансформаторов (кольцевые шунты) и для управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов (параллельные шунты).

Кольцевой шунт представляет собой диск, намотанный спиралью из ленты электротехнической стали. Шунт охватывает стержень магнитопровода и располагается непосредственно под ярмом с небольшим изоляционным расстоянием (~ 3 мм) для исключения электрического контакта листов стали ярма и шунта, поскольку они расположены перпендикулярно и соответственно могут взаимно закоротить ярмо и шунт, создавая опасность пожара в ярме и в шунте.

Кольцевые магнитные шунты прикрывают сверху и снизу торцевые части обмоток, располагаясь на расстоянии от них, обеспечивающем необходимую изоляцию между обмотками и магнитопроводом. Наружный диаметр кольца определяется наружным диаметром внешней обмотки (как правило ВН). Внутренний диаметр кольца определяется внутренним диаметром внутренней обмотки трансформатора (как правило обмотки НН). Толщина (высота) шунта выбирается исходя из необходимого поперечного сечения шунта (см. формулу (3.93)). Кольцевые шунты имеют два существенных недостатка. Они увеличивают высоту магнитопровода на двойную толщину шунтов. Соответственно увеличивается масса магнитопровода а также объем бака и масла. Все это приводит к заметному увеличению стоимости трансформатора.

Второй существенный недостаток кольцевых шунтов заключается в том, что необходимо устройство зазора в нем для исключения возможности циркуляции тока, который индуцируется пронизывающим шунт магнитным потоком. Резка спирально намотанного шунта приводит к оплавлению краев листов и к образованию сплошной проводящей поверхности, шунтирующей все листы и создающей возможность замыкания контуров индуцируемого магнитным потоком тока (см. рис. 3.17).

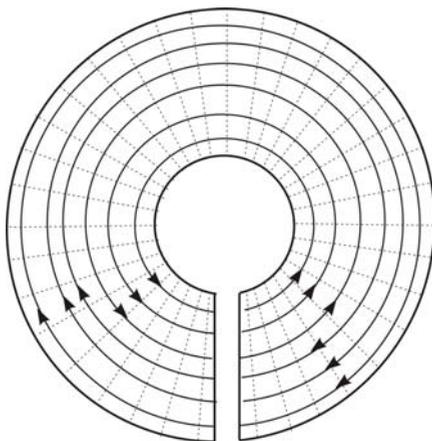


Рис.3.17. Индуцируемые токи в кольцевом магнитном шунте при наличии сплошного контакта на поверхности среза

Для устранения проводящего металлического слоя он травится соляной кислотой, а затем после тщательной промывки торцы изолируются эпоксидной смолой. Все эти процедуры значительно увеличивают трудоемкость и стоимость изготовления шунтов.

Другой возможный вариант изготовления кольцевых шунтов – набор в форме из отдельных листов разных размеров. Но это еще более трудоемкая работа, т.к. необходимо изготовить множество пластин электротехнической стали разной длины и сложить их с усилием в прессформе с последующей пропиткой эпоксидной смолой.

По этим двум причинам при разработке насыщающихся шунтирующих реакторов ЗТЗ применил параллельные шунты. Такие шунты устанавливаются параллельно ярмам с двух сторон от них (см. рис. 3.18).

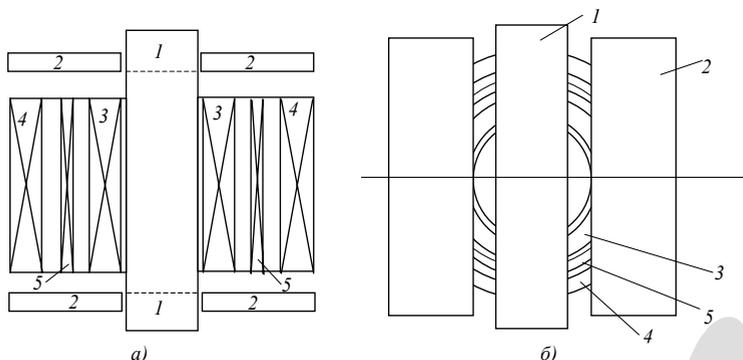
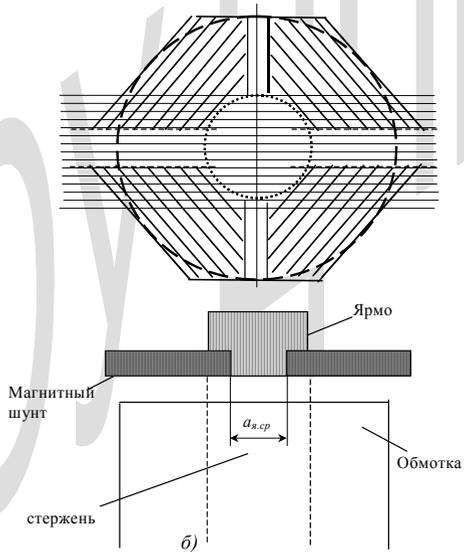
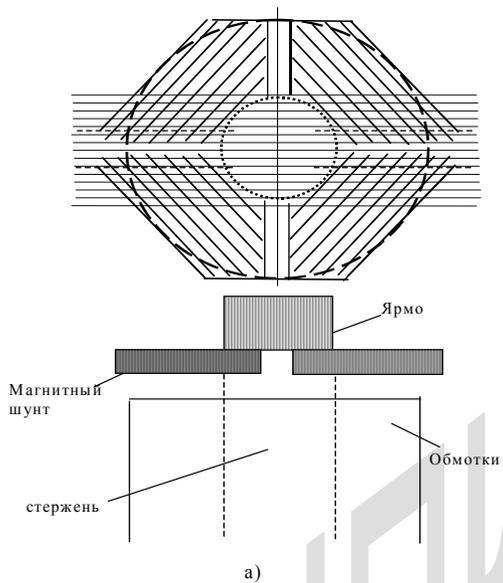


Рис.3.18. Схема параллельных магнитных шунтов: а – вид сбоку, б – вид сверху; 1 – основной магнитопровод, 2 – шунты, 3 – обмотка НН, 4 – обмотка ВН, 5 – компенсационная обмотка

Они образуют замкнутый магнитный контур, параллельный магнитопроводу. Ширина параллельных шунтов такова, что они полностью покрывают торцевую часть обмоток. Их толщина такая же, как для кольцевых шунтов. Но они не увеличивают высоту магнитопровода, так как расстояние от торцов обмоток и до шунтов одинаково. Параллельные шунты очень эффективно улавливают рабочий магнитный поток. Однако расход материала (электротехнической стали) значительно больше, чем у кольцевых шунтов.

Наиболее экономный вариант приярменных магнитных шунтов – секторный [8]. Дело в том, что четыре части рабочего магнитного потока, улавливаемого кольцевыми шунтами, направляются к ярму по четырем различным направлениям (см. рис. 3.16). Поэтому кольцевой шунт можно разделить на четыре отдельных части, магнитно не связанные. При этом отпадает необходимость изгиба листов стали в пакетах шунта (см. рис. 3.19).

Толщина (высота) шунта в этом случае может быть уменьшена, т.к. каждый сектор проходит над различными областями обмоток, включая межобмоточный зазор. Поэтому расход стали на секторный шунт примерно такой же, как на кольцевой, но высота магнитопровода в этом случае не увеличивается и соответственно не увеличивается вес магнитопровода.



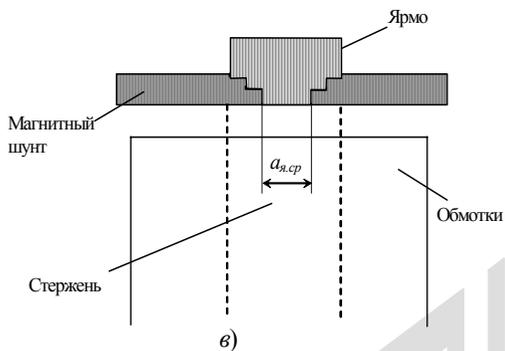


Рис.3.19. Секторный шунт: аналог кольцевому шунту (а), в одноступенчатом варианте стыковки с ярмом (б), в двухступенчатом варианте(в)

3.5. Регулирование напряжения трансформаторов под нагрузкой

Как указывалось в §.3.2 для ограничения колебаний напряжения на стороне высокого напряжения при реактивной нагрузке применяются регуляторы напряжения под нагрузкой, представляющие собой механические переключатели, соединяющие выводы трансформаторов с отпайками обмоток. Регулирование осуществляется в пределах $\pm(9 \div 16)\%$ при числе ступеней в положительном и отрицательном направлениях по 6, 8 и 10 соответственно. Следует отметить, что опыт эксплуатации трансформаторов подтверждает вышеприведенный анализ возможных колебаний напряжения под нагрузкой.

Проанализируем последствия такого регулирования. Изменение числа витков вторичной обмотки приводит к изменению коэффициента трансформации. Поскольку для токов нагрузки первичной и вторичной обмоток сохраняется соотношение (3.17) уменьшение числа витков вторичной обмотки приводит к соответствующему уменьшению тока емкостной нагрузки в первичной обмотке. Соответственно уменьшается добавочное падение напряжения на индуктивном рабочем сопротивлении трансформатора и снижается напряжение на индуктивном сопротивлении намагничения χ_0 . Следовательно, при смешанной активно-реактивной нагрузке.

$$U_{0.раб} = U_{1.ном} \left(1 + \frac{U_{к.з.} \%}{100\%} \frac{I_1}{I_{1.ном}} \frac{N_{2.p}}{N_2} \sin \varphi \right) \quad (3.95)$$

и магнитный поток в сердечнике

$$\Phi_{0.раб} = \Phi_0 \left(1 + \frac{U_{к.з.} \%}{100\%} \frac{I_1}{I_{1.ном}} \frac{N_{2.p}}{N_2} \frac{S_{эк}}{S_{эф}} \sin \varphi \right), \quad (3.96)$$

где $N_{2.p}$ – число витков во вторичной обмотке с учетом РПН.

Соответственно магнитный поток в яре (в полуйарме)

$$\begin{aligned} \Phi_{я} &= \Phi_{0.раб} - \Phi = \\ &= \Phi_0 \left(1 + \frac{U_{к.з.} \%}{100\%} \frac{I_1}{I_{1.ном}} \frac{N_{2.p}}{N_2} \right) - \\ &- \Phi_0 \frac{U_{к.з.} \%}{100\%} \frac{I_1}{I_{1.ном}} \frac{N_{2.p}}{N_2} \frac{S_{эк}}{S_{эф}} = \\ &= \Phi_0 \left[1 - \frac{U_{к.з.} \%}{100\%} \frac{I_1}{I_{1.ном}} \frac{N_{2.p}}{N_2} \left(\frac{S_{эк}}{S_{эф}} - 1 \right) \right]. \quad (3.97) \end{aligned}$$

Следовательно, отклонения магнитного потока в стержнях и ярмах трансформатора от магнитного потока холостого хода несколько уменьшаются. Однако основная часть отклонения остается со всеми вытекающими из рассмотренного выше последствиями.

Таким образом, РПН позволяет удерживать напряжение на вторичной обмотке в приемлемых пределах, но мало влияет на электромагнитные процессы в трансформаторах. С учетом высокой стоимости РПН, увеличивающей стоимость трансформаторов (автотрансформаторов) при значительном снижении надежности их работы, можно утверждать, что более целесообразна разгрузка трансформатора от реактивной составляющей тока нагрузки в результате установки управляемых шунтирующих компенсаторов реактивного тока электрических сетей.

В этом случае можно гарантировать ограничение изменения напряжения на обеих обмотках трансформаторов весьма узкими пределами, определяемыми активным током нагрузки.

3.6. Особенности работы трехфазных трансформаторов

В трехфазных трансформаторах обмотки трех фаз монтируются на общем магнитопроводе, три стержня которых соединяются ярами (см.рис.3.20).

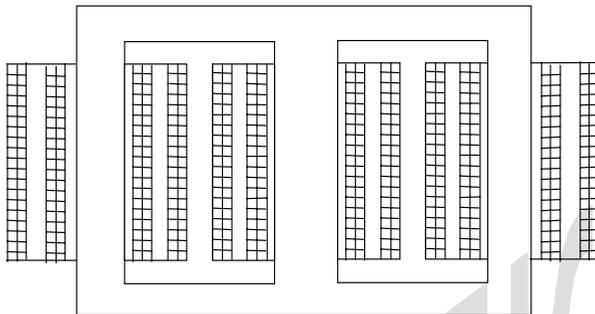


Рис.3.20. Схема трехфазного трансформатора

В симметричном трехфазном режиме сумма токов во всех фазах равна нулю. Это означает, что сумма магнитных потоков трех фаз также равна нулю. Например, в момент максимума тока в средней фазе в стержне этой фазы магнитный поток максимален. По выходе из зоны расположения обмоток при наличии магнитных приярменных шунтов магнитный поток, попадая в ярмо, разделяется на две равные части и направляется к крайним стержням. В этот момент согласно звезде токов в обеих крайних обмотках токи имеют направление, противоположное току в средней обмотке, и каждый из них равен половине тока средней обмотки. Следовательно, и создаваемые ими магнитные потоки противоположны по направлению потоку в среднем стержне и в сумме равны ему по величине (рис.3.21).

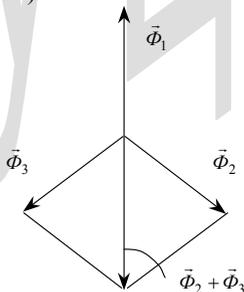


Рис.3.21. Диаграмма магнитных потоков в стержнях трех фаз трансформатора

Таким образом, магнитный поток естественным образом замыкается в магнитопроводе, как и в случае однофазного трансформатора с боковыми ярмами.

Однако при максимальном токе в одной из крайних фаз по соответствующему крайнему стержню проходит максимальный поток, который полностью переходит в ярмо, соединяющее крайний и средний стержни. По достижении среднего стержня этот поток раздваивается: половина его уходит в средний стержень, а другая половина направляется по ярму в другой крайний стержень. Напротив, при максимуме тока в другой крайней фазе весь поток направляется по ярму, соединяющему стержень этой фазы со средним стержнем, а затем раздваивается на две части, как и в предыдущем случае. Таким образом, в той или иной части ярем два раза в период магнитный поток достигает максимального значения, соответствующего максимуму полного потока в каждом из трех стержней. Следовательно, в варианте трехстержневого магнитопровода сечения всех стержней и ярем одинаковы и, следовательно, сечение ярем трехстержневого трехфазного трансформатора вдвое больше сечения ярем однофазного трансформатора броневых типа. Для мощных трансформаторов сверхвысокого напряжения высота ограничивается железнодорожным габаритом, что определяет необходимость ограничения высоты ярем и, следовательно, их сечения.

Поэтому целесообразно уменьшить высоту ярем, соединяющих стержни, а для замыкания части магнитного потока крайних стержней выполнить боковые ярма наподобие боковых ярем однофазных трансформаторов (рис.2.1). Поскольку боковые ярма не имеют обмоток, по ним замыкается не половина магнитного потока, создаваемого обмотками ближайшей крайней фазы, а около 43% от него. 57% этого потока направляется по ярмам к соседним стержням с м.д.с. согласованного направления. Соответственно сечение основных ярем (между стержнями) трехфазных трансформаторов должно быть на 14% больше, чем у однофазных трансформаторов с магнитопроводом броневых типа, а сечение боковых ярем на 14% меньше.

Наличие боковых ярем у трехфазного трансформатора позволяет также решить проблему распределения магнитного потока в несимметричных режимах работы трансформатора, когда токи и, следовательно, магнитные потоки в трех фазах различны. В этом случае бо-

ковые ярма обеспечивают замыкание магнитных потоков нулевой последовательности.

Следует отметить, что все изложенное относительно добавочных магнитных потоков в стержнях и ярмах однофазных трансформаторов в нагрузочных режимах справедливо и для трехфазных трансформаторов с той лишь разницей, что для основных ярем (между стержнями) магнитный поток однофазного трансформатора следует увеличить в отношении $0,57/0,5 = 1,14$, а в боковых ярмах – уменьшить в отношении $0,43/0,5 = 0,86$.

3.7. Особенности работы трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов

На холостом ходу трехобмоточного трансформатора (вторичная и третичная обмотки обесточены) все соотношения для двухобмоточных трансформаторов сохраняются. Магнитный поток сосредоточен в основном в магнитопроводе и охватывает одновременно все витки всех трех обмоток. Поэтому соотношение между напряжениями всех трех обмоток определяются соотношением числа их витков

$$\frac{U_{2.ном}}{U_{1.ном}} = \frac{N_2}{N_1} = \kappa_{T.21}; \quad \frac{U_{3.ном}}{U_{1.ном}} = \frac{N_3}{N_1} = \kappa_{T.31}, \quad (3.98)$$

а ток холостого хода $I_{0.1}$ и магнитный поток холостого хода определяются формулами (3.11) и (3.4). Соответственно индуктивные сопротивления намагничивания определяются соотношением (3.12).

Аналогично при нагружении одной из обмоток (вторичной либо третичной) при обесточенной другой обмотке (третичной либо вторичной) все соотношения, полученные в §3.1 и 3.2 для режимов опыта к.з. и рабочих режимов двухобмоточных трансформаторов полностью соответствуют условиям работы трехобмоточных трансформаторов. Справедлива и эквивалентная схема трансформатора, приведенная на рис.3.6.

Причем в соответствии с формулой (3.36) индуктивные сопротивления при коротком замыкании вторичной и третичной обмоток различны в соответствии с различием их расположения и размеров. При к.з. третичной обмотки

$$\begin{aligned} x_{к.з.1-3} &= \frac{\omega \mu N_1^2}{\ell_0} \pi d_{13} \left(a_{13} + \frac{a_1 + a_3}{3} \right) = \\ &= \frac{\omega \mu N_1^2}{\ell_0} S_{эф.1-3} = 0,789 \cdot 10^{-5} f \frac{N_1^2}{\ell_0} S_{эф.1-3}, \end{aligned} \quad (3.99)$$

где эффективное сечение магнитного потока в межобмоточном пространстве при короткозамкнутой третичной обмотке и разомкнутой вторичной обмотке

$$S_{эф.1-3} = \pi d_{13} \left(a_{13} + \frac{a_1 + a_3}{3} \right), \quad (3.100)$$

f – промышленная частота, d_{13} – средний диаметр зазора между первичной и третичной обмотками, a_{13} – его ширина, a_1 и a_3 – толщины (радиальные) первичной и третичной обмоток.

Соответственно эквивалентное сечение магнитного потока в этом случае (в предположении, что индукция по всему сечению одинакова и равна индукции в межобмоточном пространстве)

$$S_{\text{эк.1-3}} \approx \pi d_{13} \left(a_{13} + \frac{a_1 + a_3}{2} \right). \quad (3.101)$$

Следовательно, при расположении третичной обмотки между первичной и вторичной обмотками

$$S_{\text{эф.1-3}} < S_{\text{эф.1-2}}; \quad S_{\text{эк.1-3}} < S_{\text{эк.1-2}}.$$

Напротив, при расположении третичной обмотки вне границ первичной и вторичной обмоток (внутри обоих или снаружи)

$$S_{\text{эф.1-3}} > S_{\text{эф.1-2}}; \quad S_{\text{эк.1-3}} > S_{\text{эк.1-2}};$$

где $S_{\text{эф.1-2}}$ и $S_{\text{эк.1-2}}$ – эффективное и эквивалентное сечения магнитного потока при замкнутой вторичной обмотке и разомкнутой третичной обмотке.

Ситуация осложняется при одновременном протекании тока нагрузки в обеих нагрузочных обмотках трансформатора (вторичной и третичной). Как и в случае двухобмоточного трансформатора, активные составляющие токов нагрузки $I_2 \cos \varphi_2$ и $I_3 \cos \varphi_3$ практически не оказывают влияния на суммарный магнитный поток, сцепляющийся со всеми витками первичной обмотки. Индуктивные же составляющие токов нагрузки $I_2 \sin \varphi$ и $I_3 \sin \varphi$ изменяют суммарное потокосцепление, что приводит к изменению потока намагничения

$$\Phi_{0.н} = \Phi_0 \left(1 + \frac{U_{\text{к.з.1-2}} \%}{100\%} \frac{I_2}{I_{2,\text{ном}}} \sin \varphi_2 + \frac{U_{\text{к.з.1-3}} \%}{100\%} \frac{I_3}{I_{3,\text{ном}}} \sin \varphi_3 \right), \quad (3.102)$$

где $U_{\text{к.з.1-2}}$ и $U_{\text{к.з.1-3}}$ – напряжения на первичной обмотке при номинальном токе в короткозамкнутой вторичной либо третичной обмотке соответственно, I_2 и I_3 – токи в этих обмотках, φ_2 и φ_3 – углы сдвига тока относительно напряжения в этих обмотках.

Если для соседней с первичной вторичной обмотки трансформатора $U_{1,\text{к.з.}}$ составляет 10-15% от номинального напряжения, то для более удаленной третичной обмотки $U_{1,\text{к.з.}}$ может быть значительно больше. Соответственно согласно формуле (3.60) влияние тока нагрузки в третичной обмотке может оказаться значительно сильнее, чем влияние тока во вторичной обмотке.

Изменение магнитного потока намагничения приводит к соответствующему изменению э.д.с. намагничивания.

$$E_{1,0,n} = -U_{1,0} \left[1 + \frac{U_{к.з.1-2} \%}{100\%} \frac{I_2}{I_{2,ном}} \sin \varphi_2 + \frac{U_{к.з.1-3} \%}{100\%} \frac{I_3}{I_{3,ном}} \sin \varphi_3 \right] \quad (3.103)$$

и тока намагничивания

$$I_{1,0,n} = I_{1,0} \left[1 + \frac{U_{к.з.1-2} \%}{100\%} \frac{I_2}{I_{2,ном}} \sin \varphi_2 + \frac{U_{к.з.1-3} \%}{100\%} \frac{I_3}{I_{3,ном}} \sin \varphi_3 \right]. \quad (3.104)$$

Соответственно изменяются напряжения на вторичной и третичной обмотках трансформатора

$$U_{2,n} = -k_{T,2} E_{1,0}; \quad U_{3,n} = -k_{T,3} E_{1,0}.$$

В этом случае эквивалентная схема трансформатора имеет тот же вид, что и для двухобмоточного трансформатора (см. рис.3.22).

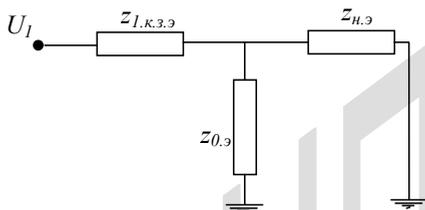


Рис.3.22. Эквивалентная схема трехобмоточного трансформатора

Однако продольное индуктивное сопротивление трехобмоточного трансформатора не постоянно, как в случае двухобмоточного трансформатора, а зависит от токов во вторичной и третичной обмотках. Действительно согласно формуле (3.103)

$$\begin{aligned} U_{1,0,n} &= U_{1,0} + \frac{U_{2,к.з.}}{I_{2,ном}} I_2 \sin \varphi_2 + \frac{U_{3,к.з.}}{I_{3,ном}} I_3 \sin \varphi_3 = \\ &= U_{1,0} + x_{к.з.1-2} I_2 \sin \varphi_2 + x_{к.з.1-3} I_3 \sin \varphi_3 = \\ &= U_{1,0} + I_2 \sin \varphi_2 x_{к.з.1-2} \left(1 + \frac{x_{к.з.1-3} I_3 \sin \varphi_3}{x_{к.з.1-2} I_2 \sin \varphi_2} \right) = \\ &= U_{1,0} + I_2 x_{к.з.э} \cdot \sin \varphi_2, \end{aligned} \quad (3.105)$$

где

$$x_{к.з.э} = x_{к.з.1-2} \left(1 + \frac{x_{к.з.1-3} I_3 \sin \varphi_3}{x_{к.з.1-2} I_2 \sin \varphi_2} \right). \quad (3.106)$$

Изменение соотношения токов во вторичной и третичной обмотках трансформатора и углов их сдвига по отношению к напряжению на обмотках (φ_2 и φ_3) приводит к значительному изменению эк-

вивалентного сопротивления трансформатора при протекании по нему различных токов I_2 и I_3 .

С учетом рабочих магнитных потоков, создаваемых в результате взаимодействия первичной, вторичной и третичной обмоток суммарный магнитный поток в стержне однофазного трехобмоточного повышающего трансформатора равен

$$\begin{aligned} \Phi_{\Sigma} &= \Phi_{0.н} - \Phi = \Phi_0 \left(1 + \frac{U_{к.з.1-2} \%}{100\%} \frac{I_2}{I_{2.ном}} \sin \varphi_2 + \right. \\ &+ \left. \frac{U_{к.з.1-3} \%}{100\%} \frac{I_3}{I_{3.ном}} \sin \varphi_3 \right) - \Phi_0 \left(\frac{U_{к.з.1-2} \%}{100\%} \frac{I_2}{I_{2.ном}} \frac{S_{эк.2}}{S_{эф.2}} \sin \varphi_2 + \right. \\ &+ \left. \frac{U_{к.з.1-3} \%}{100\%} \frac{S_{эк.3}}{S_{эф.3}} \frac{I_3}{I_{3.ном}} \sin \varphi_3 \right) = \\ &= \Phi_0 \left[1 + \frac{U_{к.з.1-2} \%}{100\%} \frac{I_2}{I_{2.ном}} \sin \varphi_2 \cdot \left(1 - \frac{S_{эк.2}}{S_{эф.2}} \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{U_{к.з.1-3} \%}{100\%} \frac{I_3}{I_{3.ном}} \sin \varphi_3 \left(1 - \frac{S_{эк.3}}{S_{эф.3}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.107)$$

Магнитный поток в боковых ярах повышающего трансформатора определяется формулой (3.102).

Напротив, для понижающего трехобмоточного трансформатора магнитный поток в боковых ярах определяется формулой (3.107), а в стержне – формулой (3.102).

Формулы (3.103) – (3.107) позволяют сделать вывод, что неблагоприятный эффект реактивных составляющих тока нагрузки вторичной обмотки может быть в принципе исключен при компенсирующей нагрузке третичной обмотки.

Действительно, если регулировать ток в третичной обмотке таким образом, что произведение

$$x_{к.з.1-3} \cdot I_3 \sin \varphi_3 = -x_{к.з.1-2} \cdot I_2 \sin \varphi_2,$$

то согласно (3.105) множитель в круглых скобках будет равен нулю и напряжение на трансформаторе не будет изменяться при изменении нагрузки. Больше того, при этом согласно (3.60) исчезнут и дополнительные магнитные потоки от реактивного тока нагрузки и магнитный поток в магнитопроводе стабилизируется. Это не означает, однако, что исчезнет рабочий магнитный поток. Он сохранится полностью, но бу-

дучи сдвинутым по фазе на 90° по отношению к магнитному потоку намагничивания, не будет перегружать элементы магнитопровода.

Возможны два варианта подключения компенсаторов к третичной обмотке трансформаторов (см. рис.3.23).

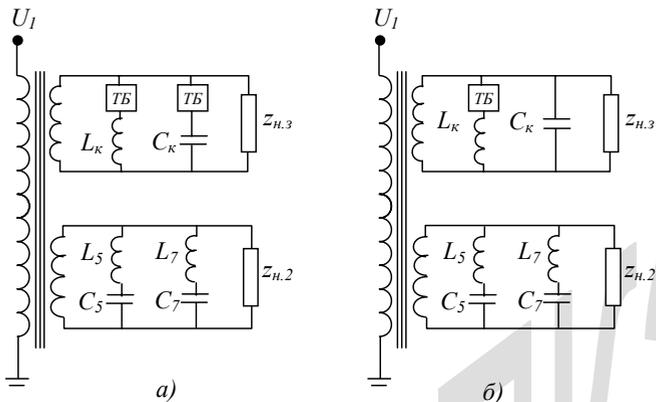


Рис. 3.23. Однолинейные схемы подключения компенсаторов реактивной мощности к третичной обмотке понижающего трансформатора : а – с двумя тиристорными блоками; б – с одним тиристорным блоком: ТБ – тиристорные блоки управления, L_k и C_k – реактор и батарея конденсаторов компенсатора, $L_5 - C_5$ и $L_7 - C_7$ – фильтры высших гармонических, $z_{н.2}$ и $z_{н.3}$ – полные сопротивления нагрузок

В одном варианте (рис.3.23а) используются два тиристорных блока на каждой фазе трансформатора, соответственно регулирующие токи через реактор и конденсаторную батарею. В другом варианте (рис.3.23б) используется один тиристорный блок в каждой фазе. Но этот блок рассчитывается на повышенную мощность. Например, если необходимо обеспечить одинаковые индуктивную и емкостную мощности компенсатора во втором случае мощность реактора должна быть вдвое больше мощности конденсаторной батареи, поскольку при одинаковой их мощности суммарный ток компенсатора будет равен нулю. Соответственно и мощность тиристорного блока возрастает вдвое. Поэтому более экономичной является схема рис.3.23а.

В результате применения схем рис.3.23 реактивный ток компенсируется на напряжении потребителя и не попадает в питающую сеть.

В случае повышающих трансформаторов применение подобных схем компенсации на третичной обмотке нецелесообразно, т.к.

через обмотку ВН при этом протекает реактивный ток нагрузки (линии электропередачи со всеми вытекающими последствиями (см. §3.2)). Для компенсации реактивной составляющей тока нагрузки в этом случае целесообразно применить специальный трехобмоточный трансформатор, подключаемый непосредственно к линии (см. рис.3.24) и рассчитанный на потребление 100% реактивной мощности линии.

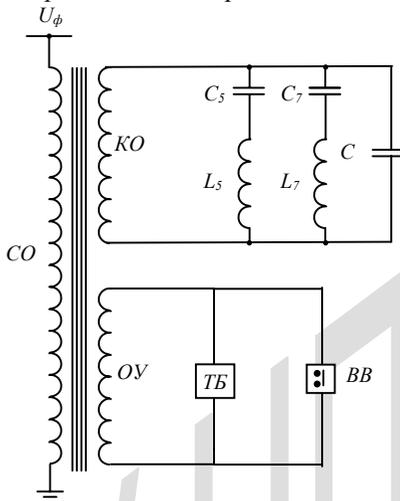


Рис.3.24. Принципиальная схема управляемого компенсатора реактивной мощности; ТБ – тиристорный ключ, ВВ – вакуумный выключатель, C_5-L_5 и C_7-L_7 – фильтры пятой и седьмой гармоник, C – добавочный конденсатор (батарея конденсаторов)

В этом случае повышающий трансформатор полностью разгружается от реактивного тока и работает в наиболее благоприятных условиях чисто активной нагрузки (см. §3.2). При большой длине линии электропередачи ($\ell > 300$ км) целесообразно компенсировать реактивную мощность линии на обоих ее концах путем установки двух компенсаторов, каждый из которых рассчитан на компенсацию 50% реактивной мощности линии. Подключение вакуумного выключателя параллельно тиристорному блоку обеспечивает возможность его ремонта при сохранении реактора в эксплуатации.

Компенсатор по схеме рис. 3.24 дает возможность безинерционно изменять реактивный ток в необходимых пределах [4] путем изменения угла зажигания тириستоров (см.рис.3.25).

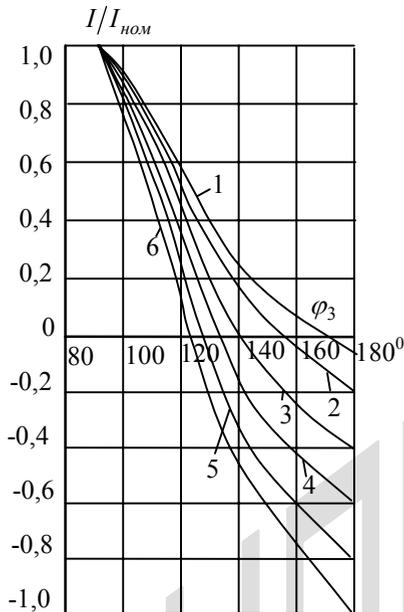


Рис.3.25. Зависимости тока через сетевую обмотку конденсатора от угла зажигания тиристоров: при $C=0$ (кривая 1), при $I_{с.ном}/I_{л.ном}=0,2$ (кривая 2); 0,4 (кривая 3); 0,6 (кривая 4); 0,8 (кривая 5); 1 (кривая 6)

Изменение отношения номинальных емкостного и индуктивного токов конденсатора обеспечивается соответствующим подбором емкости конденсаторной батареи.

Работа тиристоров при полной их проводимости (когда угол зажигания изменяется в диапазоне $90^\circ < \psi < 180^\circ$) связана с образованием в токе трансформатора высших гармонических (см.рис.3.26).

Подавление третьей гармонической обеспечивается соединением в треугольник вторичных обмоток трех фаз. Подавление пятой и седьмой гармоник выполняется фильтрами этих гармоник, подключаемыми ко вторичной обмотке. Наиболее эффективно осуществляется подавление высших гармонических описанным способом при расположении вторичной обмотки между первичной (ВН) и третичной (НН).

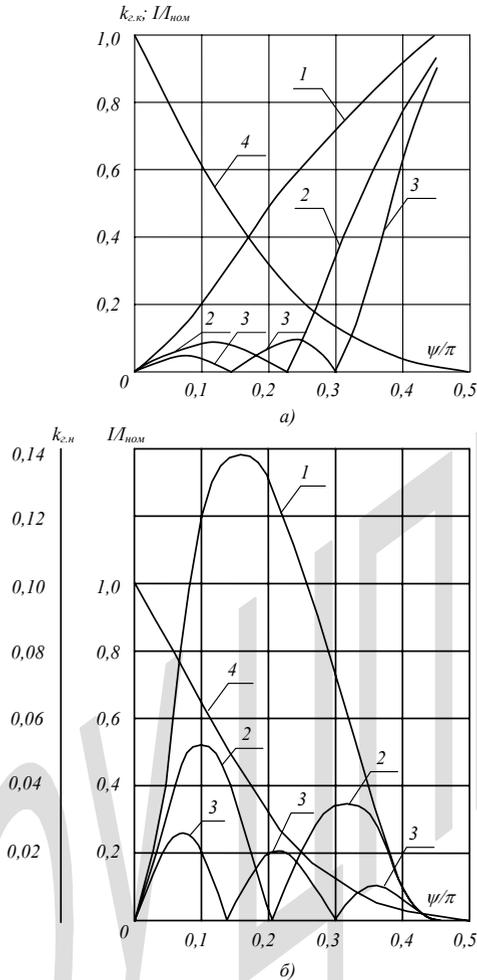


Рис.3.26. Отношение токов высших гармонических: третьей (1), пятой (2), седьмой (3) к току основной частоты в зависимости от угла зажигания тиристоров $0 < \psi < 90^\circ$: а – по отношению к текущему току основной частоты; б – по отношению к номинальному току (при полностью открытых тиристорах); 4 -отношение действующего значения полного тока к номинальному току

Внешние нагрузочные характеристики трехобмоточных трансформаторов могут быть проанализированы при использовании эквивалентной схемы (рис.3.27).

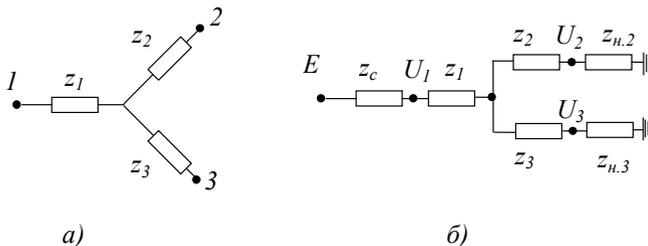


Рис.3.27. Эквивалентные схемы трехобмоточного трансформатора на холостом ходу (а) и при нагрузке вторичной и третичной обмоток (б), где z_c – предвключенное сопротивление системы, $z_{н,2}$ и $z_{н,3}$ – сопротивление нагрузки вторичной и третичной обмоток

В этой схеме взаимные индуктивные сопротивления к.з. определяются в опыте к.з. при поочередном замыкании вторичной и третичной обмоток и приложении напряжения (напряжения короткого замыкания) к первичной и вторичной обмоткам, при которых ток в короткозамкнутой обмотке достигает номинального. Сопротивление к.з. $z_{к.з.1-2}$ определяется при замкнутой вторичной обмотке и при разомкнутой третичной обмотке при приложении напряжения к первичной обмотке. Сопротивление к.з. $z_{к.з.1-3}$ определяется при замкнутой третичной обмотке и разомкнутой вторичной обмотке при приложении напряжения к первичной обмотке. Сопротивление к.з. $z_{к.з.2-3}$ определяется при замкнутой третичной обмотке, разомкнутой первичной обмотке и при приложении напряжения ко вторичной обмотке. В этом случае индуктивное сопротивление к.з. может быть рассчитано по формуле (см. формулу (3.36))

$$\begin{aligned}
 x_{к.з.2-3} &= \frac{\omega \mu N_2^2}{\ell_0} \pi d_{23} \left(a_{23} + \frac{a_2 + a_3}{3} \right) = \\
 &= \frac{\omega \mu N_2^2}{\ell_0} S_{эф.2-3} = 0,789 \cdot 10^{-5} f \frac{N_2^2}{\ell_0} S_{эф.2-3}, \quad (3.108)
 \end{aligned}$$

где f – промышленная частота, Гц, а эффективное сечение магнитного потока в межобмоточном пространстве при короткозамкнутой обмотке и приложении напряжения ко вторичной обмотке

$$S_{эф.2-3} = \pi d_{2,3} \left(a_{23} + \frac{a_2 + a_3}{3} \right), \quad (3.109)$$

d_{23} – средний диаметр зазора между вторичной и третичной обмотками, a_{23} – его ширина, a_2 и a_3 – толщины (радиальные) вторичной и третичной обмоток.

Полные сопротивления короткого замыкания равны

$$z_{12} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + x_{12}^2}, \quad (3.110)$$

$$z_{13} = \sqrt{(R_1 + R_3)^2 + x_{13}^2}, \quad (3.111)$$

$$z_{23} = \sqrt{(R_2 + R_3)^2 + x_{23}^2}, \quad (3.112)$$

где активные сопротивления обмоток определяются по формуле (3.53), а индуктивные сопротивления – по формулам (3.36); (3.99) и (3.108).

Описанная методика измерений и расчетов взаимных сопротивлений к.з. обмоток трансформатора позволяет составить эквивалентную его схему в виде трехлучевой звезды (рис.3.27а), в которой выполняются соотношения:

$$\left. \begin{aligned} z_1 + z_2 &= z_{12} \\ z_1 + z_3 &= z_{13} \\ z_2 + z_3 &= z_{23} \end{aligned} \right\}. \quad (3.113)$$

Решение этой системы уравнений определяет сопротивление к.з. каждого из лучей эквивалентной схемы

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= 0,5(z_{12} + z_{13} - z_{23}) \\ z_2 &= 0,5(z_{12} + z_{23} - z_{13}) \\ z_3 &= 0,5(z_{13} + z_{23} - z_{12}) \end{aligned} \right\}. \quad (3.114)$$

В соответствии с вышеизложенным средняя точка эквивалентной схемы рис. 3.27а не имеет аналога в трансформаторе. Эта схема позволяет вычислить только внешние характеристики трансформатора, в частности токи во всех обмотках трансформатора и напряжения на их зажимах при нагрузке одновременно двух обмоток (см. рис.3.27б). Естественно в этой эквивалентной схеме все сопротивления должны быть приведены к одной стороне.

3.8. Параллельное соединение трансформаторов

При параллельном соединении одинаковых по мощности и по всем параметрам трансформаторов (рис. 3.28) нагрузка между ними распределяется равномерно, поскольку все параллельные ветви одинаковы.

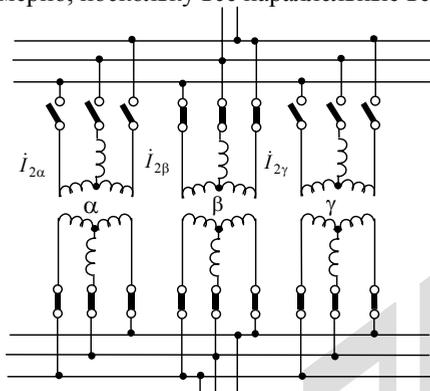


Рис. 3.28. Параллельное включение трехфазных трансформаторов

На практике, однако, параллельно работают трансформаторы различной конструкции с различными параметрами. В связи с этим необходимо располагать методикой расчета режимов работы трансформаторов в этих условиях.

Из вышеизложенного ясно, что токи намагничивания составляют незначительную часть тока трансформатора под нагрузкой. Поэтому для рассматриваемой задачи ими можно пренебречь. Тогда схема замещения применительно к схеме включения трансформаторов рис. 3.28 может быть существенно упрощена (см. рис.3.29).

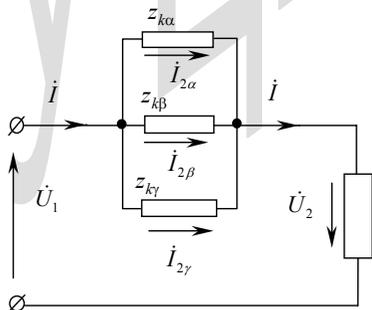


Рис.3.29. Схема замещения для параллельного включения трансформаторов

Поскольку при параллельном соединении падения напряжения на всех трансформаторах одинаковы, можно записать для каждой из фаз (например, для фазы 2)

$$\dot{I}_{2\alpha} z_{k\alpha} = \dot{I}_{2\beta} z_{k\beta} = \dot{I}_{2\gamma} z_{k\gamma} = \dot{I}/Y, \quad (3.115)$$

где

$$\dot{I}_{2\alpha} + \dot{I}_{2\beta} + \dot{I}_{2\gamma} = \dot{I}, \quad (3.116)$$

$$Y = \frac{1}{z_{k\alpha}} + \frac{1}{z_{k\beta}} + \frac{1}{z_{k\gamma}}, \quad (3.117)$$

греческими буквами обозначены номера трансформаторов.

Из (3.115)

$$I_{2\alpha} = \frac{\dot{I}}{z_{k\alpha} Y}, \quad I_{2\beta} = \frac{\dot{I}}{z_{k\beta} Y}, \quad I_{2\gamma} = \frac{\dot{I}}{z_{k\gamma} Y}. \quad (3.118)$$

Отсюда следует, что токи между параллельно включенными трансформаторами распределяются обратно-пропорционально их сопротивлениям короткого замыкания.

$$I_{2\alpha} : I_{2\beta} : I_{2\gamma} = \frac{1}{z_{k\alpha}} : \frac{1}{z_{k\beta}} : \frac{1}{z_{k\gamma}}. \quad (3.119)$$

Связь между сопротивлением короткого замыкания и напряжением к.з. трансформатора определяется соотношением $z_k = \frac{U_{к.з.}}{I_{ном}}$.

Подставляя это соотношение в (3.119) получаем

$$\frac{I_{2\alpha}}{I_{ном}} : \frac{I_{2\beta}}{I_{ном}} : \frac{I_{2\gamma}}{I_{ном}} = \frac{1}{U_{к.з.\alpha}} : \frac{1}{U_{к.з.\beta}} : \frac{1}{U_{к.з.\gamma}}. \quad (3.120)$$

Следовательно, относительная загрузка трансформаторов обратно-пропорциональна их напряжениям короткого замыкания.

Для устранения уравнильных токов в контурах обмоток параллельно включенных трансформаторов необходимо иметь равенство коэффициентов трансформации и тождественность групп соединений обмоток (см. §2.3). Первое условие обеспечивает равенство амплитуд вторичных э.д.с. трансформаторов, а второе – совпадение их фаз.

Трансформаторы четных групп не могут быть соединены параллельно с трансформаторами нечетных групп, поскольку в противном случае в контурах их обмоток будут протекать уравнильные токи. Трансформаторы группы 0 (4; 8) допускают параллельное соединение с трансформаторами групп 6 (или 10; 2) в том случае, если пере-

соединить обмотки, поменяв начала и концы их фаз. При этих условиях обмотки группы 6 (или 10; 2) превратятся в обмотки группы 0 (или 4; 8) или наоборот, т.е. будут иметь одну и ту же группу соединений обмоток.

Трансформаторы группы 11 (или 3; 7) допускают параллельное включение с трансформаторами группы 5 (или 9; 1), если соблюдать порядок соединений их зажимов, указанных в табл.3.3.

Таблица 3.3

Группы соединений обмоток	Обмотка ВН			Обмотка НН		
	А	В	С	а	в	с
5	А	В	С	а	в	с
11	А	С	В	с	в	а
	С	В	А	в	а	с
	В	А	С	а	с	в

При параллельном включении трансформаторов с различными коэффициентами трансформации э.д.с. в их вторичных обмотках различны, что вызывает протекание уравнивающих токов в обмотках. Для суждения о возможности и целесообразности параллельного включения трансформаторов с различными коэффициентами трансформации необходимо произвести расчеты.

Если в схеме рис. 3.29 принять, что общий ток нагрузки равен нулю, то для цепи трансформатора α имеем

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}_2 k_{T\alpha} - \dot{I}_{2\alpha} z_{k\alpha} k_{T\alpha}, \quad (3.121)$$

где $k_{T\alpha}$ - коэффициент трансформации трансформатора α , откуда

$$I_{2\alpha} = -\frac{\dot{U}_1}{k_{T\alpha} z_{k\alpha}} - \frac{\dot{U}_2}{z_{k\alpha}}. \quad (3.122)$$

Аналогичные выражения для тока, во вторичных обмоток других трансформаторов могут быть получены при замене индекса α на β и γ . Суммарный ток нагрузки согласно допущению равен нулю

$$-\dot{U}_1 \left(\frac{1}{k_{T\alpha} z_{k\alpha}} + \frac{1}{k_{T\beta} z_{k\beta}} + \frac{1}{k_{T\gamma} z_{k\gamma}} \right) - \dot{U}_2 \left(\frac{1}{z_{k\alpha}} + \frac{1}{z_{k\beta}} + \frac{1}{z_{k\gamma}} \right) = 0, \quad (3.123)$$

где согласно (3.118) последняя скобка равна суммарной проводимости параллельного соединения Y , а сумму в первой скобке обозначим

$$Y_k = \frac{1}{k_{T\alpha} z_{k\alpha}} + \frac{1}{k_{T\beta} z_{k\beta}} + \frac{1}{k_{T\gamma} z_{k\gamma}}. \quad (3.124)$$

При этом соотношение (3.123) преобразуется в следующее

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}_2 \frac{Y}{Y_k}. \quad (3.125)$$

Подставляя последнее соотношение в (3.122), получаем

$$I_{2\alpha} = \frac{\dot{U}_2}{k_{T\alpha} z_{k\alpha}} \frac{Y}{Y_k} - \frac{\dot{U}_2}{z_{k\alpha}} = \frac{\dot{U}_2}{z_{k\alpha}} \left(\frac{Y}{k_{T\alpha} Y_k} - 1 \right). \quad (3.126)$$

Формула (3.126) определяет уравнильный ток в обмотках трансформатора α . Аналогичные формулы получаются для трансформаторов β и γ . Если все коэффициенты трансформации одинаковы $k_{T\alpha} = k_{T\beta} = k_{T\gamma} = k_T$, то согласно (3.118)

$$Y_k = \frac{1}{k_T} \left(\frac{1}{z_{k\alpha}} + \frac{1}{z_{k\beta}} + \frac{1}{z_{k\gamma}} \right) = \frac{Y}{k_T}.$$

При этом все уравнильные токи равны нулю. Например,

$$I_{2\alpha} = \frac{U_2}{z_{k\alpha}} \left(\frac{Y k_T}{k_T Y} - 1 \right) = 0.$$

Формула (3.126) позволяет оценить допустимое различие коэффициентов трансформации при заданном допустимом уравнильном токе по отношению к номинальному току трансформатора

$$I_{2\alpha, \text{ном}} = \frac{P_\alpha}{\sqrt{3} U_2},$$

где P_α - номинальная мощность трансформатора. Следовательно, относительный уравнильный ток равен

$$\frac{I_{2\alpha}}{I_{2\alpha, \text{ном}}} = \frac{\sqrt{3}}{P_\alpha z_{k\alpha}} \left(\frac{Y}{k_{T\alpha} Y_k} - 1 \right).$$

3.9. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов

Необходимо различать два случая работы трансформаторов на несимметричную нагрузку: при отсутствии и при наличии токов нулевой последовательности [7.9]. При соединении обмоток трансформатора Y/Y , Y/Δ , Δ/Y и Δ/Δ составляющая нулевой последовательности образоваться не может. При этом каждую фазу трансформатора при несимметричных нагрузках можно рассматривать независимо как однофазный трансформатор.

Если нейтраль хотя бы одной обмотки трансформатора (первичной или вторичной) присоединена к нулевому проводу или заземлена, в соответствующей обмотке может появиться нулевой ток при несимметричной нагрузке. В этом случае расчет токов и напряжений в обмотках может быть произведен методом симметричных составляющих, включающих составляющие прямой последовательности, обратной и нулевой последовательности. Составляющие нулевой последовательности отличаются тем, что во всех фазах они одинаковы по величине и по фазе и каждая из них равна одной трети от суммарного

нулевого тока \dot{I}_0 , равного

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c, \quad (3.127)$$

где \dot{I}_a , \dot{I}_b и \dot{I}_c - токи в трех фазах соответствующей обмотки, которые можно выразить в виде сумм:

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a.n.0} + \dot{I}_{a.o}; \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b.n.0} + \dot{I}_{b.o}; \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c.n.0} + \dot{I}_{c.o}; \end{aligned} \quad (3.128)$$

где $\dot{I}_{a.n.0}$; $\dot{I}_{b.n.0}$; $\dot{I}_{c.n.0}$ - сумма прямых и обратных составляющих,

$$\dot{I}_{a.o} = \dot{I}_{b.o} = \dot{I}_{c.o} = \frac{1}{3} \dot{I}_0, \quad (3.129)$$

т.к. $\dot{I}_{a.n.0} + \dot{I}_{b.n.0} + \dot{I}_{c.n.0} = 0$.

При отсутствии возможности протекания тока нулевой последовательности в первичной обмотке (не связанной с нагрузкой, на которой система напряжения задана), т.е. при соединении их фазных обмоток звездой без связи нейтрали с нулевым проводом или с землей, в первичной обмотке потекут токи

$$\dot{I}_A = -k_T \dot{I}_{a.n.0}; \quad \dot{I}_B = -k_T \dot{I}_{b.n.0}; \quad \dot{I}_C = -k_T \dot{I}_{c.n.0}, \quad (3.130)$$

сумма которых равна нулю

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

В этом случае, когда в первичных обмотках трансформатора могут протекать токи нулевой последовательности (при соединении обмоток в треугольник либо при заземлении или занулении нейтрали) результирующие токи в фазах равны.

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A\phi} &= -k_T \left(\dot{I}_{a.n.0} + \dot{I}_{a.o} \right), \\ \dot{I}_{B\phi} &= -k_T \left(\dot{I}_{b.n.0} + \dot{I}_{b.o} \right), \\ \dot{I}_{C\phi} &= -k_T \left(\dot{I}_{c.n.0} + \dot{I}_{c.o} \right). \end{aligned} \quad (3.131)$$

При этом сумма напряжений на вторичных обмотках трансформатора

$$\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = \dot{I}_0 z_{k.3}, \quad (3.132)$$

Наличие составляющих тока нулевой последовательности в первичных и вторичных обмотках определяет дополнительный магнитный поток в стержнях трансформатора с соответствующим сдвигом фаз по отношению к потоку намагничивания. Если этот поток совпадает по фазе с одним из фазных потоков намагничивания, то последний уменьшается, т. к. потокосцепление в обмотке с заданным напряжением измениться не может. Соответственно снизится напряжение на вторичной обмотке трансформатора, связанной с нагрузкой. Напротив, если магнитный поток нулевой последовательности противоположен потоку намагничивания какой-либо фазы, поток намагничивания в ней увеличивается, что приводит к увеличению напряжения на соответствующей фазе. Следовательно, ток нулевой последовательности приводит к различному изменению напряжения трех фаз вторичной обмотки

$$\begin{aligned}
 U_{2a} &= \frac{U_{1,a}}{k_T} + I_{2,a,n,0} x_{k,3} \sin \varphi_a + \frac{1}{3} I_{2,0} x_{k,3} \sin \varphi_{a,0}, \\
 U_{2b} &= \frac{U_{1,b}}{k_T} + I_{2,b,n,0} x_{k,3} \sin \varphi_b + \frac{1}{3} I_{2,0} x_{k,3} \sin \varphi_{b,0}, \\
 U_{2c} &= \frac{U_{1,c}}{k_T} + I_{2,c,n,0} x_{k,3} \sin \varphi_c + \frac{1}{3} I_{2,0} x_{k,3} \sin \varphi_{c,0}.
 \end{aligned} \tag{3.133}$$

где $\varphi_a; \varphi_b; \varphi_c$ - углы сдвига суммы составляющих прямой и обратной последовательностей по отношению к соответствующему напряжению $\left(U_{1,a}/k_T; U_{1,b}/k_T; U_{1,c}/k_T \right)$; $\varphi_{a,0}; \varphi_{b,0}$ и $\varphi_{c,0}$ - углы сдвига тока нулевой последовательности по отношению к соответствующему напряжению $\left(U_{1,a}/k_T; U_{1,b}/k_T; U_{1,c}/k_T \right)$. При этом поток намагничивания в трех фазах равен (см. §3.2)

$$\begin{aligned}
 \Phi_a &= \Phi_0 \left[1 + \frac{U_{k,3} \%}{100\%} \left(\frac{I_{1,a}}{I_{1,ном}} \sin \varphi_a + \frac{I_{1,0}}{3I_{1,ном}} \sin \varphi_{a,0} \right) \right], \\
 \Phi_b &= \Phi_0 \left[1 + \frac{U_{k,3} \%}{100\%} \left(\frac{I_{1,b}}{I_{1,ном}} \sin \varphi_b + \frac{I_{1,0}}{3I_{1,ном}} \sin \varphi_{b,0} \right) \right], \\
 \Phi_c &= \Phi_0 \left[1 + \frac{U_{k,3} \%}{100\%} \left(\frac{I_{1,c}}{I_{1,ном}} \sin \varphi_c + \frac{I_{1,0}}{3I_{1,ном}} \sin \varphi_{c,0} \right) \right].
 \end{aligned} \tag{3.134}$$

и суммарный поток в стержне повышающего трансформатора.

$$\begin{aligned}
 \Phi_{н,a} &= \Phi_0 \left\{ 1 + \frac{U_{k,3} \%}{100\%} \left[1 - \frac{S_{ЭК}}{S_{ЭФ}} \left(\frac{I_{1,a}}{I_{1,ном}} \sin \varphi_a + \frac{I_{1,0}}{3I_{1,ном}} \sin \varphi_{a,0} \right) \right] \right\}, \\
 \Phi_{н,b} &= \Phi_0 \left\{ 1 + \frac{U_{k,3} \%}{100\%} \left[1 - \frac{S_{ЭК}}{S_{ЭФ}} \left(\frac{I_{1,b}}{I_{1,ном}} \sin \varphi_b + \frac{I_{1,0}}{3I_{1,ном}} \sin \varphi_{b,0} \right) \right] \right\}, \\
 \Phi_{н,c} &= \Phi_0 \left\{ 1 + \frac{U_{k,3} \%}{100\%} \left[1 - \frac{S_{ЭК}}{S_{ЭФ}} \left(\frac{I_{1,c}}{I_{1,ном}} \sin \varphi_c + \frac{I_{1,0}}{3I_{1,ном}} \sin \varphi_{c,0} \right) \right] \right\}.
 \end{aligned} \tag{3.135}$$

При большом токе нулевой последовательности индукция в стержне одной из фаз может значительно увеличиться по сравнению с индукцией холостого хода со всеми вытекающими последствиями. Поэтому ток нулевой последовательности должен быть ограничен.

При невозможности возникновения токов нулевой последовательности в первичных обмотках возбуждаемый ток нулевой последовательности во вторичных обмотках однофазных трансформаторов магнитный поток полностью замыкается по магнитопроводу (поскольку не вытесняется в межобмоточное пространство). Так как ток нулевой последовательности может быть значительно больше тока намагничивания, он может значительно увеличить индукцию в магнитопроводе со всеми вытекающими нежелательными последствиями. Для исключения этого явления в таких трансформаторах предусматривают компенсационную обмотку, соединенную в треугольник, где и замыкаются индуцируемые токи нулевой последовательности. Эти третичные обмотки могут быть также использованы в качестве нагрузочных.

В трехстержневых трехфазных трансформаторах (рис.3.20) потоки трех фаз нулевой последовательности не могут замкнуться по магнитопроводу, т.к. во всех стержнях их направление одинаково. Поэтому они замыкаются вне магнитопровода, прибавляясь к потокам рассеяния. Поскольку этот поток не ограничен межобмоточным пространством магнитное сопротивление этому потоку меньше, чем сопротивление потоку к.з., но значительно больше, чем сопротивление потоку намагничивания по магнитопроводу. В результате полное сопротивление нулевой последовательности оказывается больше, чем полное сопротивление к.з. трансформатора в режиме опыта к.з., но значительно меньше полного сопротивления холостого хода трансформатора. Трудности учета всех конструктивных элементов трансформатора, по которым замыкается магнитный поток, определяют необходимость экспериментального измерения z_0 в этом случае при последовательном соединении всех вторичных обмоток.

В случае бронестержневого трехфазного трансформатора (рис. 2.16) и отсутствии тока нулевой последовательности в первичной обмотке магнитный поток нулевой последовательности полностью циркулирует в магнитопроводе, замыкаясь по боковым ярам. Малое сопротивление магнитному потоку определяет возможность насыщения магнитопровода со всеми вытекающими негативными последствиями. Поэтому и в этом случае необходимо обеспечить возможность протекания нулевого тока в первичных обмотках либо путем зануления или заземления нейтрали обмоток, либо путем устройства компенсационной обмотки, соединенной в треугольник. В этом случае индуцируемые в первичной или компенсационной обмотке токи нулевой последовательности исключают возможность замыкания магнитного потока нулевой последовательности по магнитопроводу и ограничивают его сечение вне магнитопровода пространством между первичной (либо

компенсационной) и вторичной обмотками. При этом сопротивление магнитному потоку оказывается достаточно большим и, соответственно, индуктивное сопротивление нулевой последовательности достаточно малым, чтобы ограничить негативное влияние магнитного потока нулевой последовательности на характеристики трансформатора в соответствии с соотношениями (3.133), (3.134), (3.135). Следует иметь в виду, что при использовании компенсационной обмотки для обеспечения канализации магнитного потока в межобмоточном пространстве сопротивление короткого замыкания для тока нулевой последовательности будет отличаться от сопротивления к.з. прямой и обратной последовательности. Поэтому в этом случае

$$\left. \begin{aligned} U_{2,a} &= \frac{U_{1,a}}{\kappa_T} + I_{2,a,n.0} x_{к.з} \sin \varphi_a + \frac{1}{3} I_{2,0} x_{к.з.0} \sin \varphi_{a,0}, \\ U_{2,b} &= \frac{U_{1,b}}{\kappa_T} + I_{2,a,n.0} x_{к.з} \sin \varphi_b + \frac{1}{3} I_{2,0} x_{к.з.0} \sin \varphi_{b,0}, \\ U_{2,c} &= \frac{U_{1,c}}{\kappa_T} + I_{2,c,n.0} x_{к.з} \sin \varphi_c + \frac{1}{3} I_{2,0} x_{к.з.0} \sin \varphi_{c,0}. \end{aligned} \right\} \quad (3.136)$$

Если компенсационная обмотка расположена между первичной и вторичной обмотками, то $x_{к.з.0} < x_{к.з.}$; если КО расположена непосредственно вокруг стержня, то $x_{к.з.0} > x_{к.з.}$.

В соответствии с этими отличиями системы уравнений (3.136) от (3.133) изменяются и уравнения систем (3.134) и (3.135), т.к. в рассматриваемом случае $U_{к.з.0}$ для токов нулевой последовательности не равны $U_{к.з.}$ для токов прямой и обратной последовательностей.

В любом варианте расположения компенсационной (третичной) обмотки $x_{к.з.0}$ может быть рассчитано по формуле, аналогичной (3.36)

$$\begin{aligned} x_{к.з.0} &= \frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot \pi N_2^2}{\ell_0} d_{23} \left(a_{23} + \frac{a_2 + a_3}{3} \right) = \\ &= 0,789 \cdot 10^{-5} f \cdot N_2^2 d_{23} \left(a_{23} + \frac{a_2 + a_3}{3} \right), \end{aligned} \quad (3.137)$$

где d_{23} – средний диаметр зазора между вторичной и третичной обмотками, a_{23} – его ширина, a_2 и a_3 – толщины вторичной и третичной обмоток, N_2 – число витков вторичной обмотки, замкнутой на несимметричную нагрузку.

ГЛАВА 4. АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

4.1. Работа трансформаторов при коротких замыканиях в электрических сетях

Отличие условий работы трансформаторов при коротком замыкании в сети от режима опыта к.з. заключается в том, что в режиме опыта к.з. ток в обмотках трансформатора ограничивается номинальным током благодаря снижению напряжения на обмотке, связанной с источником напряжения. В реальных условиях к.з. в сети за трансформатором ток ограничивается только сопротивлением трансформатора и источника напряжения (см. §1.3). В связи с этим ток в трансформаторе превосходит номинальный ток в несколько раз (см. §1.3), что существенно изменяет распределение магнитного потока в трансформаторе. В соответствии с изложенным в гл.3 активным сопротивлением трансформатора можно пренебречь. При этом в наиболее тяжелом режиме к.з. на выводах повышающего трансформатора напряжение на наружной обмотке ВН равно нулю. Это означает, что поток намагничивания в магнитопроводе отсутствует, как и в опыте к.з., рассмотренном в § 3.1. Приложенное к первичной обмотке НН трансформатора напряжение полностью уравнивается э.д.с., создаваемой рабочим магнитным потоком, охватывающим только внутреннюю первичную обмотку НН, к которой приложено напряжение от источника. Установившееся значение напряжения на этой обмотке в режиме к.з.

$$U_{1.к.з.} = I_{1.к.з.} \cdot x_{к.з.}, \quad (4.1)$$

причем установившееся значение тока к.з. определяется формулой (1.24) и в пределе при $x_c = 0$ - формулой (1.25).

При этом эффективный магнитный поток, сцепляющийся со всеми витками обмотки НН, определяется соотношением

$$\sqrt{2}U_{1.к.з.} = 2\pi \cdot f \cdot N_1 \Phi_{к.з.эф} = \sqrt{2}I_{1.к.з.} x_{к.з.} \quad (4.2)$$

и равен

$$\Phi_{к.з.эф} = \frac{\sqrt{2}U_{1.к.з.}}{2\pi \cdot f \cdot N_1} = \frac{\sqrt{2}I_{1.к.з.} x_{к.з.}}{2\pi \cdot f \cdot N_1}, \quad (4.3)$$

а полный магнитный поток в стержне магнитопровода с учетом части потока, частично охватывающего витки первичной обмотки

$$\Phi_{к.з.} = \Phi_{к.з.эф} \frac{S_{эк}}{S_{эф}} = \frac{\sqrt{2}U_{1.к.з}}{2\pi \cdot f \cdot N_1} \frac{S_{эк}}{S_{эф}} = \frac{\sqrt{2}I_{1.к.з} \cdot x_{к.з.}}{2\pi \cdot f \cdot N_1} \frac{S_{эк}}{S_{эф}}. \quad (4.4)$$

В частности для трансформаторов небольшой мощности (при $x_c = 0$), $U_{1.к.з.} = U_{1.ном}$

$$\Phi_{к.з.} = \frac{\sqrt{2}U_{1.ном}}{2\pi \cdot f \cdot N_1} \frac{S_{эк}}{S_{эф}} = \Phi_0 \frac{S_{эк}}{S_{эф}}. \quad (4.5)$$

Таким образом, магнитный поток в магнитопроводе в установившемся режиме к.з. может превышать магнитный поток в режиме холостого хода трансформатора Φ_0 в отношении $S_{эк}/S_{эф}$. Это отношение может достигать 1.25 и более в зависимости от конструкции трансформатора.

Соответственно в установившемся режиме к.з. магнитный поток может на 20% и более превышать магнитный поток холостого хода. Если сечение сердечника выбрано исходя из допустимой индукции $B_0 = 1,70 \text{ Тл}$, то в режиме к.з. индукция увеличивается до $B_{к.з.} = 1,70 \cdot 1,2 = 2,04 \text{ Тл}$ и более. При такой индукции происходит насыщение магнитопровода и индуктивное сопротивление трансформатора уменьшается. Соответственно увеличивается ток к.з. трансформатора.

Для мощных трансформаторов при расчете тока к.з. учитывается индуктивное сопротивление системы. При этом магнитный поток в магнитопроводе равен (см. формулу (1.24)).

$$\Phi_{к.з.} = \Phi_0 \frac{1}{1 + \frac{S_{ном}}{S_{с.к.з.}} \frac{100\%}{U_{к.з.} \%}} \frac{F_{эк}}{F_{эф}}. \quad (4.6)$$

Например, для трансформатора 500 кВ мощностью 500 МВА с напряжением к.з. 12% и $S_{с.к.з.} = 50000 \text{ Мвар}$ (см. табл.1.1)

$$\Phi_{к.з.} = \Phi_0 \frac{1}{1 + \frac{500}{50000} \frac{100}{12}} 1,2 = 1,11\Phi_0.$$

В переходном режиме при возникновении к.з. магнитный поток превосходит его максимальное значение в установившемся режиме в соответствии с изменением тока (см. формулу (1.27) и рис. 1.9)

$$\begin{aligned} \Phi_{к.з.}(t) &= \frac{i(t)N_1}{R_\mu} = i(t)N_1 \frac{\mu_0 F_{эк}}{\ell_0} = \\ &= \frac{N_1 U_m \mu_0 F_{эк}}{x_T \left(1 + \frac{x_c}{x_T}\right) \ell_0} \left(e^{-\frac{\omega r}{x_T + x_c} t} - \cos \omega t \right). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Максимум магнитного потока в режиме к.з. достигается вблизи момента времени $t = \pi/\omega$, когда $\cos \omega t = -1$ и множитель в скобках имеет максимальное значение

$$e^{-\frac{\omega r}{x_T + x_c} t} + 1 \approx 1,94,$$

т.е. магнитный поток в переходном режиме может превосходить амплитуду магнитного потока установившегося режима к.з. в 1,94 раза. При этом магнитная индукция возрастает до значения

$$B_{max} = 1,11 \cdot 1,94 \cdot B_0 \geq 3,6 \text{ Тл}.$$

При такой индукции магнитопровод оказывается в состоянии глубокого насыщения и его магнитная проницаемость равна магнитной проницаемости вакуума.

Следует отметить, что такое значительное увеличение магнитного потока сверх его нормального уровня при $B_0 = 1,7$ Тл не приводит к повышению напряжения на трансформаторе.

Действительно, напряжение на входе трансформатора согласно (4.7)

$$\begin{aligned} U_i(t) &= \frac{N_1 F_{э\phi}}{F_{эк}} \frac{d\Phi_{к.з.}(t)}{dt} = \\ &= \frac{\mu_0 N_1^2 U_m F_{эк} \omega}{x_T \left(1 + \frac{x_c}{x_T}\right) \ell_0} \left(\sin \omega t - \frac{r}{x_T + x_c} e^{-\frac{\omega r}{x_T + x_c} t} \right) = \\ &= \frac{U_m}{1 + \frac{x_c}{x_T}} \left(\sin \omega t - \frac{r}{x_T + x_c} e^{-\frac{\omega r}{x_T + x_c} t} \right) \approx \frac{U_m}{1 + \frac{x_c}{x_T}} \sin \omega t, \end{aligned} \quad (4.8)$$

где подставлено выражение для x_T согласно (3.36). Это означает, что напряжение на входе трансформатора в точности соответствует схеме рис. 1.9, поскольку увеличение максимального значения магнитного

потока определяется наличием аperiodической составляющей потока, изменяющейся очень медленно.

Однако, увеличение магнитной индукции в магнитопроводе до 2 Тл и более приводит к значительному увеличению сопротивления магнитному потоку. При этом суммарное сопротивление магнитному потоку (в стержне и в межобмоточном пространстве) становится равным

$$R_m \approx \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\ell_0}{F'_{\text{эк}}} + \frac{\ell_0^4}{\pi d_{\text{вн}}^2} \right), \quad (4.9)$$

где $d_{\text{вн}}$ - внутренний диаметр внутренней обмотки (НН), $\pi d_{\text{вн}}^2/4$ - площадь магнитного потока внутри обмотки НН. Увеличение длины пути магнитного потока по пути с малой магнитной проницаемостью приводит к уменьшению индуктивного сопротивления трансформатора по сравнению с измеренным в опыте к.з. примерно вдвое, что в свою очередь приводит к увеличению тока короткого замыкания.

Учет уменьшения индуктивного сопротивления трансформатора в результате насыщения магнитопровода и уменьшения индуктивного сопротивления трансформатора может быть произведен в соответствии с кривой намагничивания трансформаторной стали (см. рис. 4.1) численным методом.

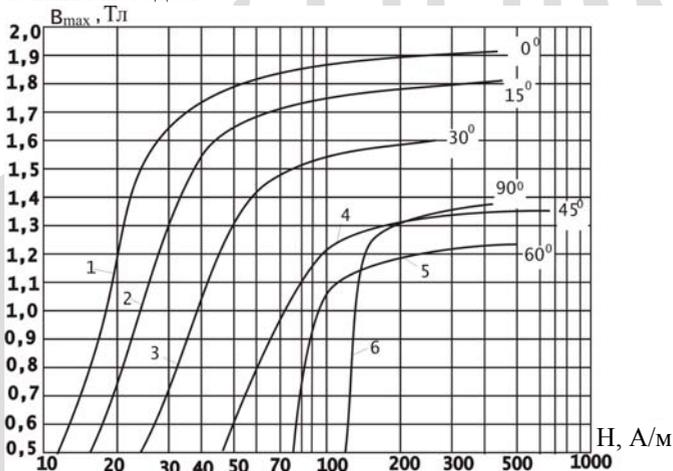


Рис.4.1. Кривая намагничивания электротехнической стали 3407 толщиной 0,3 мм при напряжении промышленной частоты и при различных температурах: 0°C (кривая 1); 15°C(кривая 2); 30°C (кривая 3); 45°C (кривая 4), 60°C (кривая 5); 90°C (кривая 6)

Однако приближенно учет насыщения магнитопровода может быть выполнен аналитически согласно схеме рис. 4.2 при допущении, что при токе в трансформаторе меньшем амплитуды установившегося тока к.з. $i(t) \leq \sqrt{2}I_{к.з.у}$ индуктивное сопротивление трансформатора равно индуктивному сопротивлению в опыте к.з..

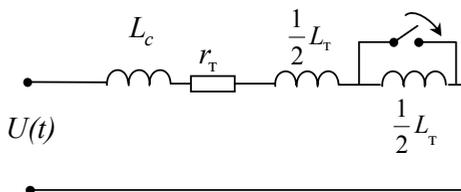


Рис.4.2. Эквивалентная схема цепи при коротком замыкании на выходе трансформатора

Когда мгновенное значение тока к.з. достигает амплитуды установившегося тока к.з.,

$$I_{к.з.у.m} = \frac{U_m}{\sqrt{(x_c + x_T)^2 r_T^2}} \approx \frac{U_m}{x_c + x_T} = \frac{U_m}{x_T \left(1 + \frac{x_c}{x_T}\right)}, \quad (4.10)$$

индуктивное сопротивление трансформатора уменьшается вдвое (рис.4.2).

Согласно формуле (1.27) мгновенное значение тока к.з. достигает амплитуды установившегося тока к.з., когда

$$e^{-\frac{\omega_T}{x_T + x_c} t} - \cos \omega t_0 = 1. \quad (4.11)$$

Это уравнение с одним неизвестным решается путем разложения в степенные ряды трансцендентных функций. Для упрощения решения задачи с небольшой погрешностью можно принять $\omega t_0 = \frac{\pi}{2}$, (см. рис. 1.9). При этом синусоидальная составляющая тока к.з. равна нулю, а мгновенное значение тока к.з. определяется его аperiодической составляющей (см. формулу (1.27) и рис. 1.9)

$$i_{к.з.} \left(\omega t_0 = \frac{\pi}{2} \right) = \frac{U_m}{\sqrt{(x_c + x_T)^2 + r_T^2}} e^{-\frac{\pi \cdot r_T}{2(x_T + x_c)}}. \quad (4.12)$$

Установившееся значение тока к.з. (после замыкания ключа в схеме рис. 4.2) равно

$$\begin{aligned} i'_{к.з.уст}(t) &= \frac{U_m}{\sqrt{\left(x_c + \frac{x_T}{2}\right)^2 + r_T^2}} \sin \left(\omega t - \operatorname{arctg} \frac{x_c + \frac{x_T}{2}}{r_T} \right) \approx \\ &\approx \frac{U_m}{x_c + \frac{x_T}{2}} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{U_m}{x_c + \frac{x_T}{2}} \cos \omega t. \end{aligned} \quad (4.13)$$

В момент замыкания ключа $\left(\omega t_0 = \frac{\pi}{2} \right)$ ток $i_{к.з.у}(0) = 0$ (см. рис.4.3).

Поэтому переходная составляющая последующего режима определяется током предшествующего режима к.з. согласно (1.27). В результате суммарный ток к.з. последующего режима равен

$$\begin{aligned} i_{к.з.}(t) &\approx \frac{U_m}{x_c + x_T} e^{-\frac{\omega r_T(t-t_0)}{x_c + \frac{1}{2}x_T}} + \frac{U_m}{x_c + \frac{x_T}{2}} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \approx \\ &\approx \frac{U_m}{x_c + x_T} e^{-\frac{\omega r_T(t-t_0)}{x_c + \frac{1}{2}x_T}} - \frac{U_m}{x_c + x_T} \cos \omega t. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Максимум тока к.з. приблизительно соответствует времени $t = \pi/\omega$, когда $t - t_0 = \frac{\pi}{2\omega}$ (см. рис.4.3)

$$I_{к.з.макс} = U_m \left[\frac{e^{-\frac{r_T \cdot \pi}{2(x_c + 0,5x_T)}}}{x_c + x_T} + \frac{1}{x_c + \frac{x_T}{2}} \right]. \quad (4.15)$$

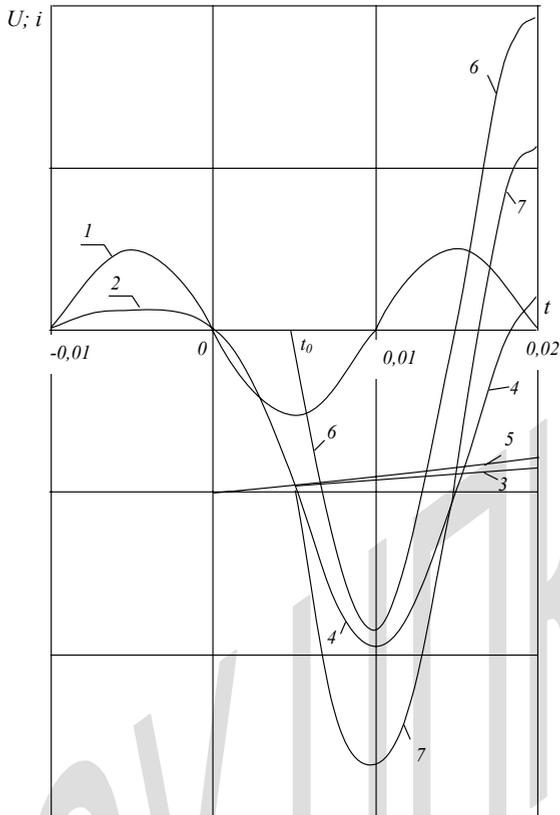


Рис.4.3. Иллюстрация процесса короткого замыкания на выводах трансформатора с учетом насыщения магнитопровода: 1 – напряжение сети, 2 – ток нормального режима в трансформаторе; 3 – аperiodическая составляющая тока к.з. без учета насыщения магнитопровода, 4 – ток к.з. без учета насыщения магнитопровода, 5 – аperiodическая составляющая тока к.з с учетом насыщения магнитопровода, 6 – установившийся ток к.з с учетом насыщения магнитопровода, 7 – ток к.з с учетом насыщения магнитопровода

Отношение максимумов тока к.з. с учетом насыщения магнитопровода и без его учета согласно (1.24), (1.28), (4.14), (4.15) равно

$$\begin{aligned}
 \frac{I_{к.з. \max}^1}{I_{к.з. \max}} &= \frac{e^{-\frac{r_T \pi}{2x_c + x_T}} + \frac{1}{x_c + 0,5x_T}}{\frac{1}{x_c + x_T} \left(e^{-\frac{r_T \pi}{2(x_c + x_T)}} + 1 \right)} = \\
 &= \frac{e^{-\frac{r_T \pi}{2x_c + x_T}} + \frac{x_c + x_T}{x_c + 0,5x_T}}{e^{-\frac{r_T \pi}{2(x_c + x_T)}} + 1} = \frac{e^{-\frac{r_T \pi}{2x_T \left(1 + \frac{x_c}{x_T} \right)}} + 2 \frac{1 + \frac{x_c}{x_T}}{1 + 2 \frac{x_c}{x_T}}}{1 + e^{-\frac{r_T \pi}{2x_T \left(1 + \frac{x_c}{x_T} \right)}}} = \\
 &= \frac{e^{-\frac{r_T \pi}{x_T \left(1 + 2 \frac{x_c}{x_T} \right)}} + 2 \frac{1 + \frac{S_{T.ном}}{S_{с.к.з.}} \frac{100\%}{U_{к.з.} \%}}{1 + \frac{2S_{T.ном}}{S_{с.к.з.}} \frac{100\%}{U_{к.з.} \%}}}{1 + e^{-\frac{r_T \pi}{2x_T \left(1 + \frac{x_c}{x_T} \right)}}}. \quad (4.16)
 \end{aligned}$$

Например, для трансформатора 525 кВ мощностью 1000 МВА и напряжением короткого замыкания $U_{к.з.} \% = 12\%$ активное сопротивление согласно (1.31) при $\Delta P_k = 950$ кВт и номинальном токе $I_{ном} = 1100$ А равно

$$r_{к.з.} = \frac{950 \cdot 10^3}{1100^2} = 0,785 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление $z_{к.з.}$ согласно (1.30) равно

$$z_{к.з.} = \frac{U_{к.з.} \% U_{ф.ном}}{100 I_{ном}} = \frac{0,12 \cdot 525 \cdot 10^3}{1100 \sqrt{3}} = 33 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление к.з. согласно (1.33)

$$x_{к.з.} = \sqrt{33^2 - 0,785^2} \approx 33 \text{ Ом},$$

и индуктивное сопротивление сети

$$x_c = x_T \frac{S_{T.ном}}{S_c} \frac{100\%}{U_c \%} = 33 \frac{1000}{50000} \frac{100\%}{12\%} = 5,5 \text{ Ом}.$$

Подставляя полученные значения в формулу (4.16), с учетом мощности к.з. системы 50000 МВА получаем отношение

$$\frac{I'_{к.з. \max}}{I_{к.з. \max}} = \frac{e^{-\frac{0,785\pi}{33(1+0,33)}} + 2 \frac{1 + \frac{1000}{50000} \frac{100}{12}}{1 + \frac{2 \cdot 1000}{50000} \frac{100}{12}}}{1 + e^{-\frac{0,785\pi}{2 \cdot 33 \cdot 1,165}}} = 1,37.$$

Таким образом, действительный ток короткого замыкания трансформатора в эксплуатации превосходит ток к.з., определенный по параметрам опыта к.з., примерно на 37 %.

При коротком замыкании обмотки НН понижающего трансформатора поток намагничивания, охватывающий обе обмотки, отсутствует, а рабочий магнитный поток замыкается по боковым ярмам, также перегружая их до состояния насыщения. В результате сопротивление магнитному потоку увеличивается примерно вдвое, а индуктивное сопротивление трансформатора уменьшается примерно вдвое, что приводит к тем же последствиям, как и для повышающего трансформатора.

Изложенное позволяет сделать вывод о том, что при расчетах тока короткого замыкания, воздействующего на обмотки трансформатора, обязателен учет насыщения магнитопровода.

При коротких замыканиях в сети за выводами повышающих автотрансформаторов, либо непосредственно на их выводах справедливы все приведенные выше соотношения для повышающих трансформаторов.

При коротких замыканиях на выводах понижающих автотрансформаторов ситуация значительно осложняется по сравнению с трансформаторами, поскольку, в этом случае часть витков ВН, совмещенная с обмоткой НН, закорачивается и под напряжением оказывается оставшаяся часть витков N_2 . Поскольку напряжение на стороне ВН автотрансформатора при к.з. изменяется незначительно (см. §§1.3 и 4.1), это означает, что напряжение на отдельной части обмотки резко увеличивается, а не уменьшается, как у трансформаторов. Поэтому насыщение магнитопровода у понижающих автотрансформаторов начинается раньше, чем у трансформаторов, что приводит к большему увеличению тока к.з., чем у трансформаторов. Момент перехода магнитопровода в насыщенное состояние определяется расчетом, аналогичным приведенному выше для трансформатора. При этом в случае автотрансформатора время перехода магнитопровода в насыщенное состояние $t_0 < \frac{\pi}{2\omega}$.

4.2. Электродинамические усилия в трансформаторах при коротких замыканиях

Взаимодействие магнитного поля, создаваемого током короткого замыкания, с током в витках обмотки создает механические силы, растягивающие внешнюю обмотку и сжимающие внутреннюю обмотку. Средняя индукция в каждой обмотке определяется всеми ампервитками обмоток (см. формулу (3.18))

$$B_{cp} = \frac{1}{2} \frac{\mu_0}{\ell_0} (I_{yd} N) = \frac{1}{2} \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\ell_0} (I_{yd} N) = \frac{2\pi \cdot 10^{-7}}{\ell_0} (I_{yd} N) \quad (4.17)$$

Радиальная сила, действующая на каждый виток обмоток, равна произведению средней индукции в обмотке на ток в витке и на среднюю длину витка πd_{cp}

$$F_p = B_{cp} \cdot I_{yd} \cdot \pi d_{cp} = \frac{2\pi \cdot 10^{-7}}{\ell_0} I_{yd}^2 N \pi d_{cp} \quad (4.18)$$

Как растягивающая радиальная сила для наружной обмотки, так и сжимающая радиальная сила для внутренней обмотки равномерно распределены по окружности обеих обмоток (см. рис. 4.4).

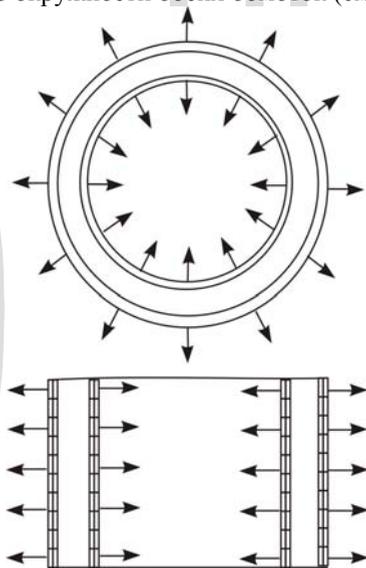


Рис.4.4. Распределение радиальных сил во внешней и внутренней обмотках трансформатора

Сила, действующая на поперечное сечение витка, равна проекции всех радиальных сил на диаметр витка, деленной на 2, поскольку воспринимают это усилие два сечения витка

$$F_{\Pi} = \frac{F_p}{2\pi} = \frac{\pi \cdot 10^{-7}}{\ell_0} I_{y\delta}^2 N d_{cp}. \quad (4.19)$$

Следовательно, механическое напряжение в сечении витка каждой обмотки равно

$$\sigma = \frac{F_{\Pi}}{\Pi} = \frac{J_{ном}}{I_{ном}} \frac{\pi \cdot 10^{-7}}{\ell_0} I_{y\delta}^2 N d_{cp} = \pi \cdot 10^{-7} \frac{I_{y\delta}}{I_{ном}} (I_{y\delta} N) \frac{d_{cp}}{\ell_0} J_{ном}, \quad (4.20)$$

где подставлено сечение витка $\Pi = I_{ном} / J_{ном}$, $I_{ном}$ и $J_{ном}$ - номинальный ток в обмотке и плотность тока при этом.

Отношение $I_{y\delta} / I_{ном}$ одинаково для обеих обмоток, как и произведение $I_{y\delta} N$. Поэтому различие механических напряжений в витках обмоток определяется различием средних их диаметров и плотности тока в обмотках. Однако, во многих случаях произведение $d_{cp} J_{ном}$ в обеих обмотках принимается одинаковым. При этом механические напряжения в сечениях витков оказываются одинаковыми.

Допустимое сжимающее механическое напряжение $\sigma_{сж.доп}$ в проводах изменяется при изменении температуры и зависит от материала проводов (см. табл. 4.1)

Таблица 4.1

Температура $^{\circ}\text{C}$	Материал $\sigma_{сж.доп}$, МПа	
	медь	алюминий
105	73	27
140	70	25
200	63	22
250	57	-

В качестве примера оценим напряжение в обмотках однофазного трансформатора на напряжение 525 кВ мощностью 333 МВА с напряжением короткого замыкания 12% с номинальным напряжением обмотки НН 15,57 кВ, с потерями холостого хода $\Delta P_{xx} = 200$ кВт и потерями в опыте к.з. $\Delta P_{к.з} = 950$ кВт.

Отношение $(x_c + x_T)/r_T = 49$, что определяет ударный коэффициент согласно табл. 1.2 $k_{y0} = 1,8$, а с учетом поправки на насыщение магнитопровода $k_{y0} = 2,5$.

Согласно табл. 1.1. мощность к.з. сети составляет 50000 МВА. Поэтому установившийся ток к.з. при расчете механических сил, воздействующих на обмотку ВН согласно (1.24) составит

$$I_{к.з.ВН} = \frac{100 \cdot 1100}{12 + \frac{100 \cdot 1000}{50000}} = 7857 \text{ А},$$

а ударный ток к.з.

$$I_{к.з.удВН} = \sqrt{2} \cdot 2,5 \cdot 7857 = 27800 \text{ А}.$$

Соответственно установившийся ток к.з. в обмотке НН составит

$$I_{к.з.НН} = 7857 \cdot k_T = 7857 \frac{525}{\sqrt{3} \cdot 15,75} = 151,2 \text{ кА}$$

и ударный ток к.з. в обмотке НН

$$I_{к.з.удНН} = \sqrt{2} \cdot 2,5 \cdot 151,2 = 534,57 \text{ кА}$$

Для трансформаторов указанных выше параметров число витков обмотки ВН $N = 350$, средний диаметр обмотки ВН $d_{cp} = 2,71 \text{ м}$ и для обмотки НН $N = 18$; $d_{cp} = 2,71 \text{ м}$.

С учетом приведенных данных сжимающие механические усилия в обмотке НН согласно формуле (4.20) при $k_T = 19,24$

$$\sigma_{сж} = \pi \cdot 10^{-7} \frac{534570}{19,24 \cdot 1100} (534570 \cdot 18) \frac{2,11}{2,38} \cdot 2 \cdot 10^6 = 135 \text{ МПа},$$

что значительно превышает допустимое напряжение согласно табл.4.1.

Интересно отметить, что при ударном токе к.з.

$I_{к.з.уд} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 151,2 \text{ кА} = 384,9 \text{ кА}$ согласно табл.1.2 максимальное сжимающее усилие составляет

$$\sigma_{сж} = \pi \cdot 10^{-7} \frac{384900}{19,24 \cdot 1100} (384900 \cdot 18) \frac{2,11}{2,38} \cdot 2 \cdot 10^6 = 70 \text{ МПа},$$

что не превышает допустимого значения согласно табл.4.1. Таким образом, учет насыщения магнитопровода при к.з. существенно изменяет условия работы трансформатора.

Растягивающее напряжение в обмотке ВН

$$\sigma_{раст} = \pi \cdot 10^{-7} \frac{27800}{1100} (27800 \cdot 350) \frac{2,71}{2,38} \cdot 2 \cdot 10^6 = 176 \text{ МПа}$$

при разрушающем напряжении $\sigma_{раст.р} = 372 \text{ МПа}$, что вполне допустимо.

4.3. Работа трансформатора при отключении одной фазы

При отключении однофазного короткого замыкания на линии электропередачи возможна передача электроэнергии по ней в течение времени, необходимого для восстановления фазы, по двум фазам. Пусть первичная обмотка трансформатора (НН) включена треугольником, а вторичная (ВН) – звездой с заземленной нейтралью (рис.4.5).

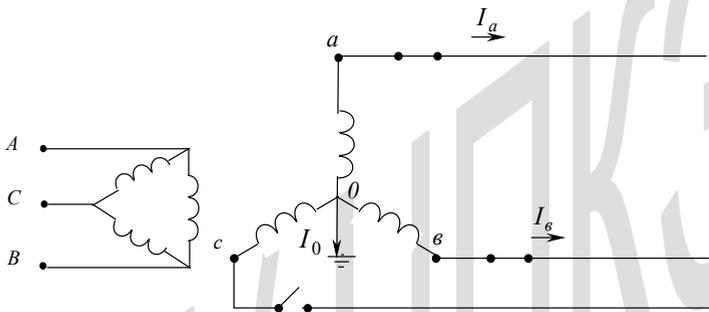


Рис.4.5. Схема работы повышающего трансформатора при отсутствии одной фазы

В этом случае симметричная система токов на стороне высокого напряжения обеспечивается током в земле (нулевым током, см. рис. 4.6), равным сумме токов в обмотках a и ϵ

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_\epsilon. \quad (4.21)$$

Этот ток равен по величине токам в неотключенных фазах.

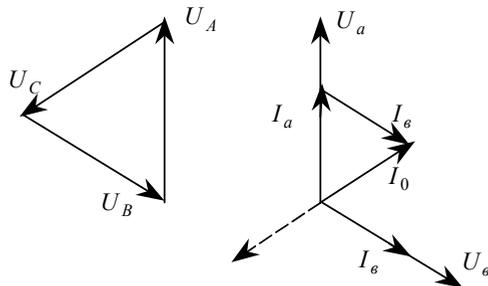


Рис.4.6. Векторная диаграмма напряжений и токов повышающего трансформатора при отсутствии нагрузки на одной фазе

Согласно методу симметричных составляющих любая несимметричная система напряжений или токов может быть разложена на две симметричные системы прямой и обратной последовательности и систему нулевой последовательности (соответствующие вектора во всех трех фазах одинаковы).

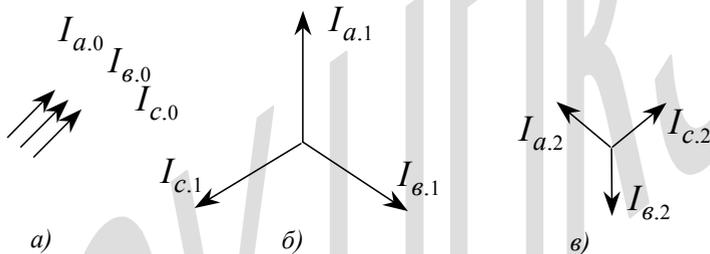


Рис.4.7. Разложение диаграммы токов на симметричные составляющие: а – нулевой последовательности, б – прямой последовательности, в – обратной последовательности.

В рассматриваемом случае имеем несимметричную систему токов в двух фазах. Совмещая ток в фазе «а» с вещественной осью, получаем диаграмму токов во вторичной обмотке трансформатора (которую считаем заданной), изображенную на рис. 4.7, в которой ток в фазе «в»

$$\dot{I}_\epsilon = -I \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right).$$

Составляющая нулевой последовательности в фазе «а» равна

$$\dot{I}_{a,0} = \frac{1}{3} \left(\dot{I}_a + \dot{I}_\epsilon \right) = \frac{1}{3} I \left(1 - \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right). \quad (4.22)$$

Ее модуль равен $\dot{I}_{a.0} = \frac{I}{3}$.

Составляющая тока в фазе «а» прямой последовательности равна

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a.1} &= \frac{1}{3} \left[\dot{I}_a + \dot{I}_e \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] = \frac{I}{3} \left[1 - \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] = \\ &= \frac{I}{3} \left(1 + \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \right) = \frac{2}{3} I. \end{aligned}$$

Составляющая тока в фазе «а» обратной последовательности равна

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a.2} &= \frac{1}{3} \left[\dot{I}_a + \dot{I}_e \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] = \frac{I}{3} \left(1 + \frac{1}{4} + j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{3}{4} \right) = \\ &= \frac{I}{3} \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right). \end{aligned} \quad (4.23)$$

Модуль этой составляющей равен $I_{a.2} = \frac{I}{3}$. Составляющие нулевой последовательности в фазах «в» и «с» такие же, как в фазе «а».

Составляющая прямой последовательности тока фазы «в» равна

$$\dot{I}_{e.1} = \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \dot{I}_{a.1} = \frac{2I}{3} \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right). \quad (4.24)$$

Ее модуль равен

$$I_{e.1} = \frac{2}{3} I.$$

Составляющая прямой последовательности тока фазы «с» равна

$$\dot{I}_{c.1} = \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \dot{I}_{a.1} = \frac{2I}{3} \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right), \quad (4.25)$$

и ее модуль $I_{c.1} = \frac{2}{3} I$.

Составляющая обратной последовательности тока фазы «в» равна

$$\begin{aligned} i_{a.2} &= \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) i_{a.2} = \frac{I}{3} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \\ &= -\frac{I}{3} \left(\frac{1}{4} + \frac{3}{4}\right) = -\frac{I}{3}. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Составляющая обратной последовательности тока фазы «с» равна

$$\begin{aligned} i_{c.2} &= \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) i_{a.2} = \frac{I}{3} \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \\ &= -\frac{I}{3} \left(\frac{1}{4} + j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{3}{4}\right) = \frac{I}{3} \left(\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right), \end{aligned} \quad (4.27)$$

ее модуль равен $I/3$.

Таким образом в результате разложения несимметричной системы токов рис. 4.5 получаем нулевую систему токов с модулем $I/3$, развернутую на 60° по отношению к оси вещественных, симметричную систему прямой последовательности с модулем $2I/3$ с током в фазе «а», совпадающим с осью вещественных и токами в фазе «в» и фазе «с», сдвинутыми на $\pm 120^\circ$ по отношению к току фазы «а», а также симметричную систему обратной последовательности с модулем $I/3$ с вектором в фазе «в», совмещенным с отрицательным направлением оси вещественных, и с составляющими токов в фазах «а» и «с», сдвинутых на $\pm 120^\circ$ по отношению к вектору тока фазы «в» (см. рис. 4.7).

Каждая из обозначенных систем токов трансформируется в первичную обмотку, причем составляющие нулевой последовательности замыкаются по треугольнику и не попадают в источник напряжения. Все они складываются арифметически и по треугольнику протекает ток $k_T I_0$, где k_T – коэффициент трансформации. Составляющие прямой и обратной последовательностей нагружают источник напряжения.

Нагрузка вторичной обмотки несимметричной системой токов приводит к различному изменению напряжения в фазах.

В фазах «а» и «в» напряжение равно

$$\left. \begin{aligned} U_a &= U_{A.\phi} k_T \left(1 + \frac{U_{\kappa \%}}{100\%} \frac{I_a}{I_{ном}} \sin \varphi_a \right), \\ U_e &= U_{B.\phi} k_T \left(1 + \frac{U_{\kappa \%}}{100\%} \frac{I_e}{I_{ном}} \sin \varphi_e \right), \\ U_c &= U_{C.\phi} k_T, \end{aligned} \right\} \quad (4.28)$$

где $U_{A.\phi}$; $U_{B.\phi}$ и $U_{C.\phi}$ - фазовые напряжения первичной обмотки, $I_{ном}$ - номинальный ток вторичной обмотки (ВН); I_a и I_e - токи нагрузки фаз «а» и «в», φ_a и φ_e - углы сдвига токов по отношению к напряжению фазы.

Следовательно, при возможности протекания токов нулевой последовательности по первичной обмотке трансформатора она перегружается током нулевой последовательности, который в рассматриваемом случае равен току нагрузки здоровых фаз, что приводит к дополнительному выделению тепла и дополнительным потерям мощности. Суммарные потери мощности в первичной обмотке трансформатора составят

$$\begin{aligned} \Delta P_{об.1} &= 3k_T^2 (I_{np}^2 + I_{a.об}^2 + I_{a.0}^2) R_1 = 3k_T^2 \left(\frac{4}{9} I_a^2 + \frac{1}{9} I_a^2 + I_a^2 \right) k_{\delta.n} = \\ &= 3k_T^2 1,55 I_a^2 R_1 k_{\delta.n} = 1,55 \Delta P_{об.сим}, \end{aligned} \quad (4.29)$$

$\Delta P_{об.сим}$ - потери в первичной обмотке при симметричной нагрузке.

Следует учесть, однако, что во вторичной обмотке потери снижаются из-за отсутствия тока в одной обмотке и составляют

$$\Delta P_{об.2} = 2I_a^2 R_2 k_{\delta.n} = \frac{2}{3} \Delta P_{об.2.сим}.$$

Поскольку обычно в обмотке ВН потери больше из-за большего диаметра обмотки и соответственно большей длины провода суммарные потери мощности в трансформаторе

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta P_{об} &= \Delta P_{об.1} + \Delta P_{об.2} = \\ &= 1,55 \Delta P_{об.2.сим} + 2 \Delta P_{об.2.сим} / 3 \approx \Delta P_{об.1.сим} + \Delta P_{об.2.сим} \end{aligned}$$

остаются практически неизменными. Однако тепловая нагрузка при этом возрастает из-за преобладающего выделения тепла во внутренних обмотках трансформатора.

Составляющие тока обратной последовательности не вызывают каких либо осложнений в работе трансформатора. Однако, для ге-

нераторов ток обратной последовательности создает встречное вращающееся поле вызывающее дополнительный нагрев обмоток. В связи с этим суммарный ток генераторов (с учетом тока обратной последовательности) не должен превышать номинальный ток, а содержание тока обратной последовательности не должно превышать 8-10% от номинального тока генератора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ режимов работы трансформаторов и автотрансформаторов позволяет утверждать, что в нормальных условиях их работы активный ток нагрузки не связан с какими либо осложнениями, в частности не вызывает заметных колебаний напряжения и заметного увеличения магнитного потока в магнитопроводе.

Повышения и понижения напряжения на трансформаторах и автотрансформаторах определяются реактивным током нагрузки. Именно с протеканием реактивных токов нагрузки через трансформаторы связана необходимость применения РПН со всеми вытекающими последствиями.

Компенсация реактивного тока нагрузки, исключая его попадание в обмотки трансформаторов, обеспечивает стабилизацию напряжения на трансформаторах и дополнительно стабилизацию магнитных потоков в них, когда магнитная индукция в магнитопроводе не выходит за пределы принятых допусков на индукции холостого хода трансформаторов и автотрансформаторов.

При отсутствии компенсирующих устройств кроме установки РПН необходимо увеличивать сечение магнитопровода на 20-25% по сравнению с определяемым магнитным потоком холостого хода.

Необходимо также изменить существующую традицию устройства пристенных магнитных шунтов, практически не решающих проблему уменьшения добавочных потерь в конструктивных элементах трансформаторов и в крайних витках обмоток. Канализация магнитного потока с помощью приярменных магнитных шунтов, прикрывающих с двух сторон торцевые части обмоток, позволяет резко снизить добавочные потери в конструктивных элементах трансформаторов и существенно ограничить перегревы их конструктивных элементов. При этом приярменные шунты эффективны в том случае, когда активное сопротивление между листами стали достаточно велико, а их активное сечение достаточно для исключения насыщения стали. При наличии приярменных магнитных шунтов пристенные магнитные шунты не требуются.

Сосредоточение более 90% энергии магнитного потока трансформаторов и автотрансформаторов в межобмоточном пространстве, где и происходит обмен электромагнитной энергии между обмотками, определяет целесообразность называть этот поток рабочим магнитным потоком вместо общепринятого названия потока рассеяния. Поток рассеяния следует называть частью рабочего магнитного потока, которую не удастся уловить с помощью приярменных шунтов и которая

пронизывает конструктивные элементы трансформатора: стержневые балки, бак и т. п., индуцируя в них вихревые токи, вызывающие добавочные потери мощности.

Наиболее тяжелым аварийным режимом работы трансформаторов является короткое замыкание вблизи его выводов. При этом магнитный поток значительно превосходит поток холостого хода, насыщая магнитопровод до предельного состояния. Практически это означает, что магнитопровод отсутствует, а индуктивное сопротивление уменьшается вдвое. Это приводит к дополнительному увеличению ударного тока короткого замыкания по сравнению с рассчитываемым по измеренному в опыте короткого замыкания значению сопротивления трансформатора. Это обстоятельство, в настоящее время неучитываемое, является основной причиной разрушения обмоток трансформаторов при коротких замыканиях.

В особенно тяжелых условиях при коротких замыканиях оказываются понижающие автотрансформаторы, к части обмотки ВН которых оказывается приложенным напряжение сети.

Для обеспечения работы трансформаторов (автотрансформаторов) в неполнофазных режимах необходимо обеспечить путь замыкания нулевой составляющей тока либо замыканием обмоток трех фаз треугольником, либо заземлением нейтрали при соединении обмоток звездой.

Все изложенное позволяет сделать общий вывод о необходимости тщательного анализа условий распределения магнитного потока во всех режимах работы трансформаторов и автотрансформаторов, не ограничиваясь анализом упрощенной эквивалентной схемы трансформатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование линий электропередач сверхвысокого напряжения. Под ред. Г.Н.Александрова. – СПб.: Энергоатомиздат, 1993. – 560 с.
2. Александров Г.Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи. Изд-е Центра подготовки кадров РАО «ЕЭС России», 2002 г.
3. Антипов К.М., Окин А.А., Портной М.Г., Хвошинская З.Г. Основные направления нормализации уровней напряжения в основных электрических сетях единой энергосистемы России. «Электр. станции», 1995, №9, стр. 16-22.
4. Александров Г.Н. Статический тиристорный компенсатор на основе управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа. Электричество, 2003, №2, стр. 38-46.
5. Александров Г.Н., Лунин В.П. Управляемые реакторы. СПб: Северо-Западный филиал ПО «ГВИЦ Энергетики», 2001 г.
6. Александров Г.Н. Особенности магнитного поля трансформаторов под нагрузкой. Электричество, 2003, №5.
7. Петров Г.Н. Трансформаторы, т.1. Энергоиздат, 1934 г.
8. Александров Г.Н. Магнитный шунт. Свидетельство на полезную модель №22580, приоритет от 05.11.2001
9. Петров Г.Н. Электрические машины ч.1. Трансформаторы.: М. «Энергия», 1974.
10. Конов Ю.С., Хубларов Н.Н., Горшунов В.Ю. Расчет механической устойчивости обмоток мощных трансформаторов при коротких замыканиях. Электрические станции, 1983, №2, стр. 38-41.
11. Григоров Н.Б. Потоки в магнитопроводах мощных силовых трансформаторов с учетом потока рассеяния. Электротехника, 1975, №4, стр. 20-25.

Режимы работы трансформаторов

Учебное пособие

Чл.-кор. РАН, д.т.н., проф. Александров Георгий Николаевич

Издание Центра подготовки кадров энергетики,
194223, Санкт-Петербург, а/я 44.
Тираж 300 экз., 2006 г.