

Э.Г. ЧЕБОТКОВ

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

(ч.1. Специальные трансформаторы)

**Самара
Самарский государственный технический университет
2008**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Э.Г. ЧЕБОТКОВ

СПЕЦИАЛЬНЫЕ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

(ч.1. Специальные трансформаторы)

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве курса лекций*

Самара
Самарский государственный технический университет
2008

УДК 621. 313

Ч 34

Рецензент канд. техн. наук, проф. *В.Е. Высоцкий*

Ч 34 Специальные электромеханические преобразователи (ч. 1. Специальные трансформаторы): Курс лекц. / *Э.Г. Чеботков*; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2008. 78 с.

ISBN 978-5-7964-1124-7

Содержатся общие сведения, теоретические основы, описание принципа действия, принципиальные схемы, характеристики и основные соотношения для курса лекций по специальным электромеханическим преобразователям. Предназначено для практических занятий и самостоятельной работы.

УДК 621. 313

Ч 34

ISBN 978-5-7964-1124-7

© Э.Г. Чеботков, 2008

© Самарский государственный
технический университет, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Электромеханические преобразователи в системном понимании предназначены для производства, преобразования и накопления электроэнергии и являются, в общем случае, электрическими машинами. Научные исследования и развитие электроэнергетики привели к созданию электрических машин – источников и преобразователей энергии, которые вышли за пределы обычных электромеханических преобразователей.

Широкое и разнообразное применение специальных электромеханических преобразователей в энергетике, автоматизации производственных процессов и во всех отраслях промышленности определяет необходимость освоения инженерно-техническим составом, работающим в этой области, теории преобразователей, вопросов их разработки и применения.

Учебные планы технических университетов содержат курс «Проектирование, расчет и потребительские свойства электромеханических преобразователей» для студентов различных электротехнических специальностей. Учебный план для студентов специальности 140.601 предусматривает, кроме теоретического курса, практические занятия и достаточно большой объем самостоятельной работы.

Изучение курса специальных электромеханических преобразователей базируется на преемственности знаний, полученных при изучении таких предшествующих дисциплин, как высшая математика, физика, теоретическая механика, сопротивление материалов, теоретические основы электротехники, основы электроники и др.

Знания, полученные студентами при изучении специальных электромеханических преобразователей, необходимы для освоения материала по курсам: электромеханика и электрические машины, основы автоматизированного электропривода, электрические аппараты, электрические микромашины и др.

Данный курс лекций предназначен для освоения отдельного раздела специальных электромеханических преобразователей – изучения основ специальных трансформаторов, их узлов и деталей, – и практического применения полученных знаний для расчетов и конструирования.

1. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Трансформатор является, в общем случае, статическим преобразователем электроэнергии переменного тока. Обычно трансформатор представляет собой электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты. Такие трансформаторы получили широкое распространение и применение в различных отраслях промышленности и сферах деятельности человечества.

Силовые трансформаторы используются в системах передачи и распределения электроэнергии, в системах электроснабжения переменного тока, в трансформаторно-выпрямительных блоках для получения постоянного тока статическими способами.

Трансформаторы находят широкое применение в качестве вторичных источников питания электронных аппаратов, вычислительных машин, бортовых систем электропитания, устройств защиты, коммутационной аппаратуры и др.

В различных отраслях промышленности, в системах автоматического регулирования и управления применяются специальные трансформаторы: дифференцирующие, согласующие, измерительные, выполняющие преобразование числа фаз, частоты, сварочные трансформаторы, регулирующие величину напряжения, пик-трансформаторы и др.

В данном курсе рассматриваются специальные трансформаторы.

1.2. АВТОТРАНСФОРМАТОР

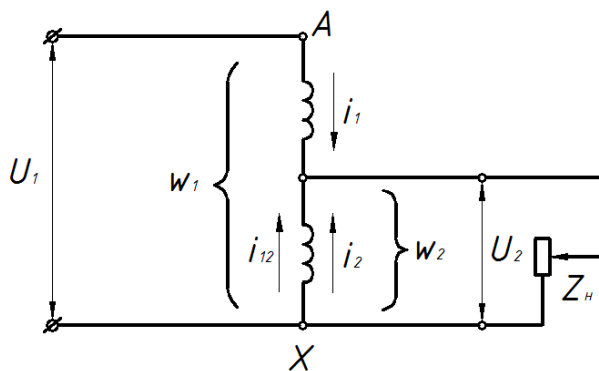
Автотрансформатор имеет всего лишь одну обмотку, часть витков которой является общей для первичной и вторичной цепей. На рис. 1.1 представлена схема понижающего автотрансформатора, где общей частью обмотки является участок AX , ток в котором I_{12} . Учитывая, что токи I_1 и I_2 находятся в противофазе, получим следующее выражение тока:

$$I_{12} = I_2 - I_1.$$

Отсюда следует, что величина тока в общей части обмотки равна разности токов I_1 и I_2 .

Если коэффициент трансформации автотрансформатора немного больше единицы, то токи I_1 и I_2 мало отличаются друг от друга, а их разность $I_2 - I_1$ составляет небольшую величину. Это позволяет выполнить часть обмотки AX однофазного автотрансформатора из провода меньшего сечения. Если пренебречь потерями в автотрансформаторе, то можно принять, что мощность на входе $S_1 = I_1 U_1$ и мощность на выходе $S_2 = I_2 U_2$ приблизительно равны.

Эта мощность $S_1 \approx S_2$ называется *проходной мощностью* S_{np} . Кроме того, различают еще *расчетную мощность* $S_{расч}$, представляющую собой мощность, передаваемую из первичной во вторичную цепь магнитным полем. Расчетной эту мощность называют потому, что размеры и вес трансформатора зависят от величины этой мощности. В трансформаторе вся проходная мощность является расчетной, так как между обмотками трансформатора существует исключительно лишь магнитная связь. Но в автотрансформаторе между первичной и вторичной цепями, помимо магнитной связи, существует еще и электрическая связь. А потому расчетная мощность составляет лишь часть проходной мощности, а другая часть этой мощности переносится из первичной во вторичную цепь за счет электрической связи между цепями, без участия магнитного поля. В подтверждение этого разложим проходную мощность автотрансформатора $S_{np} = I_2 U_2$ на составляющие.



Р и с.1.1. Принципиальная схема однофазного трансформатора

Воспользуемся для этого выражением, из которого следует $I_2 = I_1 + I_{12}$. Подставив это в формулу проходной мощности, получим

$$S_{np} = U_2 I_2 = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_{эл} + S_{расч}.$$

Здесь $S_{эл} = U_2 I_1$ — мощность, передаваемая из первичной цепи автотрансформатора во вторичную благодаря электрической связи между этими цепями. Таким образом, расчетная мощность в автотрансформаторе $S_{расч} = U_2 I_{12}$ составляет лишь часть проходной мощности.

Это дает возможность использовать для изготовления автотрансформатора магнитопровод меньшего сечения, чем в трансформаторе равной мощности. В связи с этим средняя длина витка обмотки также становится меньше, а следовательно, уменьшается расход меди на выполнение обмотки автотрансформатора. Одновременно уменьшаются магнитные и электрические потери, а к.п.д. автотрансформатора повышается.

Таким образом, автотрансформатор по сравнению с трансформатором равной мощности обладает следующими преимуществами: меньшим расходом активных материалов (медь и электротехническая сталь), меньшими размерами, более высоким к.п.д., меньшей стоимостью.

Указанные преимущества автотрансформатора тем значительнее, чем больше мощность $S_{эл}$, а следовательно, чем меньше расчетная часть проходной мощности.

Величина мощности $S_{эл}$ обратно пропорциональна коэффициенту трансформации автотрансформатора $K_A = \frac{w_{Ax}}{w_{ax}}$:

$$S_{эл} = S_{np} \frac{1}{K_A}.$$

Из графика (рис. 1.2) видно, что применение автотрансформатора дает заметные преимущества по сравнению с двухобмоточным трансформатором лишь при небольших значениях коэффициентов трансформации. Например, при $K_A = 1$ вся мощность автотрансформатора передается во вторичную цепь за счет электрической связи между цепями ($S_3/S_{np} = 1$).

Наиболее целесообразно применение автотрансформаторов с коэффициентом трансформации $K_A \leq 2$.

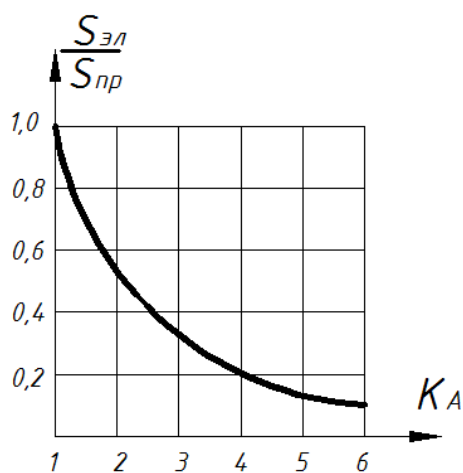
При большей величине коэффициента трансформации преобладающее значение имеют недостатки автотрансформатора, которые состоят в следующем:

1) большие токи короткого замыкания в случае понижающего автотрансформатора (при замыкании точек A и X (рис. 1.1) напряжение U_1 подводится лишь к небольшой части витков, которые обладают очень малым сопротивлением короткого замыкания);

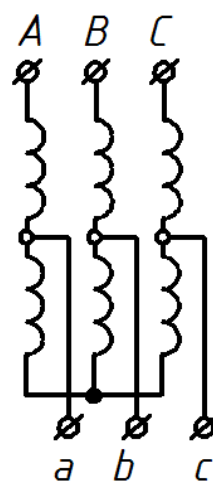
2) электрическая связь стороны ВН со стороной НН; это требует усиленной электрической изоляции всей обмотки;

3) напряжение, возникающее в схемах понижения напряжения между проводами сети НН и землей и приблизительно равное напряжению между проводом и землей на стороне ВН, что недопустимо по условиям безопасности эксплуатации установок.

Автотрансформаторы могут быть повышающими и понижающими, однофазными и трехфазными. В последних обмотки обычно соединяются звездой (рис. 1.3).



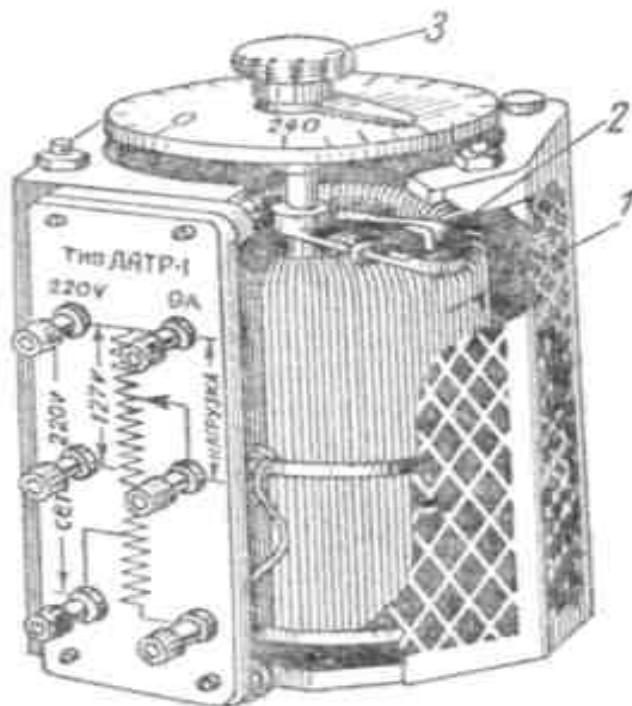
Р и с. 1.2. Зависимость $S_{эл}/S_{пр}=f(K_A)$



Р и с. 1.3. Схема трёхфазного автотрансформатора

Широкое распространение получили автотрансформаторы с переменным коэффициентом трансформации. В этом случае автотрансформатор снабжается устройством, позволяющим регулировать вели-

чину вторичного напряжения путем изменения числа витков w_2 . Осуществляется это либо переключателем, либо с помощью скользящего контакта (щетке), перемещаемого непосредственно по зачищенным от изоляции виткам обмотки. Такие автотрансформаторы называются регуляторами напряжения и могут быть как однофазными (тип РНО), так и трехфазными (тип РНТ). Устройство автотрансформатора типа РНО представлено на рис. 1.4.



Р и с. 1.4. Регулировочный автотрансформатор типа РНО:

1 – обмотка; 2 – щеткодержатель; 3 – ручка регулятора

Проводя аналогичные рассуждения, убеждаемся в том, что активное r_k и индуктивное x_k сопротивления короткого замыкания автотрансформатора в $(1 - \frac{1}{K})$ раз меньше, чем трансформатора. Поэтому напряжение короткого замыкания автотрансформатора $u_{к.а.}$ также в $(1 - \frac{1}{K})$ раз меньше, чем трансформатора u_k , т.е. $u_{к.а.} = u_k(1 - \frac{1}{K})$.

Вследствие этого ток короткого замыкания автотрансформатора значительно больше, чем трансформатора. При коротком замыкании намагничивающий ток автотрансформатора во много раз увеличи-

вается и может быть соизмеримым с током короткого замыкания. Это объясняется тем, что при нормальной работе м.д.с., создаваемые обмотками трансформатора на участках (см. рис. 1.1), взаимно уравновешиваются. Например, для повышающего автотрансформатора $I_{12}w_1 = I_2(1 - \frac{1}{K})w_1 = -I_2(w_2 - w_1)$. При коротком замыкании $I_{12} \ll I_2(w_2 - w_1)$, в результате чего сердечник очень сильно насыщается. Большой ток при коротком замыкании является недостатком автотрансформатора.

Существенным недостатком автотрансформатора является опасность попадания высокого напряжения в сеть низкого, так как обмотки соединены электрически. Поэтому изоляция сети низкого напряжения автотрансформатора должна быть той же, что и высокого.

Автотрансформаторы широко применяются в схемах автоматики, радиоэлектроники и проводной связи, в которых напряжение изменяется в пределах $\pm 10-50\%$. Они также применяются в схемах пуска крупных синхронных и короткозамкнутых асинхронных двигателей и для осветительных установок. Автотрансформаторы со скользящим контактом обмотки нашли широкое применение в лабораторной практике, так как дают возможность плавно регулировать напряжение вторичной сети U_2 от 0 до $1,2 U_1$.

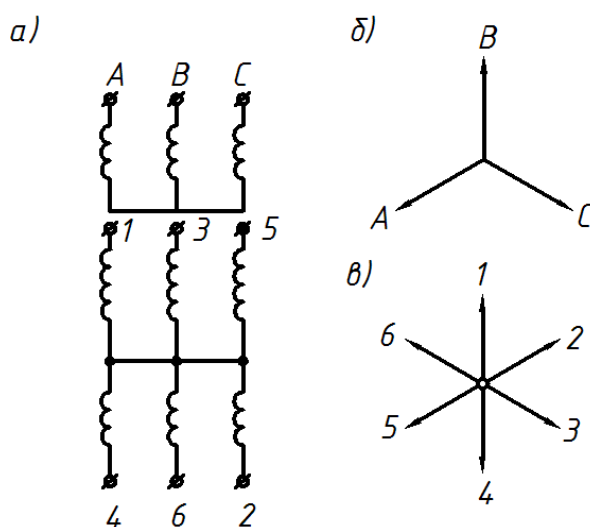
1.3. ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧИСЛА ФАЗ

1.3.1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ В ДВУХФАЗНУЮ

В системах автоматики для питания исполнительных асинхронных микродвигателей часто используется система двухфазного тока. Двухфазный ток удобно получать из трехфазного путем применения особых трансформаторных схем. Наибольшее распространение получила схема, состоящая из двух неодинаковых однофазных трансформаторов *I* и *II* (рис.1.5 *a*). В этой схеме точка 0 делит витки первичной обмотки трансформатора *II* на две равные части. Напряжения обмоток трансформаторов *I* и *II* сдвинуты на четверть периода. Первич-

ные напряжения трансформаторов *I* и *II* $U_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}U_{II}$ или $OB = \frac{\sqrt{3}}{2}AC$ (рис. 1.5, б).

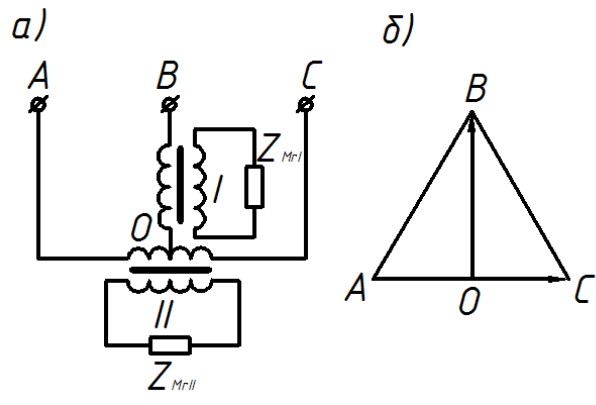
Для получения одинаковых напряжений на вторичных обмотках трансформаторов необходимо, чтобы коэффициент трансформации трансформатора *I* был в $\frac{\sqrt{3}}{2}$ раз больше, чем трансформатора *II*. Обычно оба трансформатора выполняются с одинаковым числом вторичных витков, но первичные витки трансформатора *I* имеют отвлечение на расстоянии $\frac{\sqrt{3}}{2}$ количества витков от начала обмотки. При симметричных двухфазных токах вторичной цепи токи трехфазной первичной цепи также являются симметричными.



Р и с. 1.5. Преобразование трёхфазного тока в двухфазный:
а – трансформаторная схема; *б* – векторная диаграмма напряжений
 первичных обмоток

1.3.2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ В ШЕСТИ- И ДВЕНАДЦАТИФАЗНУЮ

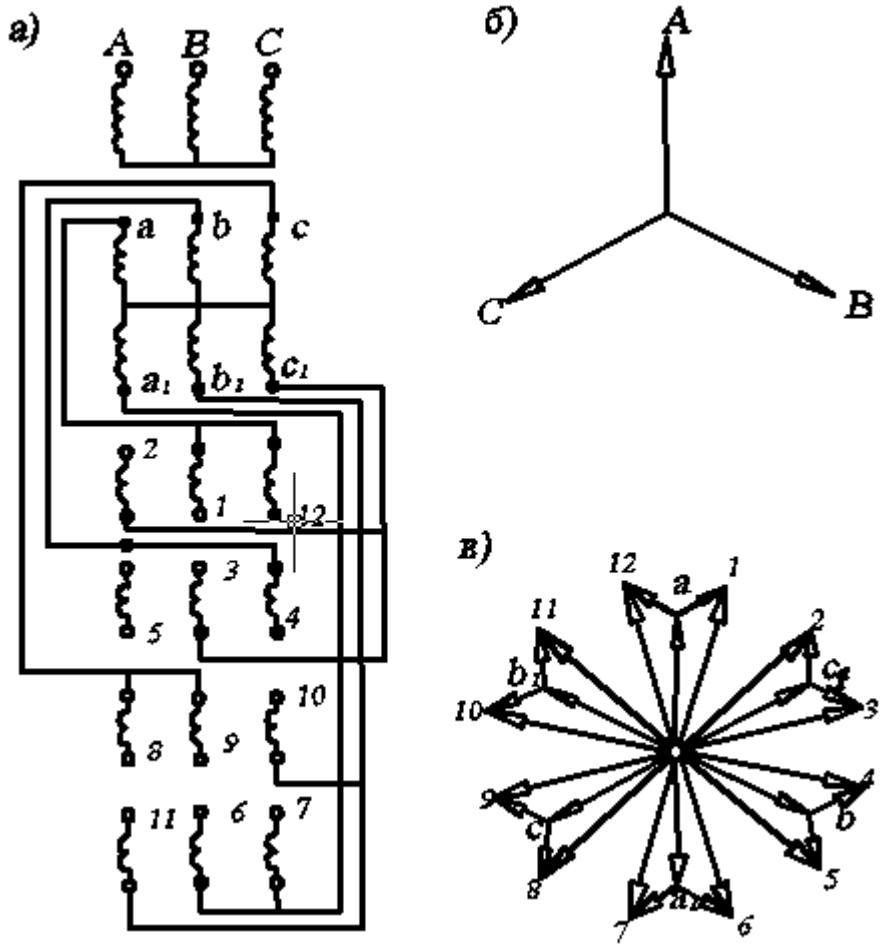
В ряде случаев требуется преобразовывать трехфазный ток в шести- и двенадцатифазный. Для преобразования в шестифазный ток используется трехстержневой трансформатор, на каждом стержне которого размещены одна фаза первичной обмотки и две одинаковые фазы вторичной. Вторичные обмотки могут быть соединены в две звезды (рис. 1.6), в замкнутый многоугольник или в зигзаг.



Р и с. 1.6. Преобразование трёхфазной системы тока в шестифазную:

- a* – схема соединения обмоток трансформатора;
- б* – векторная диаграмма ЭДС первичной обмотки;
- в* – векторная диаграмма ЭДС вторичной обмотки

Для преобразования в двенадцатифазный ток используется соединение вторичных обмоток в двойной зигзаг (рис. 1.7). При этом



Р и с. 1.7. Преобразование трехфазной системы тока в двенадцатифазную:

- a* – схема соединения обмоток трансформатора;
- б* – векторная ЭДС первичной обмотки;
- в* – векторная диаграмма ЭДС вторичной обмотки

число витков в ветви шестифазной части должно быть в 2,75 раза больше, чем двенадцатифазной. В случае симметричной нагрузки ток в шестифазной зоне в 1,93 раза больше, чем в двенадцатифазной. Двенадцатифазный ток может быть также получен с помощью двух трансформаторов трехфазного тока, преобразующих в шестифазный, у одного из которых первичная обмотка соединена звездой, а у другого – треугольником.

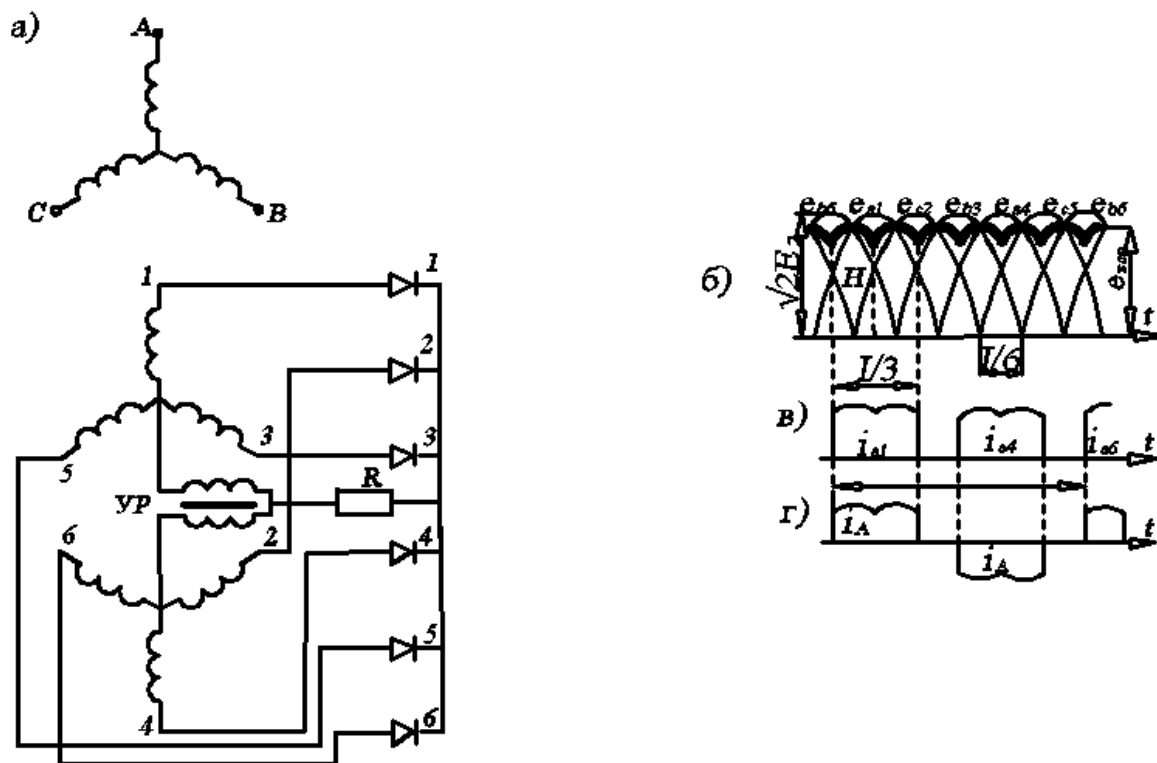
Так как при большом числе фаз уменьшаются пульсации выпрямленного тока и напряжения, то в случае выпрямления трехфазного тока при помощи ртутных выпрямителей обычно применяют трансформаторы, вторичная обмотка которых имеет шесть или двенадцать фаз. При работе на выпрямитель фазы трансформатора работают поочередно.

1.4. ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В РАДИО И ТЕЛЕВИЗИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

Трансформаторы нашли широкое применение в схемах радиоэлектроники. Особенность этих схем состоит в том, что в них нужно преобразовывать ток и напряжение в большом диапазоне частот, обычно от долей герца до сотен килогерц. Для возможности минимального искажения формы преобразуемого тока необходимо, чтобы характеристики трансформатора были линейными, а постоянная времени обмоток – наименьшей. Чтобы характеристики трансформатора имели линейную зависимость, уменьшают индукцию магнитопровода и шихтуют его из листов специальных ферромагнитных сплавов (например, пермалоя) или специальной трансформаторной электротехнической стали, имеющей малые потери, низкую остаточную индукцию, высокое значение индукции насыщения и большую магнитную проницаемость.

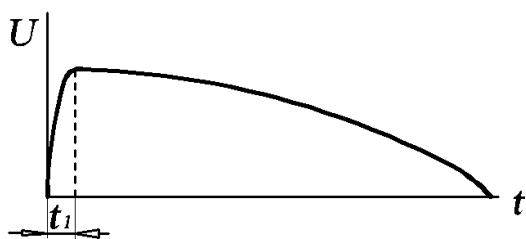
Вихревые токи в стали должны быть уменьшены, так как при высокой частоте они искажают форму выходных импульсов и вызывают значительное возрастание тока холостого хода. Вследствие эффекта

вытеснения вихревые токи вызывают неравномерное распределение потока по сердечнику магнитопровода, что может привести к насыщению поверхностных слоев листов стали. Для уменьшения постоянной времени обмотки размещают таким образом, чтобы индуктивность рассеяния была наименьшей.



Р и с. 1.8. Преобразование трехфазного тока в шестифазный для питания выпрямителей по схеме трансформатора с уравнивающим реактором:
 а – схема соединения обмоток трансформатора; б – изменение во времени ЭДС вторичных обмоток и выпрямленного напряжения; в – изменение во времени тока первичной обмотки; г – изменение во времени токов вторичной обмотки.

Развитие телевидения, радиолокации и импульсной радиосвязи привело к созданию специальных импульсных трансформаторов, предназначенных для преобразования сигналов, имеющих малую продолжительность и крутой фронт нарастания. Импульсные трансформаторы понижают или повышают напряжение импульсов и могут изменять их полярность. Часто импульсные трансформаторы выполняются многообмоточными. Мощность импульсов современных трансформаторов находится в диапазоне от нескольких ватт до 10 мВт. Длительность импульсов составляет от долей микросекунды до 1-2 микросекунд. При этом фронт нарастания импульса обычно весь-



Р и с. 1.9. Изменение импульса напряжения во времени

ма крутой, и время t_t (рис. 1.9), в течение которого происходит нарастание импульса, очень мало. Кривая увеличения напряжения за время t_t может рассматриваться как четверть периода некоторого периодического процесса, проходящего с очень большой частотой, при которой между обмотками и

между витками одной обмотки возникают значительные емкостные связи. Учет емкостных связей в схеме замещения может быть приближенно произведен введением ветви, содержащей емкость C . В импульсном трансформаторе по емкостным связям может проходить значительный ток, в результате чего искажается форма фронта импульса и могут возникнуть колебания, которые накладываются на передаваемый импульс.

Особенностью процессов в импульсном трансформаторе по сравнению с трансформаторами, работающими при промышленной и даже звуковой частоте, является сильное влияние емкостных связей, перемагничивания и вихревых токов.

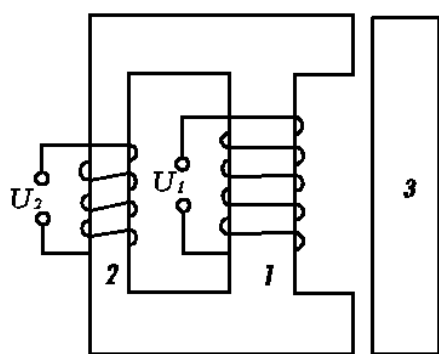
1.5. ПИК-ТРАНСФОРМАТОР

Если трансформаторы, применяемые в радиоэлектронике, должны возможно более точно сохранять форму кривой передаваемого напряжения, то назначение пик-трансформатора состоит в изменении формы кривой напряжения. На выходе пик-трансформатора напряжение должно иметь острую пикообразную форму.

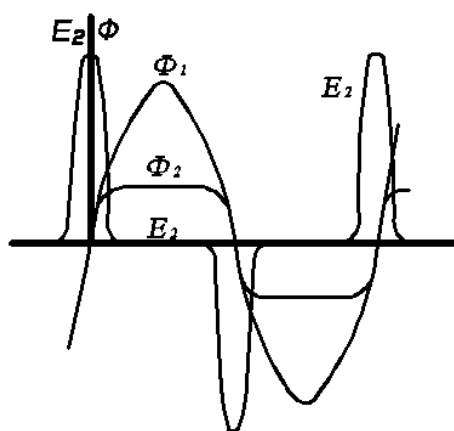
Для получения пикообразной формы ЭДС на вторичной обмотке необходимо, чтобы сцепленный с нею поток был бы уплощенным. Поэтому вторичную обмотку наматывают на стержень 2 (рис. 1.10), имеющий весьма малое сечение, который быстро насыщается. Первичную обмотку наматывают на имеющий большое сечение стержень 1, который через воздушный зазор шунтируется стержнем 3, имеющим также большое сечение. Стержни 1 и 3 не насыщаются.

Пик-трансформатор работает следующим образом. Пока стержень 2, на который намотана вторичная обмотка, не насытился, поток стержня 1 в основном замыкается по стержню 2, так как этот путь имеет меньшее магнитное сопротивление. После насыщения стержня 2 при дальнейшем увеличении потока стержня 1 он проходит только через воздушный зазор по ненасыщенному стержню 3.

Изменение во времени потоков и ЭДС пик-трансформатора представлено на рис. 1.11. В любой момент времени поток Φ_1 в стержне 1 равен сумме потоков: Φ_2 в насыщенном стержне 2 и Φ_3 в стержне 3 (рис. 1.12).

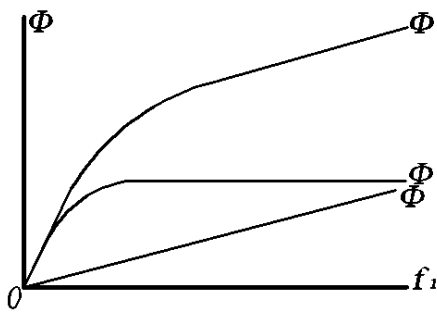


Р и с. 1.10. Схема пик-трансформатора



Р и с. 1.11. Изменение во времени потоков и ЭДС пик-трансформатора

Пользуясь идеализированной картиной изменения потока Φ_2 , проанализируем изменение ЭДС E_2 в обмотке, расположенной на насыщенном стержне 2 (см. рис. 1.13). Если бы стержень 2 не насыщался, то потоки Φ_1 и Φ_2 изменялись бы по одному и тому же закону (кривая 1). В этом случае в обмотке 2 индуцировалась бы ЭДС (пунктирная кривая 2), фаза которой отстает на четверть периода от кривой 1 изменения потока. Вследствие насыщения стержня 2 поток Φ_2 в течение времени, определяемого на рис. 1.13 углом $\pi - 2\alpha$, остается неизменным (кривая 3). Поэтому в течение этого времени ЭДС E_2 равна нулю (кривая 4). Таким образом, ЭДС E_2 индуцируется только в промежутке времени, определяемом на рисунке углом 2α (кривая 4).



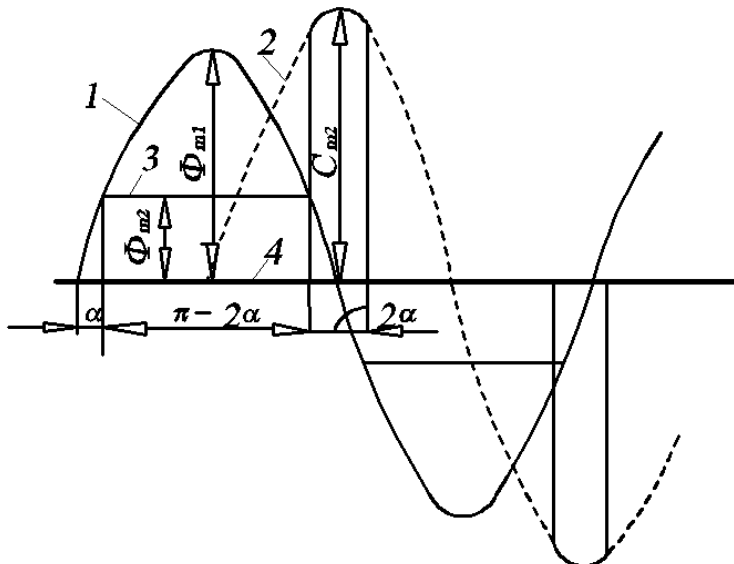
Р и с. 1.12. Изменение потоков в стержнях пик-трансформатора в функции тока первичной обмотки

Из рис. 1.13 следует, что

$$\sin \alpha = \frac{\Phi_{m2}}{\Phi_{m1}} = \frac{B_{m2}S_2}{B_1S_1},$$

где B_{m1}, B_{m2} – амплитудное значение индукции в стержнях 1 и 2; S_1 и S_2 – сечение стержней 1 и 2.

Последнее выражение показывает, что ширина пика вторичного напряжения уменьшается при уменьшении сечения S_2 стержня 2 и при увеличении индукции B_{m1} стержня 1.



Р и с. 1.13. Идеализированная картина изменения потоков и ЭДС пик-трансформатора

На рис. 1.13 видно, что величина пика вторичного напряжения равна амплитудному значению ЭДС:

$$e_{m2} = 2\pi f w_2 \Phi_1 = 2\pi f w_2 S_1 B_{m1},$$

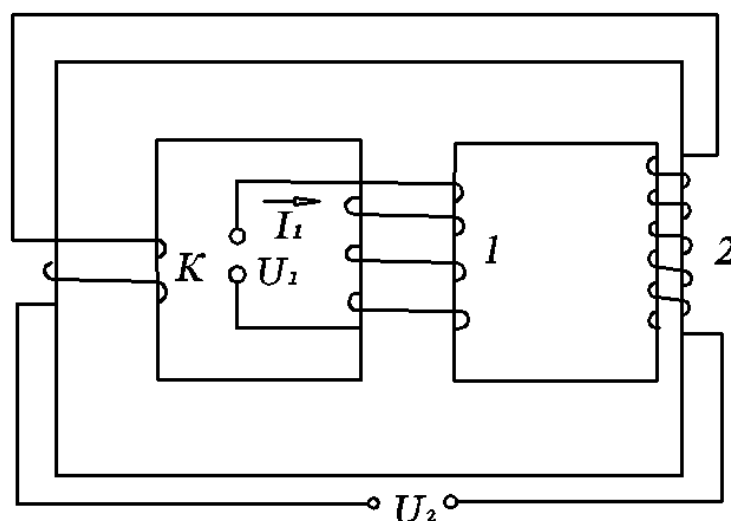
откуда следует, что величина пика пропорциональна индукции B_{m1} стержня 1, на котором намотана первичная обмотка.

Пик-трансформаторы широко применяются при регулировании, при выпрямлении и инвертировании переменного тока и в многоканальной телефонной связи.

1.6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ

Во многих схемах автоматики и радиоэлектроники необходимо поддерживать неизменное напряжение. Обычно напряжение сети имеет колебания в некоторых пределах. Для их устранения применяются стабилизаторы. В установках мощностью до 5 кВ·А часто используются электромагнитные стабилизаторы. К их достоинствам можно отнести низкую стоимость, простоту изготовления и надежность в работе. Их недостатком является плохая форма кривой стабилизированного напряжения и зависимость его величины от частоты сети и $\cos \varphi$ нагрузки. В основном применяются два типа электромагнитных стабилизаторов напряжения: без емкости, работающие на принципе насыщения сердечника, и с емкостью, работающие на принципе резонанса токов или резонанса напряжений.

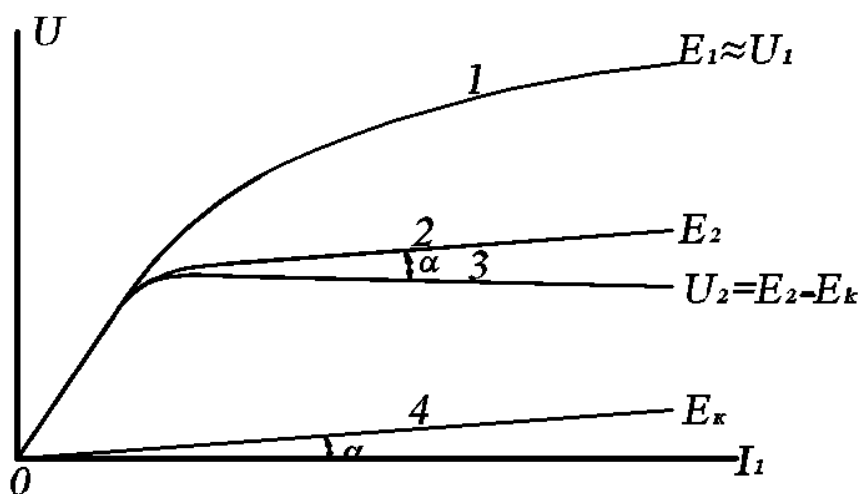
На рис. 1.14 представлена одна из возможных схем электромагнитного стабилизатора напряжения насыщенного типа. Магнитопровод стабилизатора трехстержневой. Один из крайних стержней имеет меньшее сечение, которое выбирают таким образом, чтобы его сталь была насыщена. На этом стержне намотана вторичная обмотка



Р и с. 1.14. Схема электромагнитного стабилизатора напряжения с компенсационной обмоткой, работающего на принципе насыщения сердечника:

1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка; K – компенсационная обмотка

трансформатора. Первичная обмотка, присоединяемая к напряжению питающей сети U_1 , намотана на среднем стержне. На другом крайнем стержне большого сечения намотана компенсационная обмотка K , имеющая небольшое число витков. Она соединена со вторичной обмоткой 2 последовательно таким образом, чтобы их ЭДС были направлены встречно. Напряжение U_2 на выходе стабилизатора равно разности ЭДС, индуцируемых в обмотках 2 и K . Часто в стабилизаторах используется не трансформаторная, а автотрансформаторная схема. Стабилизатор работает следующим образом. При увеличении напряжения U_1 питающей сети на обмотке 1 поток в насыщенном стержне, на котором намотана обмотка 2, увеличивается незначительно, так как увеличение потока происходит в основном по пути ненасыщенного стержня, на котором намотана обмотка K . Однако некоторое увеличение ЭДС обмотки 2 имеет место, но оно компенсируется увеличением ЭДС на обмотке K . В результате напряжение U_2 на выходе стабилизатора остается неизменным. ЭДС E_1 первичной обмотки имеет резко нелинейную зависимость от тока I_1 (кривая 1, рис. 1.15). Так как стержень, на котором намотана обмотка 2, быстро насыщается, то ее ЭДС E_2 после насыщения увеличивается незначи-



Р и с. 1.15. Характеристика электромагнитного стабилизатора напряжения с компенсационной обмоткой, работающего на принципе насыщения сердечника

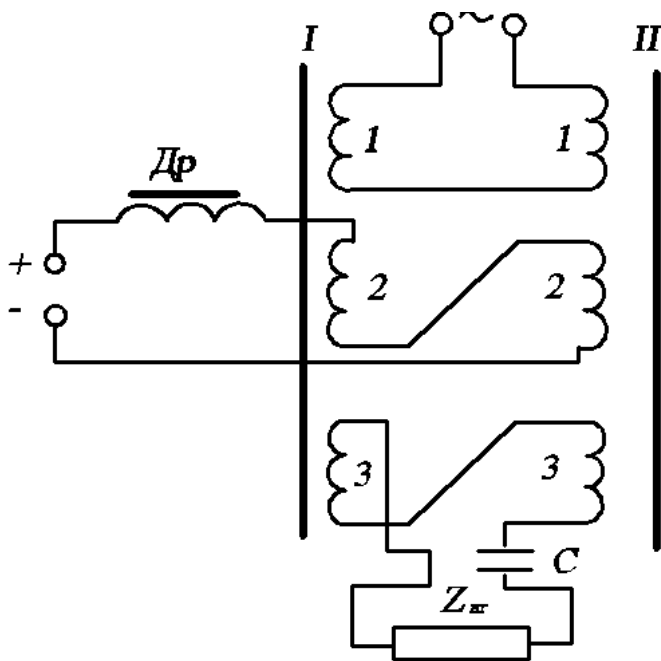
тельно (кривая 2). ЭДС E_k компенсационной обмотки изменяется пропорционально току I_1 (кривая 4), так как сталь стержня, на который она намотана, не насыщена. Стабилизатор настраивают таким образом, чтобы угол α наклона кривой 4 к оси абсцисс был равен углу насыщенной части кривой 2 к оси абсцисс. Напряжение на выходе стабилизатора U_2 , равное разности ЭДС обмоток 2 и К, в широком диапазоне увеличения тока I_1 не изменяется (кривая 3). К.п.д. этих стабилизаторов обычно 40-60%.

1.7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

В некоторых схемах автоматического регулирования, измерительных устройств и для питания электроинструмента используются статические электромагнитные преобразователи частоты. В большинстве случаев применяются преобразователи, которые умножают частоту в два, три, шесть, восемь и девять раз. Наиболее распространенными являются удвоители и утроители частоты. Остальные умножители обычно получают путем каскадного соединения, при котором напряжение выхода одного усилителя подается на вход другого. Рассматриваемые умножители частоты работают по принципу насыщения.

Принцип работы удвоителя частоты основан на том, что при изменении потока, создаваемого переменным и постоянным током, магнитопровод дважды насыщается за один период изменения тока. В результате проходящий по этому магнитопроводу поток, который создается подмагничивающей обмоткой постоянного тока, пульсирует и наводит ЭДС двойной частоты.

Удвоитель частоты (рис. 1.16) состоит из двух однофазных трансформаторов I и II, каждый из которых имеет три обмотки: первичную обмотку 1, питаемую от сети переменного тока, подмагничивающую обмотку 2, питаемую от сети постоянного тока и выходную обмотку 3, к которой подсоединяется нагрузочное сопротивление Z_{Hr} . В некоторых случаях подмагничивающую обмотку заменяют вставкой из постоянного магнита.



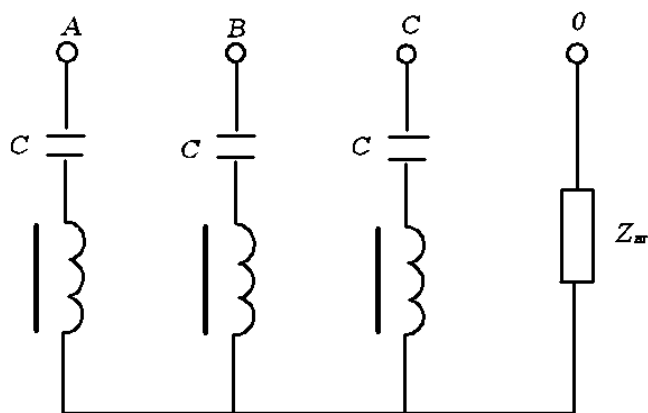
Р и с. 1.16. Схема удвоителя частоты:
 1 – первичная обмотка;
 2 – подмагничивающая обмотка;
 3 – выходная обмотка

Первичные обмотки, размещенные на разных сердечниках, соединены последовательно, а выходные – встречно. Поэтому ЭДС выходной обмотки не содержит первой и других нечетных гармоник. Так же, как и в магнитной системе трехсердечного МУ, магнитопроводы сердечников удвоителя частоты насыщаются, реагируя на каждую полуволну тока первичной обмотки. Вследствие этого поток, создаваемый обмоткой 2 постоянного тока, пульсирует с двойной частотой сети и наводит в выходной обмотке ЭДС двойной частоты.

Для компенсации внутреннего индуктивного сопротивления последовательно с нагрузочным сопротивлением включают конденсатор C . Применение конденсаторов улучшает $\cos\varphi$ и делает стабильными внешние характеристики умножителей. Напряжение двойной частоты на выходной обмотке 3 регулируют изменением величины постоянного тока в подмагничивающей обмотке 2.

Для компенсации внутреннего индуктивного сопротивления последовательно с нагрузочным сопротивлением включают конденсатор C . Применение конденсаторов улучшает $\cos\varphi$ и делает стабильными внешние характеристики умножителей. Напряжение двойной частоты на выходной обмотке 3 регулируют изменением величины постоянного тока в подмагничивающей обмотке 2.

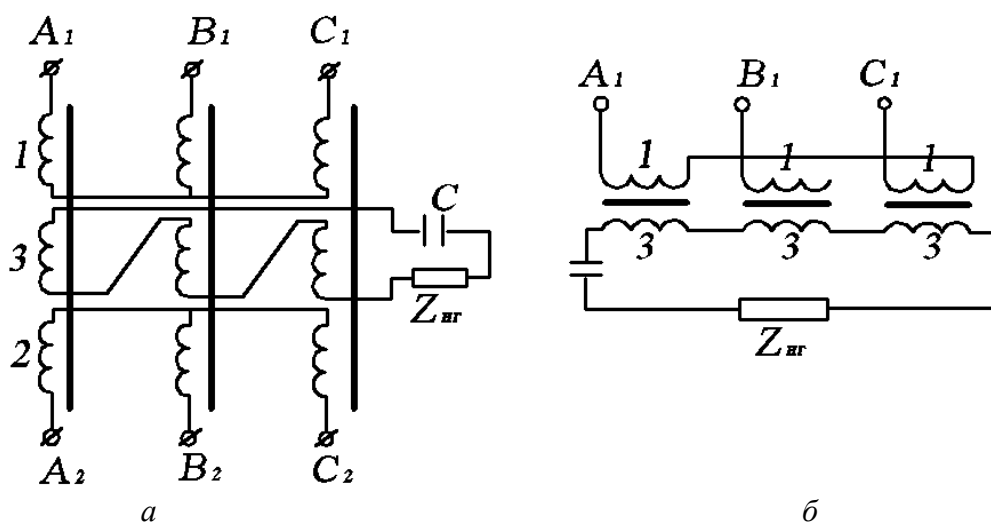
Утроители частоты работают на принципе использования третьей гармоники, возникающей при насыщении стального магнитопровода. Схема, показанная на рис. 1.17, может работать как утроитель частоты. Для этого в



Р и с. 1.17. Схема утроителя частоты с нагрузкой, включенной в нулевой провод

Утроители частоты работают на принципе использования третьей гармоники, возникающей при насыщении стального магнитопровода. Схема, показанная на рис. 1.17, может работать как утроитель частоты. Для этого в

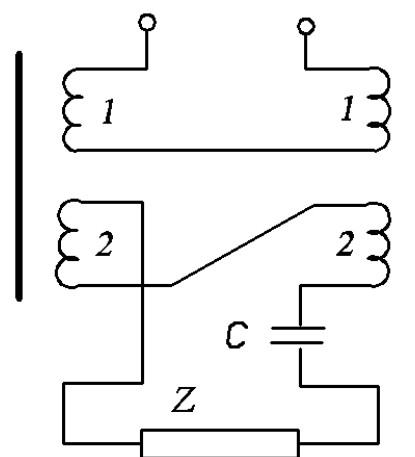
разрез нулевого провода должно быть включено нагрузочное сопротивление $z_{нр}$. Во многих случаях включают компенсирующую емкость C . В качестве утроителя частоты можно также использовать схемы (рис. 1.18) трансформатора, первичная обмотка которого соединена в звезду без вывода нулевой точки. Витки выходной обмотки, по которой проходят токи тройной частоты, должны быть намотаны последовательно. На всех трех сердечниках к выходной обмотке подключают нагрузочное сопротивление $z_{нр}$ и компенсирующую емкость C .



Р и с. 1.18. Схема утроителя частоты:
a – при наличии выходной обмотки основной частоты;
б – без выходной обмотки основной частоты: 1 – первичная обмотка;
 2 – вторичная обмотка основной частоты;
 3 – выходная обмотка тройной частоты

Для лучшего использования магнитной системы кроме выходной обмотки 3 токов тройной частоты утроитель может также иметь вторичную трансформаторную обмотку 2, соединенную в звезду без вывода нулевой точки (рис. 1.18, *a*). В этом случае утроитель частоты совмещается с трансформатором и используются основная и третья гармоники потока.

В схеме (рис. 1.19) обмотки утроителя частоты намотаны на двух сердечниках.



Р и с. 1.19. Схема утроителя частоты:
 1 – первичная обмотка;
 2 – выходная обмотка

Первичные обмотки, размещенные на сердечниках I и II , соединены последовательно, а выходные обмотки 2 – встречно. Сердечник I насыщенный.

Сердечник II имеет воздушный зазор и является ненасыщенным. Поэтому в части выходной обмотки 2 , которая намотана на стержне II , индуцируется только основная гармоника ЭДС, которая сдвинута на 180° по отношению к гармонике ЭДС, индуцируемой в части обмотки 2 , расположенной на насыщенном сердечнике I .

В результате этого в выходной обмотке основные гармоники компенсируются. Третья гармоника остается некомпенсированной, и по нагрузочному сопротивлению $Z_{Нг}$ проходят токи тройной частоты. Полная компенсация первых гармоник возможна только при холостом ходе, так как при нагрузке угол сдвига между первыми гармониками ЭДС обмоток 2 отличен от 180° .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие достоинства и недостатки имеет автотрансформатор по сравнению с трансформатором?
2. Как в автотрансформаторе передается мощность из первичной сети во вторичную?
3. Чем отличается рабочий процесс понижающего автотрансформатора от повышающего?
4. Какое значение имеет электромагнитная мощность автотрансформатора, если его коэффициент трансформации $k = 1$?
5. Почему у автотрансформатора ток короткого замыкания больше, чем у трансформатора?
6. В результате чего ЭДС на вторичной обмотке пик-трансформатора имеет заостренную форму?
7. Каким образом можно увеличить высоту и ширину пика напряжения пик-трансформатора?
8. Каков принцип работы стабилизаторов напряжения?
9. Как влияет изменение частоты питающей сети и характера нагрузки на работу стабилизатора напряжения?
10. Какие гармоники тока используются для схем удвоителя и утроителя частоты?
11. Какие общие явления лежат в основе работы МУ и удвоителя частоты?
12. Какая частота тока получается на выходе каскадного соединения удвоителя и утроителя частоты?

2. СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОСВАРКЕ

Электросваркой называется способ получения неразъемного соединения металлических деталей путем их местного нагрева до жидкого или пластического состояния с использованием для нагрева электрической энергии. Наиболее распространенные виды электросварки – дуговая и контактная.

При дуговой электросварке соединяемые детали обычно нагреваются вместе с присадочным материалом при помощи электрической дуги, температура в которой превышает 5000 °С. В зоне сварки создается ванночка расплавленного металла, которая при охлаждении затвердевает и образует сварной шов, прочно соединяющий свариваемые детали.

При контактной электросварке детали в месте соединения нагреваются до оплавления (иногда – до пластического состояния) и сжимаются с определенным усилием. Нагрев осуществляется теплом, которое выделяется в точках контакта между деталями при прохождении через них электрического тока. Присадочный материал не добавляется.

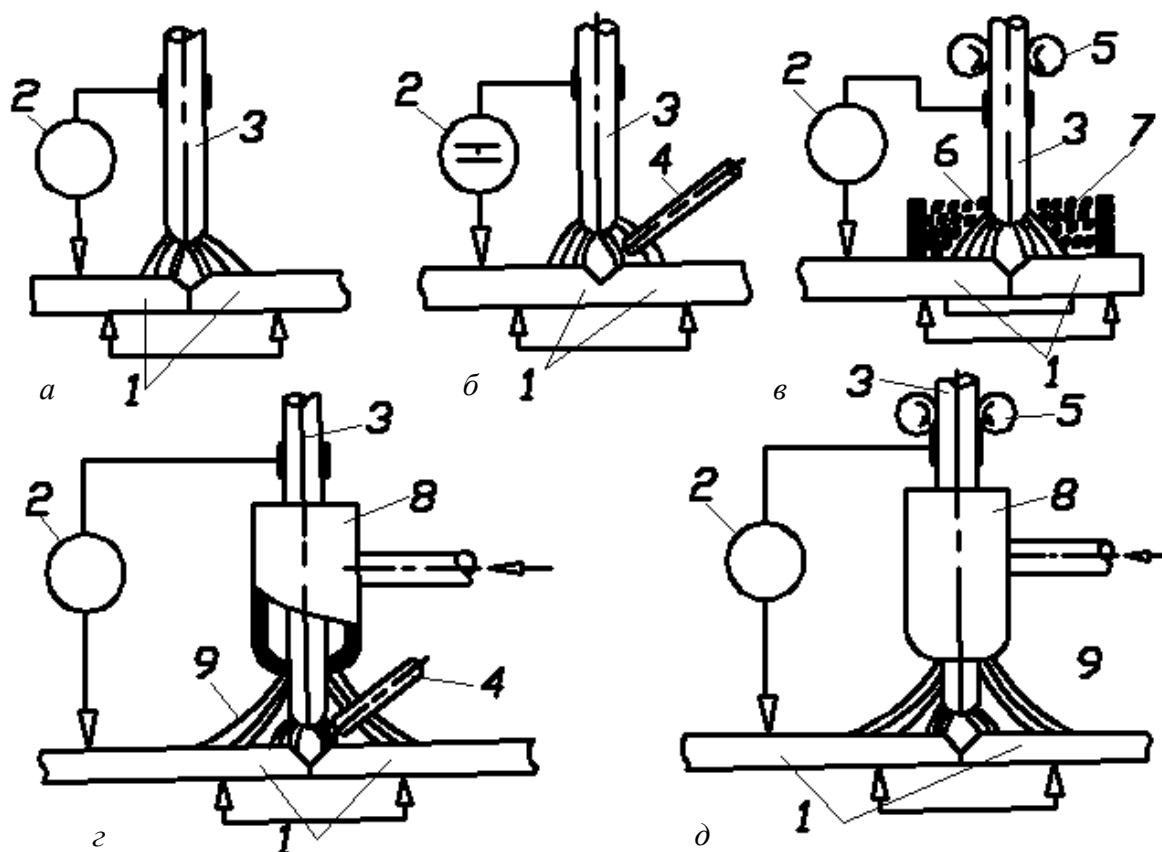
На предприятиях электромашиностроения установки электросварки применяют для сварки остовов генераторов и двигателей постоянного тока, приварки к остовам лап, изготовления сварных кожухов электрических машин, сварки крестовин и т. д. Электросварка широко используется при монтажных и ремонтных работах.

Дуговая сварка имеет несколько разновидностей. По особенностям использования электрической дуги различают сварку открытой дугой, закрытой дугой под слоем флюса, защищенной дугой в среде защитного газа. В зависимости от степени механизации и автоматизации процесса сварки говорят о ручной, полуавтоматической и автоматической сварке. Наконец, сварка может производиться на постоянном и на переменном токе однофазной и (реже) трехфазной дугой. Сварка на постоянном токе дороже и требует более сложного оборудования, но дает более высокое качество сварного шва.

Самое широкое применение для сварки черных металлов получила ручная электросварка открытой дугой с плавящимся электродом (рис. 2.1, а). Дуга, получая питание от источника 2 переменного или постоянного тока, горит в воздухе между свариваемыми деталями и электродом 3, который плавится в процессе сварки и участвует в образовании сварного шва. Электрод из проволоки, по химическому составу близкой к металлу свариваемых деталей, покрыт обмазкой. Она содержит вещества, которые образуют при расплавлении шлаки и газы, повышающие устойчивость дуги и в известной мере защищающие расплавленный металл от воздействия кислорода и азота воздуха.

Ручная сварка открытой дугой с неплавящимся электродом (рис. 2.1, б) используется обычно при сварке деталей из цветных металлов и сплавов. В этом случае применяется источник постоянного тока. Дуга горит между свариваемыми деталями 1 и электродом 3 (угольным или графитовым). В зону сварки вводится присадочный пруток 4.

При автоматической и полуавтоматической сварке закрытой дугой под флюсом с плавящимся электродом (рис. 2.1, в) дуга горит под находящимся на свариваемых деталях 1 слоем сыпучего вещества – флюса 6. Голая электродная проволока 3 автоматически подается в зону сварки через флюс с помощью подающего механизма 5. Дуга получает питание от источника 2 переменного или постоянного тока. При сварке под флюсом в зоне сварочной дуги под действием высокой температуры флюс расплавляется и образует своеобразный газовый пузырь. Оболочка 7 последнего надежно защищает расплавленный металл от действия кислорода и азота воздуха. При автоматической сварке автоматизируется и перемещение дуги вдоль свариваемых кромок; при полуавтоматической сварке это перемещение осуществляется вручную. Автоматическая сварка под флюсом дает высокое качество сварного соединения; ее производительность в 6-12 раз выше, чем ручной дуговой сварки.



Р и с. 2.1. Разновидности дуговой сварки

Сварка защищенной дугой в среде защитного газа характерна тем, что в зону сварки специально подают аргон, или смеси его с небольшим количеством активных газов (аргонодуговая сварка), или углекислый газ. Ручная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом (рис. 2.1, г) на постоянном и переменном токе от источника 2 применяется при изготовлении конструкций из нержавеющей и жаропрочных сталей, цветных металлов и их сплавов, при сварке тонкого металла. Вольфрамовый электрод 3 помещен в газоплазменную горелку 8, к которой под давлением подводится газ из баллона. Вытекающая из сопла горелки струя газа 9 защищает в зоне сварки основной металл и металл присадочного прутка 4 от воздействия кислорода и азота воздуха. При автоматической и полуавтоматической сварке в среде аргона или углекислого газа используется плавящийся электрод (рис. 2.1, д). Неизолированная электродная проволока 3 при помощи механизма 5 непрерывно подается через горелку 8 в зону свар-

ки, которая отделена от окружающего воздуха струей газа 9. Сварка в среде аргона производится как на переменном, так и на постоянном токе, сварка в среде углекислого газа (она применяется для сталей любого состава) – на постоянном токе. Сварка в среде углекислого газа для многих видов работ экономически эффективнее других способов сварки.

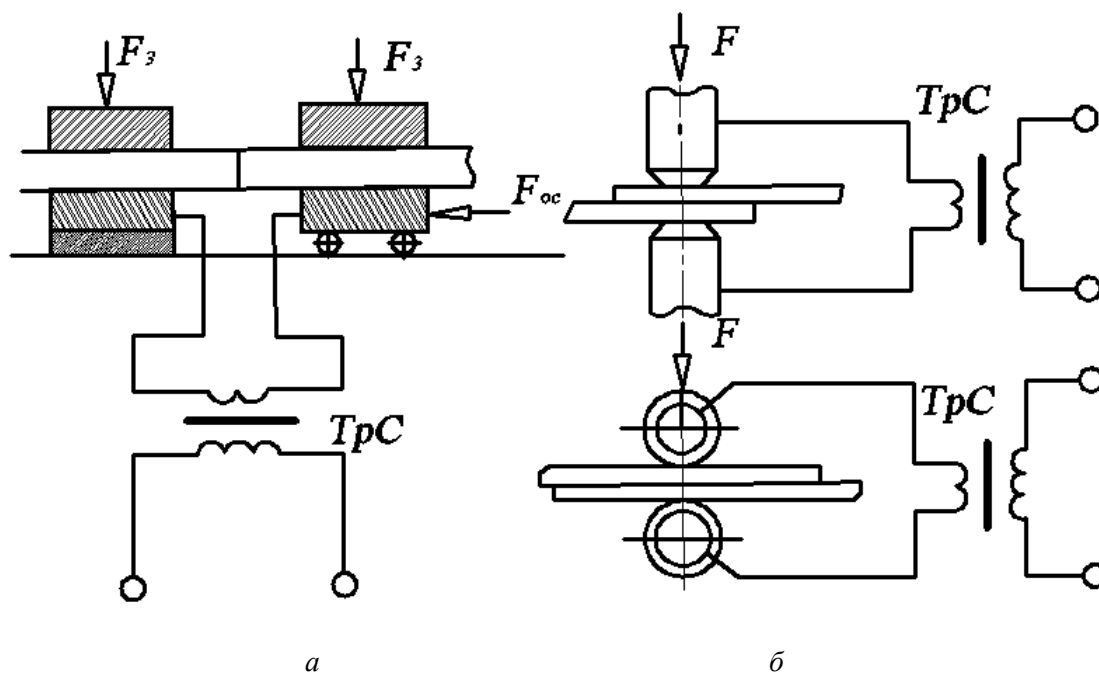
При питании сварочной дуги постоянным током свариваемые детали чаще всего соединяют с положительным полюсом источника, а электрод – с его отрицательным полюсом. Это – так называемая «прямая полярность» сварки. В дуге в области анода выделяется большее количество тепла, чем в области катода, поэтому при сварке с прямой полярностью большую долю тепла получают служащие анодом свариваемые детали, которые обычно массивнее электрода. Но в ряде случаев (при сварке тонких листов, некоторых цветных металлов, при сварке в среде углекислого газа и др.) применяют и «обратную полярность», когда электрод является анодом.

Оборудование для дуговой сварки используется и при резке и наплавке металлов, например, при ручной дуговой резке металлическим или угольным электродом открытой дугой, аргонодуговой резке и наплавке и т. п.

Контактная электросварка имеет следующие разновидности: стыковая сварка, точечная и роликовая (шовная). Сварку производят на контактных машинах переменным однофазным током большого значения (до тысяч и десятков тысяч ампер) при малых напряжениях (единицы вольт) или мощными однополярными импульсами тока (только для точечной и роликовой сварки).

При стыковой сварке (рис. 2.2, а) детали сваривают по всей плоскости их касания. В зависимости от марки металла, площади сечения и требований к качеству соединения процесс стыковой сварки осуществляют по-разному. Для сравнительно малых сечений свариваемых деталей (до 300 мм²) применяют стыковую сварку сопротивлением. Заготовки с механически обработанными и зачищенными торцами устанавливают в стыковую машину и закрепляют усилием

F_3 . После этого их прижимают одну к другой усилием осадки $F_{ос}$ определенного значения и пропускают через них ток от трансформатора TrC . При нагреве металла в зоне сварки до пластического состояния происходит осадка. Ток выключают еще до окончания осадки. При больших сечениях применяют стыковую сварку оплавлением. Ее производят в три стадии: предварительный подогрев, оплавление и окончательная осадка, или только в две последние стадии.



Р и с. 2.2. Разновидности контактной сварки

Предварительный подогрев в зажимах машины выполняют периодическим смыканием и размыканием деталей при постоянно включенном токе. При этом происходит процесс прерывистого оплавления торцов. Затем детали непрерывно медленно сближают; заготовки прогреваются в глубину до пластического состояния, а на торцах возникает тонкий слой расплавленного металла, после чего резко увеличивают скорость сближения, осуществляя осадку небольшим усилием $F_{ос}$. Стыковая сварка оплавлением дает более высокую прочность шва, не требует предварительной механической обработки, позволяет сваривать детали из разнородных металлов.

При точечной сварке листов (рис. 2.2, б) детали соединяют сваркой в отдельных местах, условно называемых точками. Заготовки

устанавливают между электродами точечной машины и плотно сжимают усилием F . Включают ток, и заготовки быстро нагреваются, особенно в месте контакта – чечевицеобразной «точке» под электродами, где металл расплавляется и образуется сварная точка, диаметр которой обычно близок к диаметру электродов. После этого ток выключают и заготовки кратковременно выдерживают между электродами под действием усилия F . Точечная сварка применяется для соединения не только листовых заготовок между собой, но и листовых заготовок со стержнями или уголками, швеллерами и т. п. Свариваемые детали могут быть из однородных и из разнородных металлов. Толщина заготовок – от сотых долей миллиметра до 35 мм. Разновидностью точечной сварки является так называемая рельефная сварка. Она характерна тем, что на одной из заготовок предварительно изготовляют выступы (рельефы) круглой, продолговатой или иной формы. Сварку осуществляют одновременно по всем рельефам или последовательно один за другим.

Роликовая сварка (рис. 2.2, в) заключается в том, что заготовки соединяют непрерывным прочноплотным сварным швом, который состоит из ряда последовательных точек, частично перекрывающих друг друга. Заготовки устанавливают в сварочной машине между роликами, один из которых ведущий, или между одним ведущим роликом и оправкой. На ролики действует усилие F механизма давления, и к ним подведен ток. Наиболее распространены два способа роликовой сварки: 1) прерывистым (импульсным) включением тока при непрерывном вращении роликов; 2) включением тока при неподвижных роликах и вращением роликов при выключенном токе (шаговая сварка).

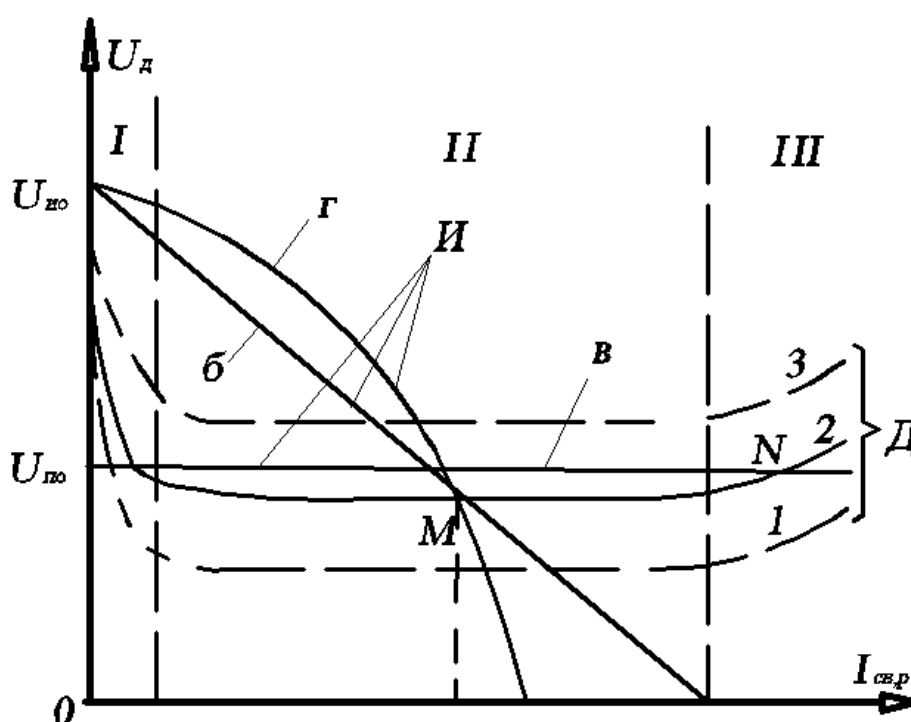
2.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Статические вольт-амперные характеристики сварочной дуги, т. е. зависимости в установившемся процессе сварки напряжения дуги U_d от сварочного тока $I_{св}$ (тока дуги), показаны на рис. 2.3 для трех различных значений длины дуги. В области I , т. е. при малых токах (например, до 100 А для ручной сварки открытой дугой), характери-

стика дуги падающая. При средних значениях тока (например, от 100 до 1000 А для ручной сварки открытой дугой и автоматической сварки под флюсом тонкой проволокой) напряжение дуги практически не зависит от тока (область *II*). В этом случае

$$U_d = a + bl_d,$$

где a и b – постоянные коэффициенты; l_d – длина дуги. Значения U_d обычно лежат в пределах 25-50 В для ручной сварки открытой дугой, 30-40 В для сварки под флюсом и 20-30 В для сварки в среде защитных газов.



Р и с. 2.3. Статические вольт-амперные характеристики сварочной дуги (D) и внешние характеристики источника питания (Γ):

1 – короткая дуга; 2 – средняя дуга; 3 – длинная дуга

При больших токах (свыше 1000 А для автоматической сварки под флюсом толстой проволокой), т.е. в области *III*, дуга имеет возрастающую характеристику. Для сварки в среде защитных газов эта область характеристики начинается при значительно меньших токах.

Сварочная дуга переменного тока менее устойчива, чем дуга постоянного тока. В каждый полупериод переменного тока дуга угасает и вновь зажигается (восстанавливается). Перерывы в горении дуги

будут тем меньше, чем выше напряжение холостого хода источника (при прочих равных условиях).

Для сварки открытой дугой напряжение зажигания U_3 связано с напряжением дуги U_d зависимостью

$$U_3 = 1,3 - 2,5U_d.$$

При сварке на больших токах под флюсом U_3 мало отличается от I_d .

2.2.1. ТРЕБОВАНИЯ К ИСТОЧНИКАМ ПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Устойчивость дуги в процессе сварки зависит от соответствия внешней характеристики источника $U_H = f(I_{CB})$ форме статической характеристики дуги $U_d = f(I_{CB})$ в данном процессе. Внешняя характеристика I источника (рис. 2.3) может быть круто падающей (кривая z), полого падающей (кривая $б$) и жесткой (кривая $в$).

Для ручной дуговой сварки, ряда режимов автоматической сварки под флюсом и некоторых видов сварки в среде защитных газов внешняя характеристика источника должна быть круто падающей. Чем круче характеристика a в рабочей части (точка M на рис. 2.3), тем меньше колебания тока при изменении длины дуги. При таких характеристиках напряжение холостого хода источника U_{H0} , которое по условиям техники безопасности не должно превышать 90 В, всегда больше напряжения дуги U_d , что облегчает первоначальное и повторное зажигание дуги, особенно при сварке на переменном токе. Кроме того, ограничивается ток КЗ I_K который по отношению к рабочему току $I_{CB.P}$ должен находиться в пределах $\frac{I_K}{I_{CB.P}} = 1,25 - 2,0$.

При автоматической сварке под флюсом тонкой проволокой в большинстве случаев используется полого падающая характеристика источника $б$. При сварке в среде защитных газов на постоянном токе для режимов, когда статическая характеристика 2 дуги возрастающая (точка N), целесообразно применение источника с жесткой характеристикой $в$.

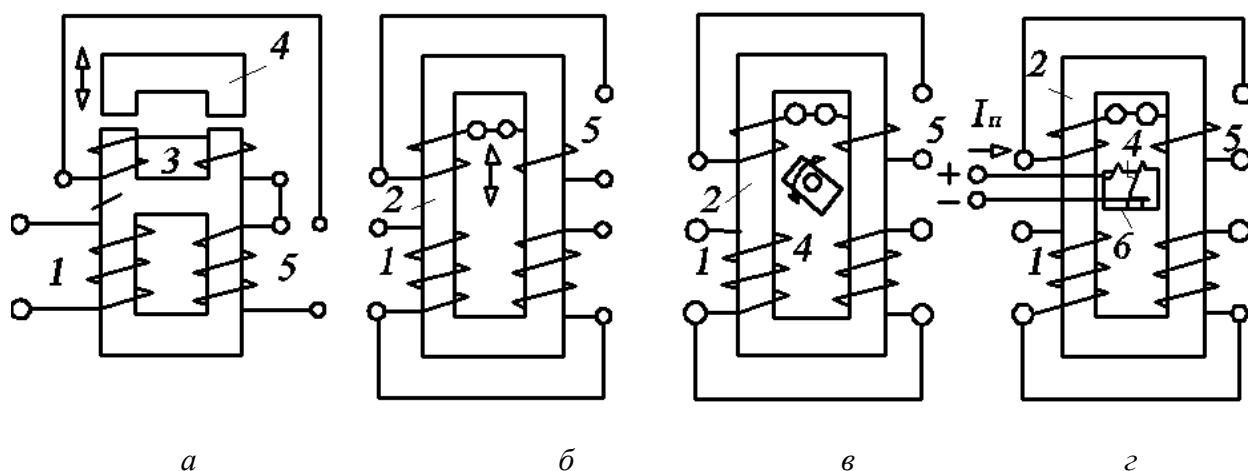
Источники сварочного тока должны обеспечивать возможность настройки различных режимов сварки, т.е. установления выгоднейшего значения рабочего тока $I_{CB.P}$ при заданном напряжении дуги U_d . Поэтому источники тока выполняются регулируемы, позволяя в определенном диапазоне изменений тока и напряжения получить семейство внешних характеристик с плавным или ступенчатым переходом с одной характеристики на другую.

Источники тока в установках ручной дуговой сварки предназначены для работы с одним сварочным постом (однопостовые) или для работы с несколькими постами (многопостовые). Источники для многопостовой сварки должны иметь жесткие внешние характеристики. Каждый пост подключается при этом через свой балластный реостат. Источник питания должен быть рассчитан на определенную номинальную нагрузку $I_{CB.P}$, при которой он может работать, не перегреваясь выше допустимых норм.

Режим работы источника для ручной сварки характеризуется продолжительностью работы ПР – отношением времени сварки t_{CB} ко времени цикла $t_{ц} = t_{CB} + t_{п}$, где $t_{п}$ – время пауз. Обычно ПР выражают в процентах:

$$ПР = (t_{CB} / t_{ц}) \cdot 100\%.$$

Условно за номинальный режим принимают для однопостовых источников $t_{CB} = 3$ мин, $t_{ц} = 5$ мин. Тогда $ПР_{НОМ} = 60\%$. Для многопостовых источников $ПР_{НОМ} = 100\%$.



Р и с. 2.4. Схема устройства сварочных трансформаторов

Номинальный режим работы источников для автоматической и полуавтоматической сварки устанавливаются при продолжительности включения $PВ_{ном} = 60$ или 100% , которая определяется так же, как и ПР, но при $PВ \neq 100\%$ считается, что в периоды пауз источник отключается от сети питания, и время цикла равно 10 мин.

2.3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И КОНСТРУКЦИИ СВАРОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Основными источниками питания для сварки на переменном токе служат однофазные сварочные трансформаторы с первичным напряжением 220 или 380 В. Однопостовые трансформаторы с падающими характеристиками подразделяются на две группы: трансформаторы с нормальным магнитным рассеянием и дополнительной реактивной катушкой – дросселем; трансформаторы с повышенным магнитным рассеянием. Трансформаторы второй группы можно разделить на три основных типа: трансформаторы с подвижными катушками, трансформаторы с магнитным шунтом, трансформаторы с витковым (ступенчатым) регулированием. Схемы устройства современных однопостовых сварочных трансформаторов показаны на рис. 2.4.

В трансформаторах с нормальным магнитным рассеянием и дополнительной реактивной катушкой (рис. 2.4, а) имеется общий магнитопровод с тремя обмотками: первичной 1, вторичной 5 и реактивной 3. Верхняя часть магнитопровода разъемная и имеет подвижный магнитный шунт 4. Изменением положения шунта, т. е. величины зазора в магнитопроводе, можно регулировать вторичный (сварочный) ток. Чем больше зазор, тем большим будет и ток. Перемещение шунта производится электроприводом с дистанционным управлением. По такой схеме изготавливаются трансформаторы типов ТСД (на 500, 1000 и 2000 А) и СТ (на 1000 и 2000 А). Эти трансформаторы (за исключением ТСД-500) имеют несколько ступеней изменения напряжения холостого хода U_{20} путем переключения отпаек вторичной обмотки и предназначены для автоматической сварки под флюсом. Трансфор-

матор ТСД-500 на номинальный ток 500 А при $P_{\text{НОМ}} = 60\%$ с $U_{20} = 80$ В и пределах регулирования сварочного тока от 200 до 600 А используется также и для ручной дуговой сварки.

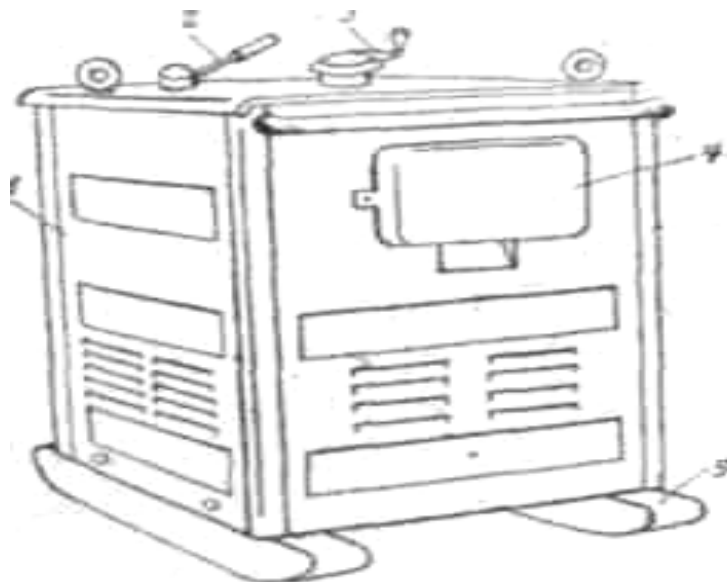
В трансформаторах с подвижными катушками (рис. 2.4, б) для регулирования сварочного тока изменяют расстояние между первичной (неподвижной) 1 и вторичной обмоткой 5. Катушки вторичной обмотки скользят по стержням магнитопровода 2. При сближении обмоток 5 и 1 индуктивность рассеяния уменьшается, что приводит к увеличению сварочного тока. Катушки вторичной обмотки перемещаются вручную при помощи винтового механизма. На таком принципе построено большинство выпускаемых в настоящее время сварочных трансформаторов (типов ТС на токи от 120 до 500 А, ТСК и ТД на токи 300 и 500 А).

Трансформаторы типов ТД-303 (рис. 2.5) и ТД-504 имеют переключатель диапазонов, при помощи которого катушки обеих обмоток переключаются с параллельного соединения на последовательное; это дает два диапазона изменения сварочного тока. Например, трансформатор ТД-504 на номинальный ток 500 А (при $P_{\text{НОМ}} = 60\%$) в диапазоне I позволяет при $U_{20} = 60$ В регулировать сварочный ток от 240 до 750 А, в диапазоне II при $U_{20} = 70$ В – от 75 до 240 А. Номинальное вторичное напряжение $U_{2\text{НОМ}} = 30$ В.

Трансформаторы типов ТС и ТСК (последние отличаются от трансформаторов типа ТС наличием конденсаторов, включенных параллельно первичным обмоткам для повышения $\cos \varphi$), а также типа ТД предназначены для ручной дуговой сварки.

В трансформаторах с магнитным шунтом (рис. 2.4, в) изменение индуктивного сопротивления рассеяния производится при помощи магнитного шунта 4, расположенного в окне магнитопровода 2 между разнесенными катушками первичной 1 и вторичной 5 обмоток. При уменьшении зазора между сердечником и шунтом сварочный ток уменьшается. На этом принципе устроены трансформаторы типа СТШ на токи 250, 300 и 500 А. Некоторые из этих трансформаторов

имеют переключатель соединения катушек обмоток 1 и 5 с параллельного на последовательное, а также устройство, обеспечивающее отключение трансформатора от сети через $0,5-1$ с после прекращения процесса сварки. Трансформаторы типа СТШ предназначены для ручной дуговой сварки и автоматической сварки под флюсом.



Р и с. 2.5. Трансформатор типа ТД-303:
 1 – кожух; 2 – рукоятка переключателя диапазонов;
 3 – маховичок механизма перемещения катушек
вторичной обмотки; 4 – щиток с зажимами для подключения
питания и сварочной цепи; 5 – ползья

Трансформаторы с магнитным шунтом, подмагничиваемым постоянным током (см. рис. 2.4, г), имеют в окне магнитопровода 2 между катушками 1 и 5 шунт 4 , на котором размещена обмотка подмагничивания 6 . Изменяя ток $I_{\text{п}}$ в этой обмотке, можно регулировать индуктивное сопротивление рассеяния основных обмоток. При $I_{\text{п}} = 0$ это сопротивление минимально и сварочный ток наибольший. Увеличение $I_{\text{п}}$ приводит к уменьшению сварочного тока. Подобную конструкцию имеют трансформаторы типов ТДФ-1001 и ТДФ-1601 (соответственно на 1000 и 1600 А при $P_{\text{ВНОМ}} = 100\%$) для автоматической сварки под флюсом. Трансформаторы позволяют осуществить ступенчато-плавное регулирование сварочного тока. Ступенчатое регулирование достигается переключением катушек 5 вторичной об-

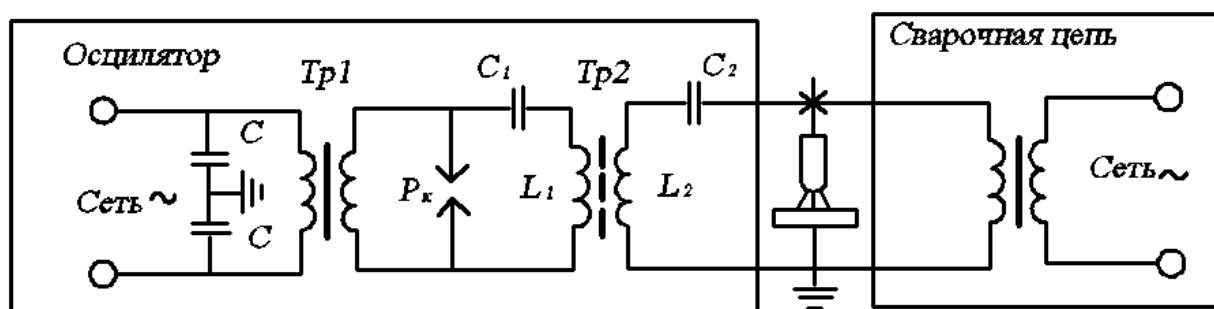
мотки, плавное – изменением тока I_n , для чего обмотка б питается от однофазного тиристорного выпрямителя.

У трансформаторов с витковым регулированием (например, типа ТСП-1 на 180 А при ПР=50%) вторичная обмотка секционирована, а повышенное рассеяние достигается размещением первичной и большей части вторичной обмотки на разных стержнях.

Все сварочные трансформаторы имеют естественное воздушное охлаждение и заключены в металлический кожух, установленный на двух или четырех катках или на двух ползьях (рис. 2.5).

2.4. ОСЦИЛЛЯТОР

Осциллятор предназначен для питания сварочной дуги токами высокой частоты и высокого напряжения параллельно со сварочным трансформатором, что облегчает зажигание дуги и повышает ее устойчивость. Мощность осциллятора составляет всего 100-250 Вт. Частота тока 150-260 кГц и напряжение 2-3 кВ дают возможность зажигать дугу даже без соприкосновения электрода с деталью. В то же время ток такой частоты и напряжения безопасен для человека.



Р и с. 2.6. Электрическая схема осциллятора

Схема осциллятора (рис. 2.6) содержит: низкочастотный повышающий трансформатор $Tr1$ высокочастотный трансформатор $Tr2$ с обмотками, имеющими катушки индуктивности $L1$ и $L2$; разрядник Pk ; конденсаторы $C1$ и $C2$. Напряжение вторичной обмотки $Tr1$, изменяясь по синусоиде, заряжает конденсатор $C1$ и при некотором своем значении вызывает пробой разрядника Pk . В результате колебательный контур $L1$,

$C1$ оказывается практически закороченным и в нем возникают затухающие колебания высокой частоты. Через обмотку $L2$ и защитный конденсатор $C2$ эти колебания прикладываются к дуговому промежутку. Такую схему включения осциллятора называют параллельной, поскольку колебательный контур осциллятора по отношению к дуге включен параллельно с источником питания – сварочным трансформатором TrC . Конденсаторы C включены в первичную цепь трансформатора $Tr1$ для уменьшения помех радиоприему.

Осцилляторы применяют при сварке дугой малой мощности, при ручной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом, при значительном падении напряжения в силовой сети 380 В и в ряде других случаев.

3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

3.1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА (ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ)

Измерительные трансформаторы применяются для расширения пределов измерения электроизмерительных приборов в цепях переменного тока и обеспечения безопасности обслуживания последних в сетях высокого напряжения. Кроме того, измерительные трансформаторы используются для включения приборов релейной защиты.

Измерительный трансформатор напряжения применяется при измерениях в сетях переменного тока напряжением свыше 220 В. Трансформатор напряжения представляет собой понижающий трансформатор (рис. 3.1, а) с таким отношением витков в первичной и во вторичной обмотках, чтобы при номинальном первичном напряжении вторичное напряжение составляло 100 В. Во вторичную цепь трансформатора напряжения включаются вольтметры, частотомеры и обмотки напряжения ваттметров, счетчиков энергии и фазометров. Так как электрическое сопротивление этих приборов велико (порядка тысяч Ом), то трансформатор напряжения обычно работает в режиме, близком к режиму холо-

стого хода. Это дает возможность пренебречь падением напряжения в обмотках и принять

$$U_1 = -E_1; U_2 = E_{2H};$$

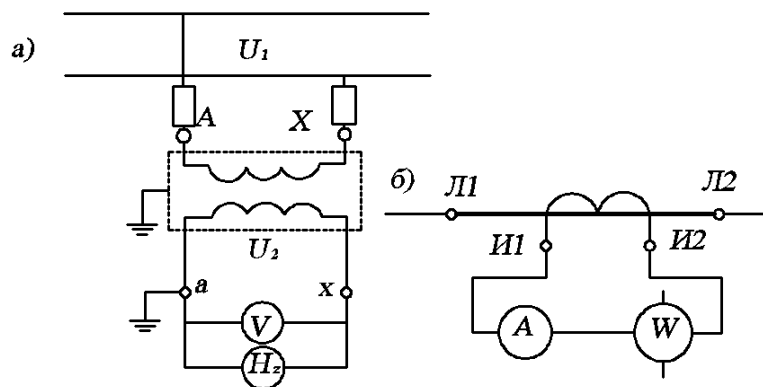
а так как $E_1 = \frac{w_1}{w_2} E_2$, то напряжение в первичной обмотке

$$U_1 = \frac{w_1}{w_2} U_2 = K_H U_2.$$

Здесь K_H – коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

Измерительные трансформаторы изготавливаются однофазными и трехфазными на первичное напряжение от 380 до 400 000 В. В трехфазных измерительных трансформаторах напряжения применяется группа соединения 12.

При напряжении до 3000 В трансформаторы напряжения делаются сухими.



Р и с. 3.1. Схемы измерительных трансформаторов напряжения (а) и тока (б)

При напряжениях более 3000 В трансформаторы напряжения делаются масляными, что необходимо для большей электрической прочности изоляции обмоток.

В целях безопасности один из выводов вторичной обмотки и кожух трансформатора напряжения заземляются. Измерительный трансформатор тока применяется для включения амперметров и обмоток тока ваттметров, счетчиков энергии и фазометров.

Первичная обмотка трансформатора тока выполняется из провода большого сечения и включается в сеть последовательно (рис. 3.1, б). Количество витков в обмотках трансформатора выбирается таким, чтобы при номинальном токе в первичной обмотке ток во вторичной цепи был 5 А.

Так как электрическое сопротивление приборов, включаемых во вторичную цепь, незначительно, то режим работы трансформатора тока близок к режиму короткого замыкания, при котором магнитный поток в магнитопроводе настолько мал, что им можно пренебречь. Тогда, по аналогии с уравнением токов, для опыта короткого замыкания можно записать следующее равенство для трансформатора тока:

$$I_1 = -I_2' = -\frac{w_2}{w_1} I_2,$$

откуда

$$I_1 = K_T I_2,$$

где K_T – коэффициент трансформации трансформатора тока.

При включении трансформатора тока в сеть заземляются кожух и один вывод вторичной обмотки.

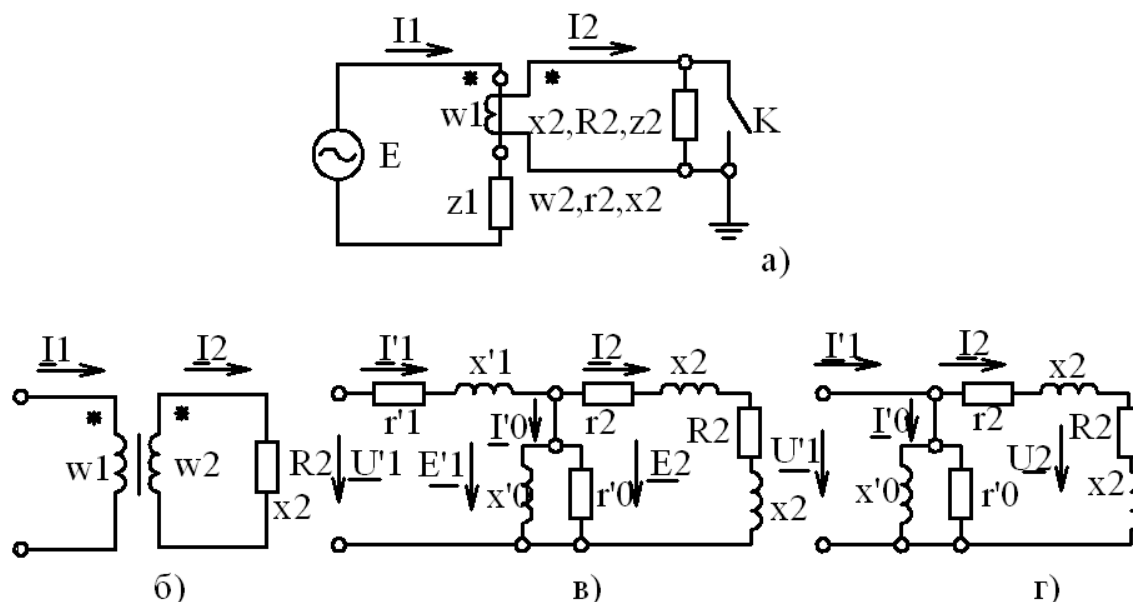
Если во время работы трансформатора тока разомкнуть его вторичную обмотку, то ток в ней станет равным нулю, а первичный ток останется прежним. При этом он будет полностью намагничивающим и вызовет значительное увеличение магнитного потока. Магнитные потери возрастут пропорционально квадрату потока, что приведет к перегреву магнитопровода, опасному для целостности изоляции. В итоге это может привести электрическую линию к короткому замыканию на землю. Кроме того, ЭДС вторичной обмотки возрастет пропорционально магнитному потоку и достигнет значений, опасных для обслуживающего персонала. Поэтому размыкание вторичной цепи трансформатора тока при наличии тока в первичной обмотке является недопустимым. При необходимости отключения прибора нужно зажимы вторичной обмотки трансформатора тока замкнуть накоротко.

3.2. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА

3.2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для удобства измерения тока в установках высокого напряжения и изоляции измерительных приборов и устройств релейной защиты от высокого напряжения служат трансформаторы тока (ТТ). ТТ имеет замкнутый магнитопровод с двумя обмотками. Через первичную обмотку пропускается измеряемый ток, вторичная обмотка подключается к измерительным приборам или реле. Первичная обмотка изолирована от вторичной в соответствии с классом изоляции аппарата. Один вывод вторичной обмотки обязательно заземляется.

В случае повреждения изоляции приборы и реле остаются под потенциалом земли. Схема включения трансформатора тока ТА показана на рис. 3.2, а. В цепь вторичной обмотки включаются измерительные приборы или реле, являющиеся нагрузкой ТТ (R_2, X_2, Z_2). Ток I_1 в первичной обмотке ТТ определяется сопротивлением Z_1 , которое на несколько порядков выше, чем входное сопротивление ТТ при любом сопротивлении нагрузки Z_2 . Для анализа работы ТТ целесообразно перейти от схемы замещения с магнитной связью обмоток (рис. 3.2, б) к схеме замещения с электрической связью обмоток (рис. 3.2, в). При этом параметры ТТ приводятся ко вторичной обмотке. На этой схеме r'_1, x'_1 – параметры первичной обмотки, приведенные ко вторичной обмотке; r_2 – активное сопротивление вторичной обмотки, x_2 – индуктивное сопротивление вторичной обмотки; R_2, X_2 – параметры нагрузки и r'_0, x'_0 – параметры ветви намагничивания. В качестве коэффициента приведения параметров схемы ко вторичной обмотке применено отношение числа витков w_2/w_1 . При таком коэффициенте приведения значение x_2 может быть отрицательным. Параметр x_2 в Т-образной схеме замещения является чисто расчетным, и отрицательный знак не имеет физического смысла.



Р и с. 3.2. Схемы включения и замещения трансформатора тока

Поскольку r_1' и x_1' включены последовательно с большим сопротивлением Z_1 , то на работу ТТ они не влияют и схема замещения принимает вид, показанный на рис. 3.2, г.

Основными параметрами ТТ являются следующие.

1. *Номинальное напряжение* – линейное напряжение энергосистемы, в которой ТТ должен работать. Это напряжение определяет изоляцию между первичной обмоткой, находящейся под высоким потенциалом, и вторичной, один конец которой заземлен.

2. *Номинальный первичный и вторичный токи* $I_{1ном}, I_{2ном}$ – длительные токи, которые аппарат может пропускать. ТТ обычно имеют запас по нагреву и позволяют длительно пропускать токи, которые примерно на 20% выше номинального значения. Номинальный вторичный ток ТТ принимается равным 1 или 5 А.

3. *Номинальный коэффициент трансформации* – отношение номинальных значений первичного и вторичного токов:

$$K_{ном} = I_{1ном} / I_{2ном}.$$

Действительный коэффициент трансформации не равен номинальному вследствие погрешности, вызываемой потерями в трансформаторе.

4. *Токовая погрешность* в процентах определяется выражением

$$\Delta I = \frac{K_{ном} I_2 - I_1}{I_1} 100 = \frac{I_2 - I_1'}{I_1'} 100,$$

где I_2 – вторичный ток; I_1' – первичный приведенный ток.

В соответствии с ГОСТ 7746–78 приняты следующие условные положительные направления токов: первичного тока – ток втекает в начало первичной обмотки, вторичного – ток вытекает из начала вторичной обмотки (рис. 3.2, б). Обе обмотки намотаны в одну сторону. При таком положительном направлении токов в ТТ без погрешностей векторы вторичного I_2 и первичного I_1 токов совпадают по фазе. В реальном ТТ между векторами I_1 и I_2 существует угол, который называется угловой погрешностью и измеряется в минутах. Если вторичный ток опережает первичный, то погрешность по углу положительная. Угловую погрешность необходимо учитывать при определении активной мощности цепи, равной $UI \cos \varphi$, где φ – угол между током I и напряжением U , а также при измерениях энергии и в ряде релейных защит, работа которых зависит от угла φ . Классы точности и нормированы. Класс точности трансформатора определяется его погрешностью по току в процентах при первичном токе, равном $100\text{--}120\% I_{\text{НОМ}}$.

В зависимости от погрешности по ГОСТ 7746–78 различают классы точности 0,2; 0,5; 1; 3; 5; 10.

Наряду с токовой и угловой погрешностью ГОСТ 7746–78 предусмотрена полная погрешность ε , ‰; она характеризует относительный намагничивающий ток:

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (k_{\text{НОМ}} i_2 - i_1)^2 dt},$$

где I_1 – действующее значение первичного тока; i_2 – мгновенное значение вторичного тока; i_1 – мгновенное значение первичного тока; T – период частоты переменного тока (0,02 с).

5. *Номинальная нагрузка ТТ* – сопротивление нагрузки $Z_{2\text{НОМ}}$, Ом, при котором ТТ работает с заданным классом точности при номинальном значении $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$. Иногда применяется понятие номинал:

$$P_{2\text{НОМ}} = I_{2\text{НОМ}}^2 Z_{2\text{НОМ}}.$$

Поскольку значение тока $I_{2\text{НОМ}}$ стандартизовано, то номинальное сопротивление нагрузки однозначно определяет и номинальную мощность трансформатора.

6. *Номинальная предельная кратность* – кратность первичного тока по отношению к его номинальному значению, при которой полная погрешность достигает 5 или 10%. Соответственно, ТТ имеют класс точности 5Р и 10Р. Нагрузка и ее коэффициент мощности должны быть номинальными.

7. *Максимальная кратность вторичного тока* – отношение наибольшего вторичного тока к его номинальному значению при номинальной вторичной нагрузке. Максимальная кратность вторичного тока определяется насыщением магнитопровода, когда дальнейшее возрастание первичного тока не ведет к возрастанию потока.

В аварийном режиме ТТ обтекаются током КЗ и их обмотки подвергаются воздействию больших токов.

8. *Динамическая стойкость ТТ* (кратность) определяется отношением допустимого ударного тока КЗ к амплитуде номинального первичного тока.

9. *Термическая стойкость (кратность)* задается отношением допустимого в течение 1 с тока КЗ к номинальному значению первичного тока.

Так как ток первичной обмотки задается сетью, то наибольшим термическим и динамическим воздействиям подвергается первичная обмотка. Вторичный ток часто ограничивается насыщением магнитопровода, и поэтому вторичная обмотка работает в облегченных условиях.

3.2.2. ПОГРЕШНОСТИ ТТ, ЗАВИСИМОСТЬ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

3.2.2.1. ЗАВИСИМОСТЬ ПОГРЕШНОСТИ ОТ ПЕРВИЧНОГО ТОКА

В процессе работы первичный ток ТТ изменяется в широких пределах – примерно от 5% $I_{ном}$ до тока КЗ. Ради упрощения можно положить, что $\sin(\alpha + \psi) = 1$. Тогда

$$\Delta I = I_0 w_1 / F_1.$$

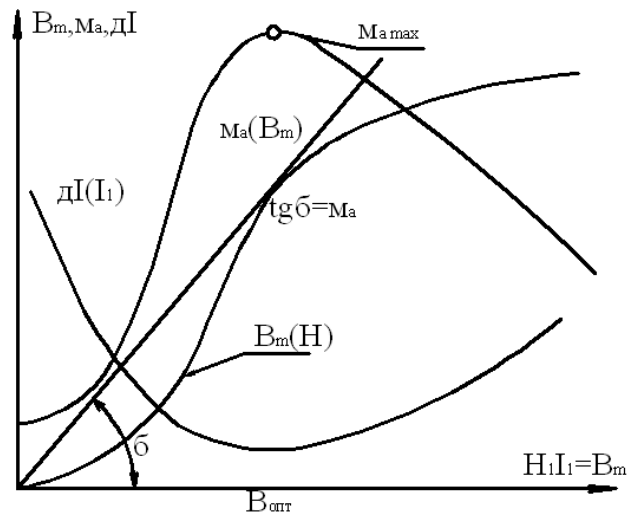
Так как $I_1 w_1 \approx I_2 w_2$, то
$$\Delta I = \frac{Z_{02}}{4,44 w_2^2 \mu_a S}.$$

При изменении первичного тока изменяется только проницаемость μ_a .

Если $F_1 \approx F_2$, то $F_1 = F_2 = \frac{4,44 f w_2^2 S}{Z_{O2}} B_m$, т.е. с ростом первичного тока

индукция в магнитопроводе растет линейно.

Абсолютная магнитная проницаемость материала μ_a и индукция B_m связаны кривой $\mu_a(B_m)$ на рис. 3.3. На том же рисунке приведена кривая $B_m(H)$. С ростом первичного тока вначале μ_a увеличивается и погрешность падает, достигая при $B_{опт}$ минимального значения. При дальнейшем росте первичного тока проницаемость падает из-за насыщения магнитопровода, а погрешность ΔI увеличивается.

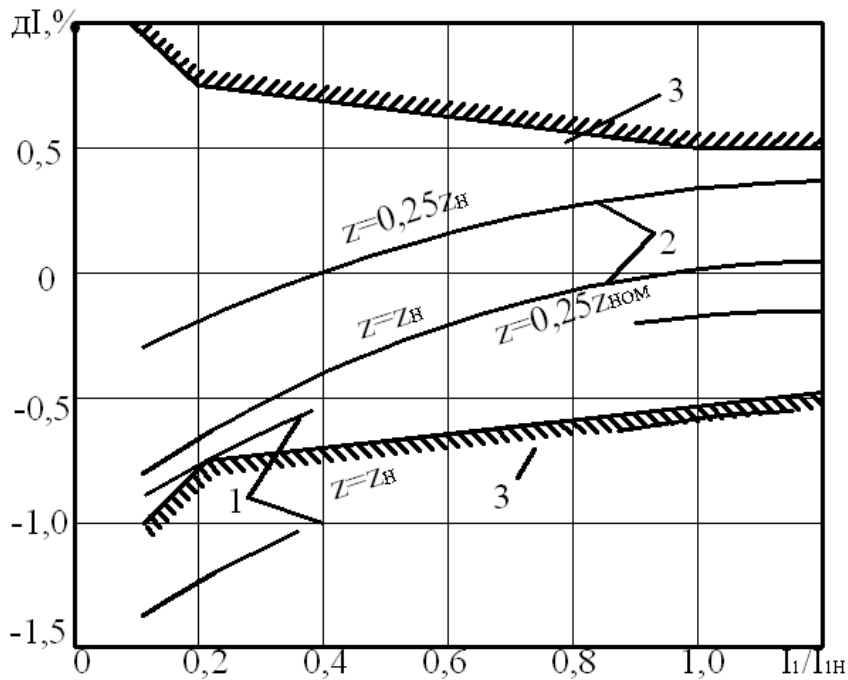


Р и с. 3.3. Зависимость погрешности ТТ от первичного тока

ТТ не должен иметь больших погрешностей при номинальном токе и токе КЗ. Так как индукция насыщения лежит в области 2 Тл, то в нескомпенсированных ТТ номинальное значение индукции выбирают в пределах 0,06-0,1 Тл. В силовых трансформаторах индукция выбирается 1,45-1,7 Тл и при работе она меняется мало.

При отсутствии компенсации погрешность по току всегда отрицательна и с ростом первичного тока изменяется по U-образной кривой. Аналогично зависит от тока угловая погрешность, но она имеет положительный знак.

Для получения определенного класса точности погрешность ТТ должна находиться в допустимых пределах. Так, погрешности для ТТ класса точности 0,5 должны лежать внутри области, ограниченной ломаными линиями 3 (рис. 3.4) при нагрузке $(0,25 - 1)Z_{2 \text{ ном}}$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$.



Р и с. 3.4. Компенсация погрешностей ТТ
отмоткой вторичных витков

Для магнитных материалов, применяемых в ТТ, в рабочем диапазоне индукций (0,06-0,1 Тл) кривую намагничивания можно аппроксимировать уравнением

$$H = 0,82B_m^{0,6}.$$

Из математических преобразований следует, что погрешность по току резко возрастает при уменьшении номинальной первичной МДС $I_{НОМ} w_1$.

Наиболее рациональна конструкция ТТ с одновитковой первичной обмоткой в виде шины или стержня. Однако для получения высокого класса точности (классы 1; 0,5) первичная номинальная МДС должна быть не ниже определенной величины. Для современных магнитных материалов и разработанных одновитковых конструкций при классе точности 0,5 минимальный первичный ток должен быть не менее 400-900 А. При токах менее 400 А первичная обмотка выполняется многовитковой.

3.2.2.2. ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ

Увеличение нагрузки Z_2 ведет к росту сопротивления Z_{02} . В соответствии с приведенными выражениями погрешность возрастает пропорционально $Z_{02}^{0,6}$. С целью снижения погрешности необходимо

уменьшать активное r_2 и реактивное x_2 сопротивления вторичной обмотки. При уменьшении Z_{02} , допустим, в 2 раза уменьшаются в 2 раза ЭДС E_2 и индукция B_m . При этом упадут напряженность поля H и МДС $I_0 w_1$. В соответствии с равенством $F_2 \approx F_1 - I_0 w_1$ вторичный ток увеличится из-за уменьшения $I_0 w_1$. При изменении сопротивления нагрузки вблизи номинального значения $Z_{2НОМ}$ изменение вторичного тока незначительно, так как он определяется током I_1 .

3.2.2.3. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

В соответствии с приведенными соотношениями погрешность возрастает пропорционально длине магнитопровода l . Поэтому длину l стремятся сократить. Увеличение сечения магнитопровода S уменьшает погрешность, однако Δl уменьшается медленнее, чем растет сечение. Следует также отметить, что с ростом сечения увеличиваются средняя длина витка обмотки и ее активное сопротивление, что вызывает некоторое увеличение погрешности. Так как при этом повышается масса стали, меди и ТТ в целом, увеличение сечения магнитопровода не всегда рационально.

При прочих равных условиях переход на материал с большей магнитной проницаемостью уменьшает погрешность. Применение изоляционных материалов с улучшенными свойствами (эпоксидных смол, бумажно-масляной изоляции, элегаза) дает возможность уменьшить длину l , а следовательно, и погрешность.

3.2.3. КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ

Для снижения погрешностей применяется их компенсация. Различают компенсацию токовой и угловой погрешностей. Чаще всего необходима компенсация токовой погрешности. Эта компенсация выполняется для диапазона $(0,1 \div 1,2)I_{1НОМ}$ и применяется в ТТ, используемых для измерений. В ТТ, используемых для релейной защиты, компенсация погрешности применяется реже.

Простейшим методом компенсации токовой погрешности является витковая коррекция. Если $w_2 = w_{2НОМ} = w_{1НОМ} k_{НОМ}$, то погрешность всегда имеет отрицательный знак и определяется приведенными уравнениями.

Если число витков вторичной обмотки уменьшить (отмотать), то при $w_2 < w_{2НОМ}$ коэффициент трансформации становится меньше, а вторичный ток $I_2 = I_1 w_1 / w_{2НОМ}$ может быть больше, чем $I_{2НОМ}$. Так создается положительная погрешность по току, частично компенсирующая отрицательную.

Таким образом осуществляется витковая коррекция. На рис. 3.4 кривые 1 относятся к трансформатору без компенсации, а кривые 2 – к тому же трансформатору после отмотки вторичных витков. При отмотке вторичных витков кривая погрешности перемещается параллельно самой себе в область меньших погрешностей и при большом токе может быть даже положительной. Если вторичная нагрузка мала ($0,25Z_{НОМ}$), то погрешность может выйти из допустимых пределов данного класса.

Наибольшую компенсацию необходимо вводить при малых первичных токах. Однако при этом в области номинальных токов при малых нагрузках появляется положительная погрешность, выходящая за пределы класса. Поэтому витковая коррекция не всегда эффективна, что является ее недостатком.

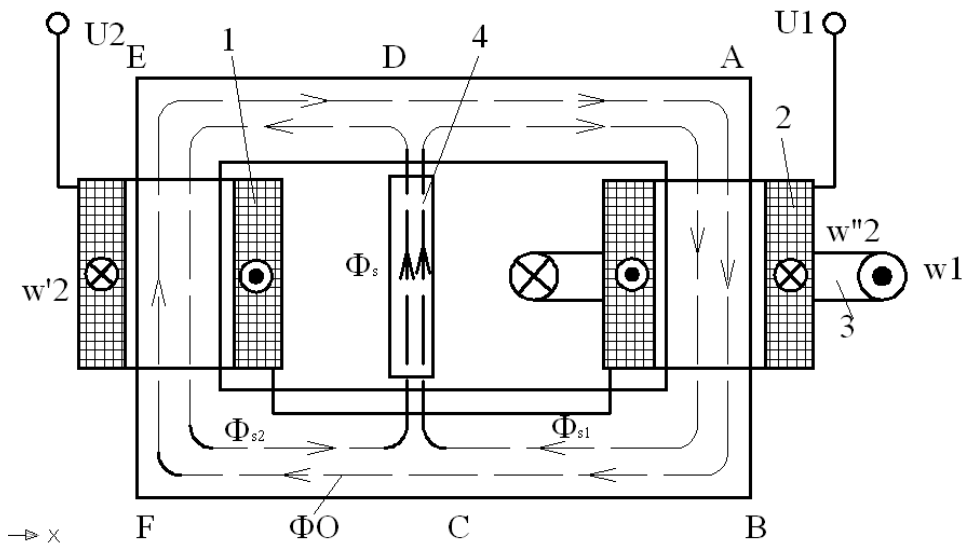
На угловую погрешность отмотка вторичных витков не оказывает влияния. Для уменьшения угловой погрешности на магнитопроводе ТТ устанавливается короткозамкнутый виток. Введение такого витка вызывает увеличение активных потерь в магнитопроводе и реактивного магнитного сопротивления X_{mcc} , и в результате возрастает угол потерь. При этом угловая погрешность падает, а погрешность по току увеличивается. Такую компенсацию целесообразно применять, когда по токовой погрешности имеется запас.

Существуют и другие методы компенсаций. Широко применяется метод шунта (метод МЭИ), заключающийся в повышении магнитной проницаемости путем подмагничивания магнитопровода ТТ полями рассеяния (рис. 3.5). Вторичная обмотка выполнена в виде согласно соединенных катушек 1 и 2 с числом витков w_2 и w_3 соответственно. Первичная обмотка 3, имеющая w_1 витков, расположена на правом стержне. Внутри магнитопровода располагается магнитный

шунт 4. Если пренебречь намагничивающим током, то можно написать

$$Iw_1 - I_2w_2' - I_2w_2'' = 0.$$

Распределение вторичной обмотки по двум стержням и установка шунта 4 создают увеличенные потоки рассеяния. На левом стержне при прохождении тока I_2 создается МДС I_2w_2' . Эта МДС создает поток рассеяния Φ_{s2} , который замыкается через шунт. На правом стержне действует МДС, равная $I_1w_1 - I_2w_2''$. Под действием этой МДС возникает поток рассеяния Φ_{s1} , который также проходит через шунт 4. Выбрав соответствующим образом магнитное сопротивление шунта, можно даже при малых первичных токах перевести рабочую точку в область с высоким μ_a и понизить магнитное сопротивление магнитопровода.



Р и с. 3.5. Трансформатор тока с компенсацией погрешности увеличением потоков рассеяния

В результате МДС, необходимая для проведения потока Φ_0 , резко падает, что ведет к уменьшению как токовой, так и угловой погрешностей ТТ. При токах, близких к номинальному и превышающих его, происходит насыщение шунта и компенсация перестает действовать. Наряду с повышением магнитной проницаемости магнитопровода положительную роль в снижении погрешности играет также уменьшение индуктивного сопротивления вторичной обмотки x_2 в результате так называемого двойного рассеяния. Применение высококаче-

ственных магнитных материалов типа стали марки 3413, пермаллоя и др. с высокой магнитной проницаемостью и малыми активными потерями позволяет создавать малогабаритные $ТТ$ с малой погрешностью и без применения компенсации.

3.2.4. РЕЖИМЫ РАБОТЫ $ТТ$

3.2.4.1. РАБОТА $ТТ$ ПРИ КЗ В КОНТРОЛИРУЕМОЙ СЕТИ.

Трансформаторы тока являются одним из основных звеньев релейной защиты. Поэтому они должны быть термически и динамически стойкими и обладать погрешностью, обеспечивающей нормальную работу релейной защиты. При больших кратностях первичного тока магнитопровод $ТТ$ насыщается и погрешность резко растет. Практика показала, что если полная погрешность достигла 10%, то при дальнейшем возрастании первичного тока она столь быстро увеличивается, что нормальная работа релейной защиты невозможна.



Р и с. 3.6. Зависимость номинальной предельности кратности от сопротивления нагрузки

Поэтому номинальная предельная кратность $ТТ$ должна быть выше отношения тока КЗ к номинальному. Типичная зависимость номинальной предельной кратности от сопротивления нагрузки показана на рис. 3.6. Уменьшая сопротивление нагрузки, можно увеличи-

вать номинальную предельную кратность. Трансформаторы, предназначенные для дифференциальной защиты, выбираются с одинаковой номинальной предельной кратностью. При этом ток небаланса защиты, равный разности вторичных токов трансформаторов (при одинаковом первичном токе), получается небольшим.

При КЗ вследствие насыщения магнитопровода кривая вторичного тока резко отличается от синусоиды. Приближенно максимальную кратность вторичного тока можно найти

$$n_{\text{МАКС}} = \frac{B_s}{B_{\text{НОМ}}} + (2 \div 3),$$

где B_s – индукция насыщения (для электротехнической стали $B_s=2$ Тл); $B_{\text{НОМ}}$ – амплитуда индукции при номинальном первичном токе.

Трансформаторы с многовитковой первичной обмоткой при КЗ в контролируемой сети подвергаются повышенной электрической нагрузке. Индуктивное сопротивление такой обмотки соизмеримо с сопротивлением остальной короткозамкнутой цепи. При этом на обмотку может ложиться существенная часть напряжения сети, вследствие чего возможен пробой междувитковой изоляции.

3.2.4.2. РАБОТА ТТ ПРИ НАЛИЧИИ В ТОКЕ КЗ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

До сих пор рассматривался установившийся режим, когда в первичной обмотке ТТ протекает синусоидальный ток неизменной амплитуды. В действительности начало КЗ характеризуется переходным процессом при наличии апериодической составляющей тока. Наиболее тяжелый случай для ТТ возникает, когда начальное значение апериодической составляющей равно амплитуде переменной составляющей (полная апериодическая составляющая):

$$i_1 = -I_{\text{ПЕР}m} \cos \omega t + I_{\text{ПЕР}m} e^{-t/T_1},$$

где $I_{\text{ПЕР}m}$ – амплитуда периодической составляющей тока; T_1 – постоянная времени цепи КЗ.

Примем, что магнитопровод ненасыщен, его магнитная проницаемость μ_a постоянна и индуктивность цепи намагничивания $L_0 = \text{const}$. Для упрощения положим, что нагрузка чисто активная ($Z = R_H$)

и сопротивление обмотки $x_2 = 0$. Для схемы замещения рис. 3.2, z можно написать

$$L'_0 \frac{di'_0}{dt} = i_2(r_2 + R_H); \quad i_2 = i'_1 - i'_0;$$

$$i'_1 = i_1 w_1 / w_2; \quad i'_0 = i_0 w_1 / w_2;$$

$$I'_1 = -I_{\text{ПЕР}m} \cos \omega t + I'_{\text{ПЕР}m} e^{-t/T},$$

где L'_0 – индуктивность цепи намагничивания, приведенная ко вторичной обмотке; i'_0 и i'_1 – намагничивающий и первичный токи, приведенные ко вторичной обмотке; i_2 – вторичный ток r_2 -активное сопротивление вторичной обмотки; R_H – сопротивление нагрузки; $I'_{\text{ПЕР}m}$ – амплитуда переменной составляющей первичного тока, приведенная ко вторичной обмотке.

Решение этой системы дает мгновенные значения токов i_0 и i_2 .

За угловую погрешность в переходном режиме принимается фазовый сдвиг в градусах (или миллисекундах) между моментами прохождения через нуль вторичного и первичного токов. В переходном режиме угловая (фазовая) погрешность будет различной при каждом прохождении тока через нуль из-за наличия меняющейся во времени составляющей намагничивающего тока. На практике довольно часто амплитуда апериодической составляющей тока намагничивания в несколько десятков раз больше амплитуды периодической составляющей, причем магнитопровод насыщается под действием индукции даже при небольшой кратности первичного тока. При этом возникают большие погрешности по току и углу, осложняющие работу релейной защиты. Для снижения погрешностей ТТ выполняются с немагнитным зазором, наличие которого предотвращает насыщение магнитопровода под воздействием апериодической составляющей индукции. Исследованиями МЭИ установлена возможность создания ТТ для измерения больших переменных токов (100-120 кА) в переходных режимах. Ниже приводятся некоторые результаты этих исследований.

1. ТТ с тороидальным магнитопроводом и большим числом вторичных витков может иметь большое отрицательное значение индук-

тивного сопротивления x_2 даже при равномерном распределении витков вторичной обмотки на магнитоприводе. Хотя это сопротивление является чисто расчетным параметром, его наличие ухудшает работу ТТ, так как в магнитоприводе увеличивается индукция.

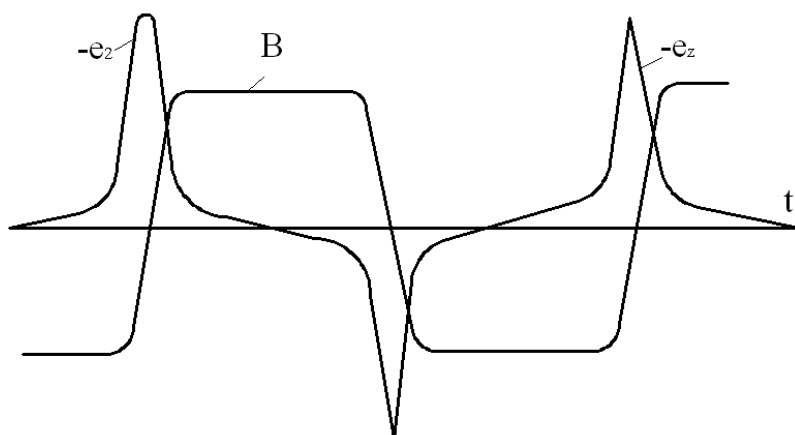
2. Сопротивление $x_2 = \omega L_{2T}$ можно уменьшить увеличением числа немагнитных зазоров и увеличением внутреннего радиуса при сохранении его сечения.

3.2.4.3. РАБОТА ТТ ПРИ РАЗОМКНУТОЙ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКЕ

При эксплуатации ТТ возможны случаи, когда вторичная обмотка оказывается разомкнутой. В нормальном режиме МДС $I_0 w$ составляет проценты или даже доли процента МДС F_1 . Амплитуда магнитной индукции составляет 0,06-0,1 Тл.

При размыкании вторичной обмотки $F_2 = 0$ размагничивающее действие вторичной МДС прекращается. Ток в первичной цепи остается неизменным, и первичная МДС целиком идет на намагничивание магнитоприводе. Это приводит к его насыщению и появлению высокой ЭДС на разомкнутой вторичной обмотке.

Примерные кривые изменения индукции B и вторичной ЭДС e_2 показаны на рис. 3.7. Чем больше первичная номинальная МДС $I_{НОМ} w_1$, тем больше амплитудное значение e_2 , которое может достигать десятка кВ. Такое напряжение опасно для изоляции трансформатора и обслуживающего персонала.



Р и с. 3.7. Изменение индукции B и вторичной ЭДС E во времени при разомкнутой вторичной обмотке

При насыщении магнитопровода в нем резко возрастают активные потери, за счет которых температура изоляции может существенно превысить допустимые значения.

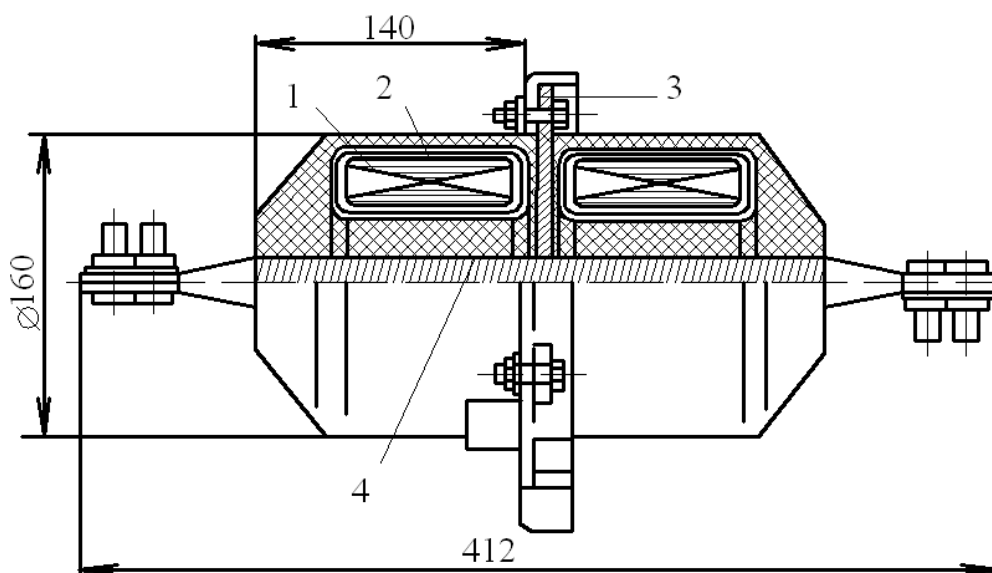
Режим разомкнутой вторичной обмотки является для трансформатора тока аварийным, что необходимо предусматривать при проектировании цепей релейной защиты.

Обычно вторичная обмотка выводится на дополнительные контакты K с перемычкой. Перед отключением от вторичной обмотки измерительного прибора она вначале шунтируется этой перемычкой.

3.2.5. КОНСТРУКЦИЯ ТТ

Различают одновитковые и многовитковые трансформаторы тока. В одновитковом ТТ первичная обмотка может быть выполнена в виде стержня, шины или пакета шин. Примером такого исполнения является трансформатор типа ТПОЛ-Ю с номинальным напряжением 10 кВ (рис. 3.8), который используется как проходной изолятор при переходе линии из одного помещения в другое.

Применение литой эпоксидной изоляции позволяет сильно упростить конструкцию и технологию производства по сравнению со сборными ТТ с фарфоровой изоляцией. Первичная обмотка-стержень 4, магнитопроводы 1 и крепежное кольцо 3 устанавливаются в специальную форму и заливаются жидкой смесью эпоксидной смолы, пылевидного кварцевого песка и отвердителя. После затвердения и полимеризации эта смесь приобретает высокие электрические и механические свойства. По сути дела ТТ (рис. 3.8) имеет два независимых трансформатора, параметры которых могут быть различными. Магнитопроводы трансформатора выполняются в виде двух тороидальных сердечников, навитых лентой из текстурованного материала, например, марки 3413. Если вторичная обмотка 2 равномерно распределена на тороидальном магнитопроводе, то ее индуктивное сопротивление x_2 в схеме замещения равно нулю, что позволяет снизить погрешность измерения ТТ.



Р и с. 3.8.Одновитковый ТТ типа ТПОЛ-Ю

Конструкция допускает установку нескольких ТТ с разными параметрами на одной стержневой первичной обмотке.

Электродинамическая стойкость одновитковых ТТ достаточно высока, так как на первичную обмотку действуют силы только от подводящих шин и соседних фаз.

При трехфазном КЗ между стержнями первичных обмоток соседних фаз возникает электродинамическая сила. Кроме того, на конец стержня передаются силы, действующие на подводящую шину, которая одним своим концом укреплена на ближайшем опорном изоляторе, вторым – на стержне ТТ. Электродинамическая стойкость, гарантированная заводом-изготовителем, относится обычно к определенному расстоянию между фазами и определенной длине шины, соединяющей опорный изолятор с ТТ. Недостаток одновитковых ТТ заключается в большой погрешности при малом номинальном первичном токе, поскольку $w_1 = 1$. Поэтому одновитковые ТТ применяются при токах 400 А и более. При первичном токе более 2 кА применяются одновитковые шинные трансформаторы тока. В качестве первичной обмотки используется пакет шин распределительного устройства, который проходит через окно магнитопровода. Электродинамическая стойкость такого ТТ определяется механической прочностью шин, их креплением и заводом не нормируется.

Одновитковые ТТ могут быть встроенными. В этом случае используется токоведущий стержень и изолятор другого аппарата или оборудования (выключателя, силового трансформатора, проходного изолятора и др.). Расположение четырех таких трансформаторов в выключателе показано на рис. 3.9. Применение встроенных ТТ дает большой экономический эффект. На проходном изоляторе встроенных ТТ, как правило, устанавливается несколько, вторичные обмотки которых можно соединять последовательно или параллельно.

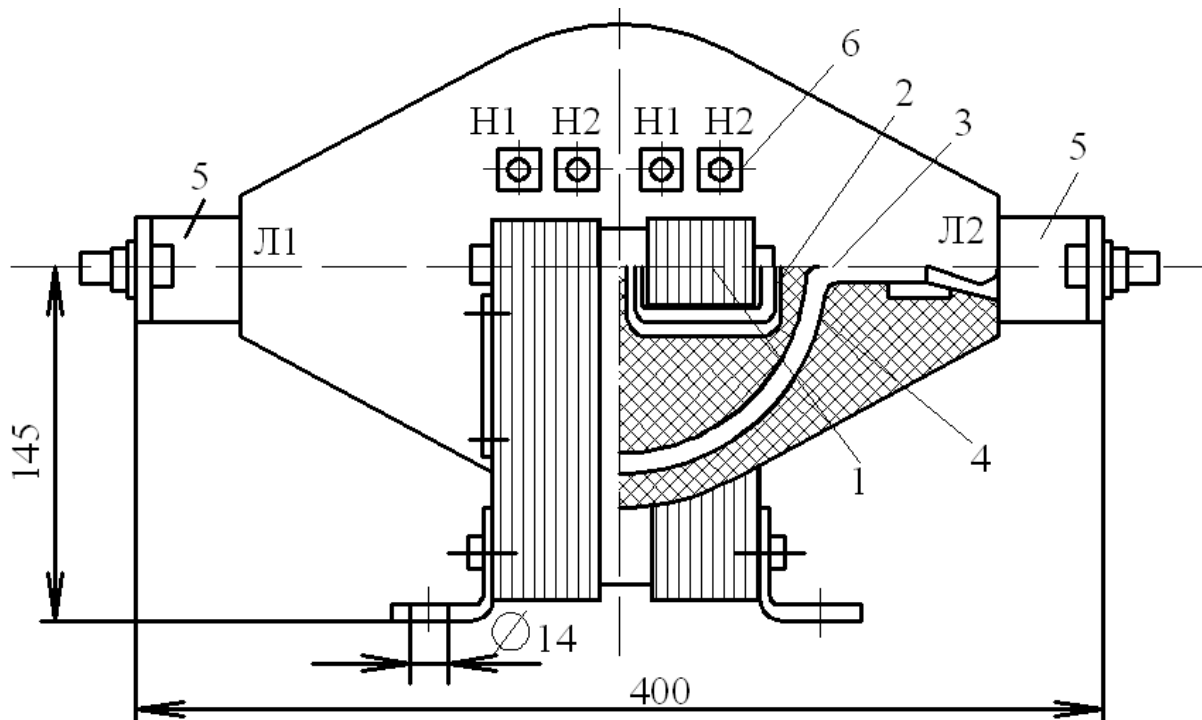
При последовательном соединении вторичных обмоток коэффициент трансформации не изменяется, так как удваивается число первичных и вторичных витков. Вторичный ток сохраняется неизменным, а вторичная ЭДС удваивается, что позволяет увеличить в 2 раза вторичную мощность. Для встроенных ТТ это очень важно, так как они удалены от реле и измерительных приборов, благодаря чему сопротивление соединяющих проводов получается большим. При параллельном соединении вторичных обмоток коэффициент трансформации уменьшается, так как первичные обмотки включаются последовательно. При этом вторичный ток двух ТТ увеличивается. Это дает возможность получить вторичный ток, приближающийся к стандартному значению 5 А, например, при первичном токе $I_{НОМ} = 200$ А.

Вторичные обмотки имеют отводы, которые позволяют в небольшом диапазоне регулировать коэффициент трансформации.

При малых первичных токах (ниже 400 А) для получения высокого класса точности применяются многовитковые ТТ. При любом значении первичного тока необходимая для данного класса точности первичная МДС F_t получается за счет увеличения числа витков первичной обмотки w_1 . На рис. 3.9 показан многовитковый трансформатор на напряжение 10 кВ. На прямоугольном шихтованном магнитопроводе 1 расположена вторичная обмотка 2. Первичная обмотка 3 выполняется из медной шины. Первичная обмотка выведена на контакты 5, вторичная – на контакты 6. Все детали ТТ залиты эпоксидным компаундом 4.

При КЗ на витки первичной обмотки действуют разрывающие электродинамические силы, что снижает стойкость ТТ. Кроме того, на первичной обмотке из-за ее относительно большой индуктивности может появиться значительное падение напряжения. Это является недостатком данной конструкции ТТ.

При напряжении 35 кВ и выше для открытых установок применяются ТТ с масляной изоляцией. Наиболее распространены ТТ так называемого звеньевоего типа (рис. 3.10). Три тороидальных магнитопровода *1* со вторичными обмотками *2* охвачены первичной обмоткой *4*, выполняемой мягким многожильным проводом, и обычно имеют несколько параллельных ветвей (на рис. 3.9 – две ветви).

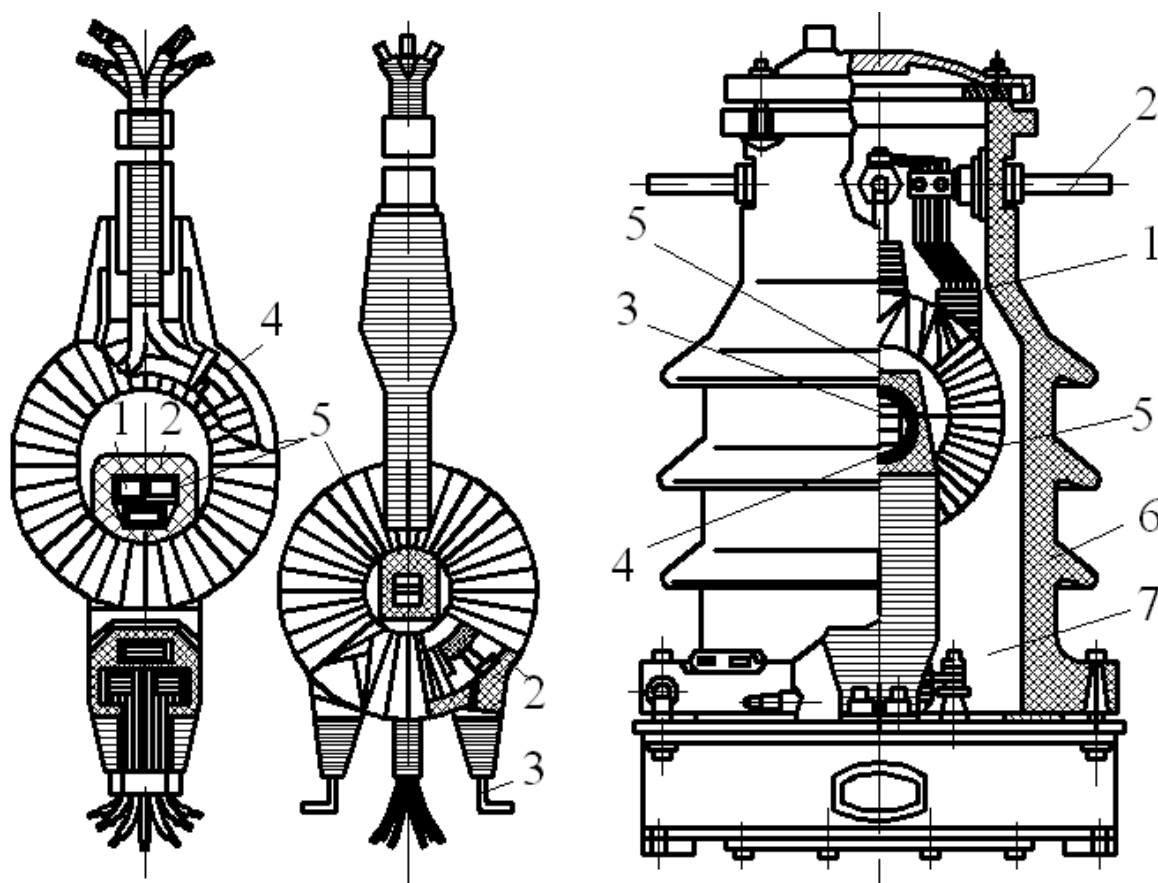


Р и с. 3.9. Многовитковый ТТ

При переходе с параллельного соединения на последовательное первичный номинальный ток трансформатора уменьшается в 2 раза.

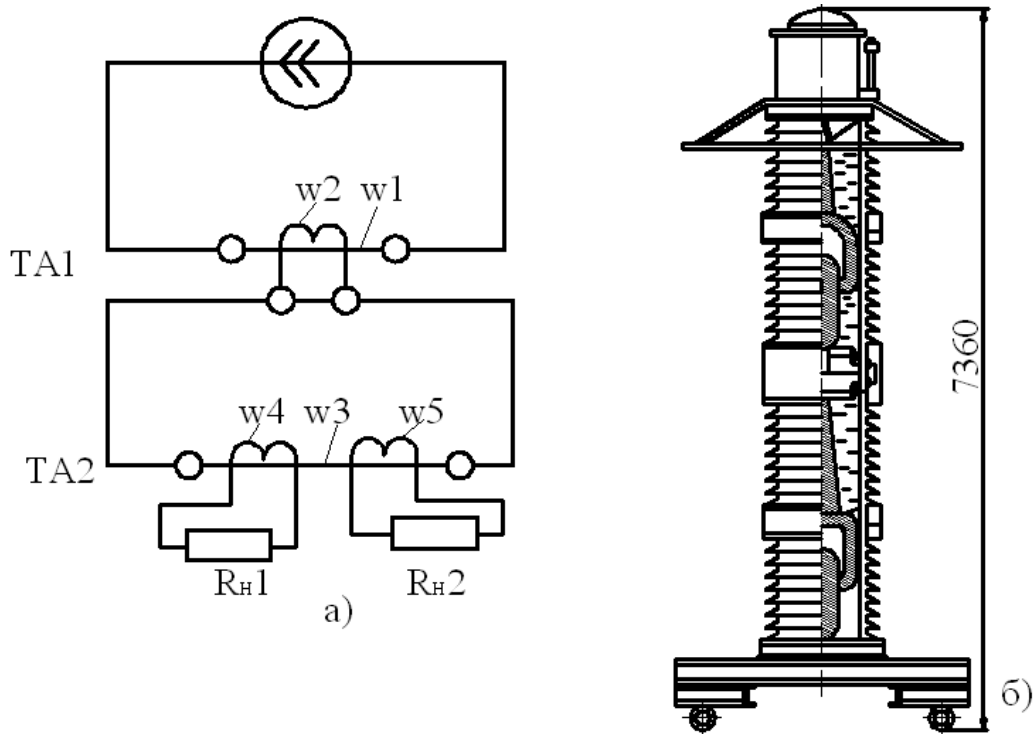
Первичная и вторичная обмотки изолируются кабельной бумагой *5* толщиной 0,12 мм. После наложения изоляции магнитопровод с обмотками крепится к основанию ТТ с помощью лап *3*. К этому же основанию крепится фарфоровый кожух, который защищает обмотки от воздействия окружающей среды. Внутренняя полость ТТ после вакуумной сушки заполняется трансформаторным маслом. Масло пропитывает ка-

бельную бумагу и заполняет все пустоты. Такие ТТ выполняются на напряжение до 220 кВ. Общий вид ТТ типа ТФН-35 на напряжение $U_{ном}=35$ кВ представлен на рис. 3.10. Здесь 1 – вывод ветвей первичной обмотки; 2 – вывод первичной обмотки; 3 – магнитопровод; 4 – вторичная обмотка; 5 – изоляция из кабельной бумаги; 6 – фарфоровая покрывка; 7 – трансформаторное масло.



Р и с. 3.10. ТТ звеньевое типа и трансформатор тока типа ТФН-35

С ростом номинального напряжения стоимость ТТ возрастает примерно пропорционально квадрату напряжения, в основном за счет изоляции. Поэтому при напряжении $U_{ном} > 220$ кВ применяют каскадные ТТ. На рис. 3.11 показан двухступенчатый каскадный ТТ на напряжение 500 кВ. Схема включения обмоток дана на рис. 3.11, а. Здесь W_1 – первичная обмотка верхней ступени; w_2 – вторичная обмотка верхней ступени; w_3 – первичная обмотка нижней ступени; w_4, w_5 – вторичные обмотки нижней ступени; R_H – нагрузка ТТ. Общая компоновка показана на рис. 3.11, б.



Р и с. 3.11. Двухступенчатый каскадный ТТ:
а – принципиальная схема; *б* – общая компоновка

Каждая ступень представляет собой ТТ на напряжение $250/\sqrt{3}$ кВ, аналогичный показанному на рис. 3.10. Вторичная обмотка первой ступени питает первичную обмотку второй ступени. При перевозке каждая ступень, залитая маслом, доставляется к месту установки отдельно. Стоимость двухступенчатого трансформатора примерно в 2 раза меньше, чем одноступенчатого. Недостатком каскадного ТТ является увеличение погрешности из-за увеличения сопротивления обмоток.

В связи с повышением номинального напряжения до 1150 кВ и выше представляется целесообразным переход на ТТ с оптико-электронной системой. Датчик тока может находиться под высоким потенциалом и модулировать световой поток, подаваемый с земли по волоконному световоду (внешняя модуляция). В другом варианте датчик тока сам вырабатывает модулированный световой поток, который по световоду передается на потенциал земли (внутренняя модуляция). Однако вследствие сложности такие системы пока не получили широкого применения.

3.2.6. ВЫБОР ТТ

Номинальное напряжение ТТ должно быть не меньше номинального напряжения сети, в которой он устанавливается. Обычно изоляция ТТ находится под воздействием фазного напряжения. Однако в энергосистемах с изолированной нейтралью при заземлении одной фазы ТТ оказывается под линейным напряжением. Наибольший возможный ток продолжительного режима работы установки высокого напряжения должен быть возможно ближе к номинальному первичному току ТТ для получения наименьшей погрешности. ТТ со вторичным током 1 А желательно применять при удаленном расположении ТТ от аппаратов релейной защиты, так как в этом случае можно допустить большее сопротивление проводников, соединяющих его с нагрузкой. Класс точности ТТ выбирается в соответствии с его назначением. ТТ с меньшей погрешностью (классы 0,5 и 1) используются для измерений. Для релейной защиты выбираются ТТ, имеющие необходимую номинальную предельную кратность.

После выбора ТТ по указанным параметрам проводится проверка его динамической и термической стойкости. Для этого необходимо знать ударный ток в месте установки ТТ и действующее значение установившегося тока КЗ. Эти величины должны быть меньше токов динамической и термической стойкости выбранного ТТ.

Хотя ТТ на малые номинальные токи имеют достаточную кратность по динамической и термической стойкости, в абсолютных величинах эта стойкость может быть недостаточной. Поэтому часто приходится выбирать ТТ на номинальный ток, превышающий ток контролируемой установки. При этом, как правило, увеличивается погрешность, так как номинальный ток установки получается меньше номинального тока ТТ.

Для ТТ цепей релейной защиты необходимо, чтобы номинальная предельная кратность была выше отношения тока КЗ к номинальному. ТТ дифференциальной защиты должны иметь одинаковую номинальную предельную кратность.

При выборе ТТ необходимо учитывать, что его реальной нагрузкой являются не только обмотки измерительных приборов и реле, но и сопротивления соединительных проводов.

3.3. ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

3.3.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Трансформаторы напряжения (ТН) служат для преобразования высокого напряжения в низкое стандартное напряжение, удобное для измерения. Обычно за номинальное вторичное напряжение принимается напряжение $100/\sqrt{3}$ В или 100 В. Это позволяет для измерения любого высокого напряжения применять одни и те же измерительные приборы. Реле защиты выпускаются на те же стандартные напряжения, независимо от номинального напряжения защищаемой установки.

Первичная обмотка ТН изолируется от вторичной соответственно классу напряжения установки. Для безопасности обслуживания один вывод вторичной обмотки заземляется. Таким образом, ТН изолирует измерительные приборы и реле от цепи высокого напряжения и делает безопасным их обслуживание.

Схема включения однофазного ТН дана на рис. 3.12. Первичная обмотка w_1 присоединена к цепи высокого напряжения через предохранители $FU1$, $FU2$. Вторичная обмотка w_2 питает нагрузку в виде обмоток измерительных приборов или реле защиты через предохранители $FU3$, $FU4$. В нормальной конструкции заземляются и вторичная обмотка w_2 , и магнитопровод.

Предохранители $FU3$, $FU4$ служат для защиты ТН от КЗ в цепи нагрузки.

Предохранители $FU1$, $FU2$ на высоковольтной стороне служат для защиты сети от КЗ в ТН. Целесообразно применение токоограничивающих предохранителей типа ПКТ или стреляющих с ограничивающим резистором. Вследствие высокого сопротивления обмоток самого ТН при КЗ во вторичной цепи ток в первичной цепи мал (порядка нескольких ампер) и недостаточен для срабатывания предохранителей $FU1$, $FU2$. Этим объясняется установка предохранителей $FU3$, $FU4$ во вторичной цепи.

Основными параметрами ТН являются следующие.

– **Номинальное напряжение первичной и вторичной обмоток**, указанное на щитке. Номинальное напряжение ТН равно номинальному напряжению первичной обмотки.

– **Номинальный коэффициент трансформации** – отношение номинального первичного напряжения к номинальному вторичному:

$$k_{\text{НОМ}} = U_{1\text{НОМ}} / U_{2\text{НОМ}}.$$

– **Погрешность по напряжению**, %, определяется уравнением

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_2 k_{\text{НОМ}} - U_1}{U_1} 100,$$

где U_1 – напряжение, поданное на первичную обмотку; U_2 – напряжение, измеренное на выводах вторичной обмотки.

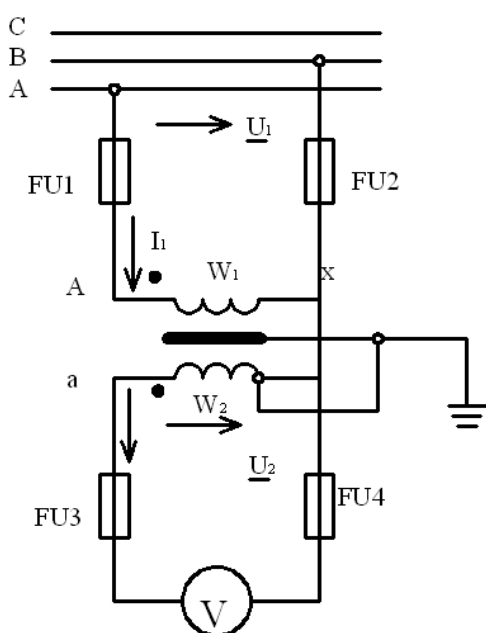
При $\frac{U_1}{U_2} = k_{\text{НОМ}}$ погрешность $\Delta U_{\%} = 0$.

По ГОСТ 1983-77 направления токов и напряжений, показанные на рис. 3.12, приняты за положительные. При отсутствии угловой погрешности векторы U_1 и U_2 совпадают по фазе. Если вектор U_2 опережает вектор U_1 , то угловая погрешность считается положительной. Угловую погрешность необходимо учитывать при измерении активной мощности, энергии и в схемах релейной защиты. Допустимая погрешность ТН по напряжению в процентах при номинальных усло-

виях численно равна классу точности.

Погрешности ТН не должны превышать значений, предусмотренных классом точности, при колебании напряжения U_1 в пределах 90-110% $U_{1\text{НОМ}}$ и колебании мощности вторичной цепи в пределах 25-100% номинальной.

– **Номинальная вторичная нагрузка**. ТН включаются (рис. 3.12) так же, как силовые трансформаторы. Ток вторичной обмотки определяется сопротивлением нагрузки:



Р и с. 3.12. Схема включения однофазного ТН

$$I_2 = U_2 / Z_2,$$

вторичная мощность:

$$P_2 = U_2 I_2 = U_2^2 / Z_2.$$

При уменьшении сопротивления Z_2 вторичная мощность увеличивается. Вторичная нагрузка Z_2 , кроме модуля, характеризуется также коэффициентом мощности $\cos \varphi_{2\text{ном}}$;

– **Номинальная мощность.** ТН представляет собой наибольшее значение вторичной мощности при $\cos \varphi_2 = 0,8$, при которой погрешность ТН не выходит за пределы, определенные классом точности. Требования к ТН определяются ГОСТ 1983-77.

3.3.2. ПОГРЕШНОСТИ ТН

Погрешность ТН обусловлена наличием активных и реактивных сопротивлений обмоток и тока холостого хода. Схема замещения ТН дана на рис. 3.13, а векторная диаграмма – на рис. 3.14,а. Все величины приведены к первичной обмотке. Поток Φ создает вторичную ЭДС E_2' , отстающую от него на 90° . Под действием этой ЭДС во вторичной цепи возникают напряжение U_2' и ток I_2 , проходящий по сопротивлению нагрузки R_2', X_2' . Тот же ток создает падения напряжения на сопротивлениях вторичной обмотки r_2' и x_2' . При выбранных положительных направлениях ток I_2' отстает от ЭДС E_2' . Сумма этих напряжений равна ЭДС E_2' . Намагничивающий ток I_0 (ток холостого хода) на угол потерь ψ опережает поток Φ . В первичной обмотке создается падение напряжения $I_1(r_1 + jx_1)$. Уравнения н.с. и токов имеют вид $I_0 w_1 = I_1 w_1 - I_2 w_2$, $I_1 = I_0 + I_2'$.

Уравнение напряжений в соответствии со схемой замещения можно представить в виде $U_1 = I_1(r_1 + jx_1) + I_2'(r_2' + jx_2') + U_2'$; выразив в последнем выражении I_1 через I_0 и I_2' , получим

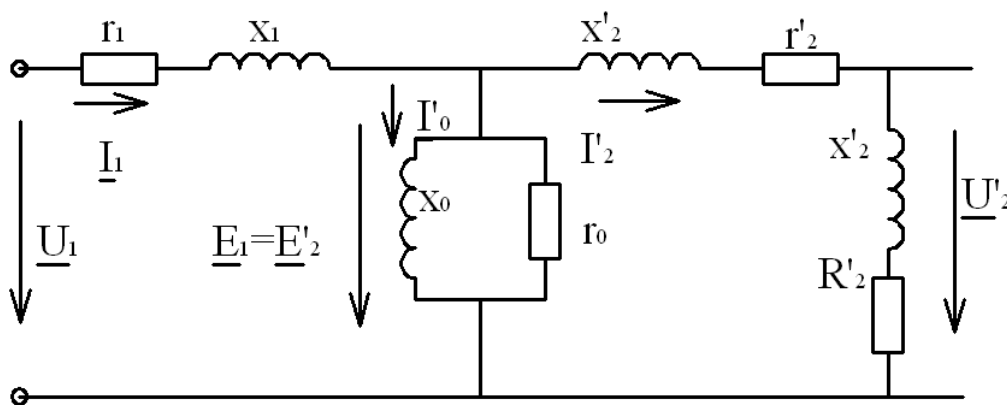
$$U_1 = I_0(r_1 + jx_1) + I_2'(r_1 + r_2') + I_2'j(x_1 + x_2') + U_2'.$$

Катеты треугольника ABC пропорциональны падениям напряжения от тока холостого хода I_0 , катеты треугольника CDE – падениям напряжения от тока нагрузки I_2' . При отсутствии погрешности

$U_2' = U_2 \frac{w_1}{w_2} = U_1$ или $U_1/U_2 = \frac{w_1}{w_2}$ точки A, E должны совпасть. Погрешность ТН по напряжению

$$\Delta U = \frac{U_2 k_{НОМ} - U_1}{U_1} 100\% = -\frac{U_1 - U_2 k_{НОМ}}{U_1} 100\% = \frac{U_1 - U_2'}{U_1} 100\%.$$

Поскольку угол между U_1 и U_2' мал, то вместо арифметической разности модулей этих векторов можно взять проекцию вектора AE на ось U_2' . Таким образом, погрешность определяется отрезком AF . В реальных ТН углы φ_{K1} и φ_{K2} , определяемые активным и реактивным сопротивлением обмоток, примерно одинаковы. В связи с этим введем угол $\varphi_K = \varphi_{K1} = \varphi_{K2}$, необходимый для построения треугольника падений напряжений CDE . Угол γ между напряжением на нагрузке U_2' и ЭДС E_2' составляет несколько минут, и им можно пренебречь.



Р и с. 3.13. Схема замещения ТН

Найдем проекции векторов на направление вектора U_2 (ось OF). Уравнение для погрешности по напряжению имеет вид

$$\Delta U_{\%} = -\frac{AF}{OE} 100\% = -\frac{I_0(r_1 \sin \psi + x_1 \cos \psi) + I_2[(r_1 + r_2') \cos \varphi_2 + (x_1 + x_2') \sin \varphi_2]}{U_1} 100\%.$$

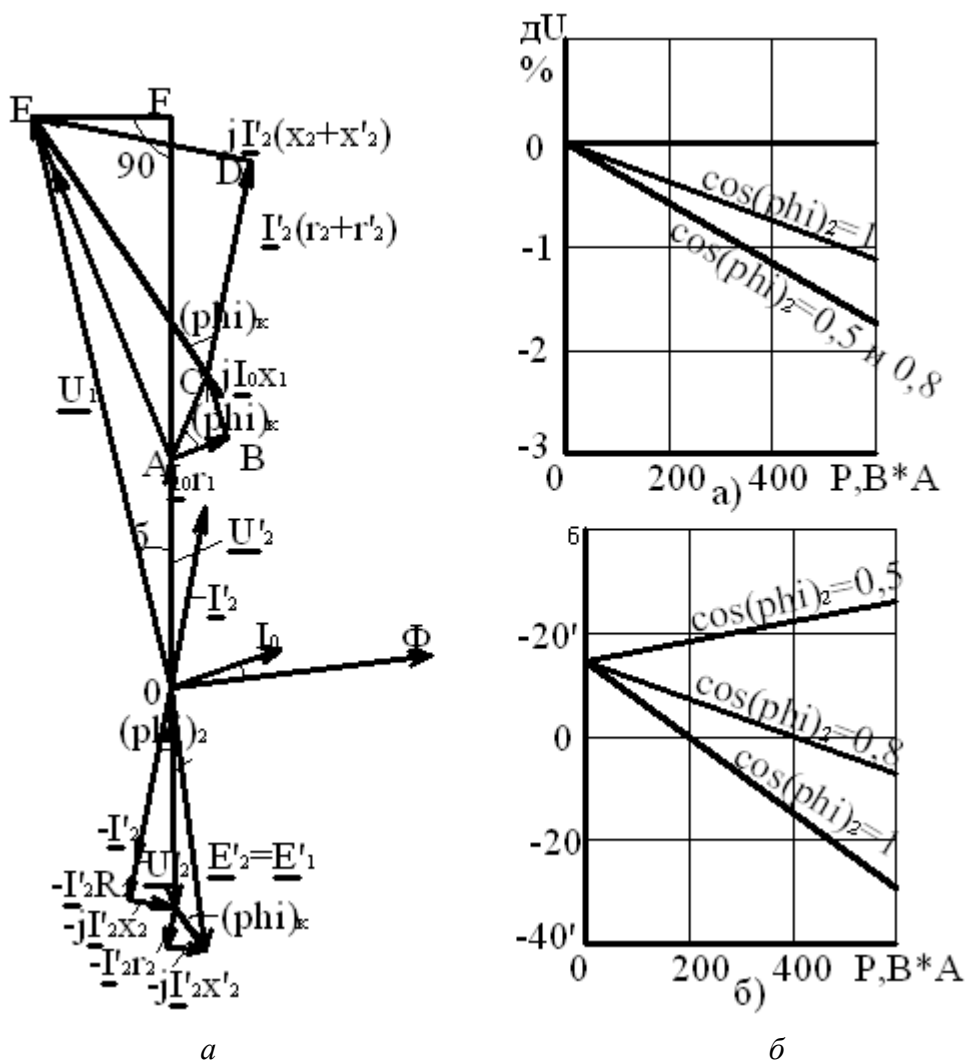
Уравнение показывает, что погрешность состоит из двух частей. Первая определяется током холостого хода, вторая – током нагрузки. Для того чтобы уменьшить погрешность по напряжению, снижают активное и реактивное сопротивление обмоток. Уменьшение активного сопротивления достигается малой плотностью токов в обмотках (около $0,3 \text{ А/мм}^2$), что облегчает тепловой режим ТН.

Для снижения индуктивного сопротивления обмоток x_1 и x_2 уменьшают расстояние между первичной и вторичной обмотками.

При заданном первичном напряжении U_1 намагничивающий ток I_0 практически постоянен. В этом случае, согласно полученным соотношениям, погрешность линейно растет с увеличением тока нагрузки I_2 . Поскольку в номинальном режиме напряжение U_2 мало меняется с током нагрузки I_2 , то вторичная (выходная) мощность P_2 пропорциональна этому току. Зависимость погрешности по напряжению от вторичной мощности для одного из исполнений ТН показана на рис. 3.14.

На погрешность влияет коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_2$. С уменьшением $\cos\varphi_2$ погрешность увеличивается.

Погрешность зависит и от первичного напряжения.



Р и с. 3.14. Векторная диаграмма ТН и зависимости для погрешности

Рассмотрим холостой ход ($I_2' = 0$). Если принять, что при изменении I_0 угол потерь не изменяется, то, согласно полученным соотношениям, погрешность по напряжению будет определяться отношением намагничивающего тока I_0 к первичному напряжению U_1 . Индукция B пропорциональна первичному напряжению, а намагничивающий ток пропорционален напряженности поля:

$$I_0 = Hl / w.$$

Тогда погрешность пропорциональна отношению H/B_m или обратно пропорциональна магнитной проницаемости μ_a . Обычно рабочая индукция в номинальном режиме составляет 1,1 Тл.

При изменении первичного напряжения в пределах $(0,5 \div 1,1) U_{\text{ном}}$ магнитная проницаемость увеличивается и погрешность уменьшается.

Следует отметить, что погрешность от тока холостого хода мала по сравнению с погрешностью от тока нагрузки. Поэтому изменение первичного напряжения в указанных пределах мало влияет на значение погрешности.

Угловая погрешность определяется углом δ между вторичным напряжением U_2' и первичным напряжением U_1 . Ввиду малости угла δ можно считать, что $OE = OF$ (см. рис. 3.14, а).

Погрешность по углу состоит также из двух частей: первой, определяемой током холостого хода, и второй, зависящей от тока нагрузки. Отсюда следует, что индуктивное сопротивление обмоток вносит отрицательную угловую погрешность, а активное – положительную. Зависимость угловой погрешности δ от вторичной мощности P при различных значениях $\cos\varphi_2$ приведена на рис. 3.14, б. В режиме холостого хода угловая погрешность положительна. При чисто активной нагрузке ($\cos\varphi_2 = 1$) с ростом мощности угловая погрешность изменяет знак и становится отрицательной. При $\cos\varphi_2 = 0,5$ угловая погрешность линейно растет с мощностью и остается все время положительной. Следует отметить, что характер нагрузки ($\cos\varphi_2$) оказывает большее влияние на угловую погрешность, чем на погрешность по напряжению (см. рис. 3.14, а, б).

Погрешность по напряжению можно компенсировать путем уменьшения числа витков первичной обмотки. При этом коэффициент трансформации становится меньше номинального, вторичное напряжение возрастает, вводится положительная погрешность, которая компенсирует отрицательную. Обычно вводится такая коррекция, что при холостом ходе трансформатор имеет максимально допустимую для данного класса точности положительную погрешность.

На угловую погрешность витковая коррекция не влияет.

В трехфазных ТН угловую погрешность можно компенсировать с помощью специальных компенсирующих обмоток. При активной нагрузке вносится положительная коррекция. При индуктивной нагрузке применяется схема соединений, создающая отрицательную коррекцию.

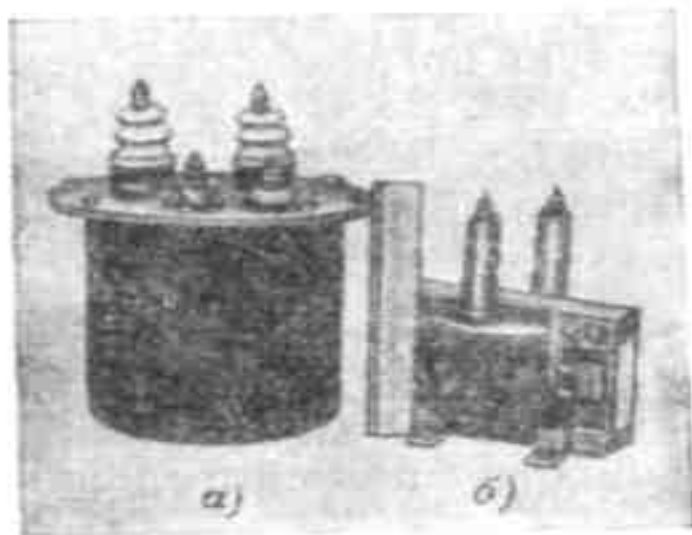
3.3.3. КОНСТРУКЦИЯ ТН

При напряжении до 35 кВ конструкции ТН и силовых трансформаторов аналогичны. При этом индукция в магнитопроводе значительно меньше, чем у силовых трансформаторов. Это снижает погрешность, позволяет в некоторых случаях проводить испытания индуцированным напряжением. Для испытания ТН на выводы вторичной обмотки подается удвоенное напряжение частотой 50 Гц. На первичной обмотке появляется также удвоенное напряжение. Индукция не должна превышать индукцию насыщения.

При эксплуатации возможны случаи, когда первичная обмотка, рассчитанная на работу при фазном напряжении, попадает под линейное напряжение вместо фазного. При этом магнитопровод не должен насыщаться.

Для напряжений до 35 кВ выпускаются однофазные ТН, у которых оба или один из выводов обмотки высокого напряжения изолированы от земли (второй вывод заземлен). На рис. 3.15, *a* показан однофазный ТН на напряжение 6 кВ с масляной изоляцией. Оба вывода первичной обмотки изолированы от корпуса.

Перспективным является отказ от масляной изоляции. В этом случае применяется заливка ТН эпоксидным компаундом. Наряду с резким сокращением массы и габаритов упрощается эксплуатация, делается ненужным уход за маслом. Трансформаторы с литой пластмассовой изоляцией пожаробезопасны, удобны в передвижных установках и КРУ. Для сравнения на рис. 3.15, *а* и *б* показаны ТН с одинаковыми параметрами при масляной и литой изоляции. Габариты ТН в значительной степени определяются изоляцией. Поэтому там, где возможно, ТН включаются между фазой сети и землей, что исключает необходимость в изоляции заземленного вывода первичной обмотки. Линейное напряжение получается путем соединения в звезду вторичных обмоток таких ТН. Такие способы позволяют уменьшить габариты, массу и стоимость ТН.



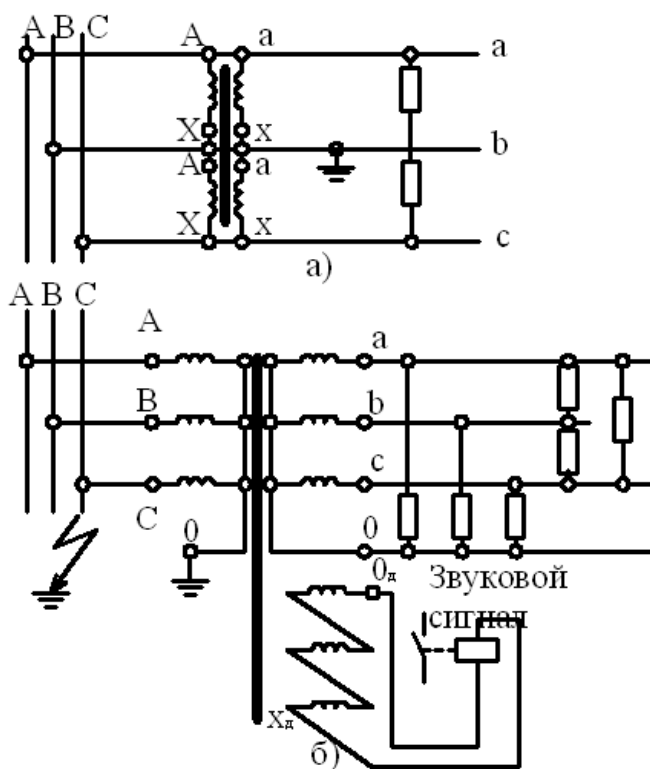
Р и с. 3.15. ТН с масляной (*а*)
и литой (*б*) изоляцией

Основные схемы включения однофазных ТН нормального исполнения показаны на рис. 3.16. В схеме рис. 3.16 используются ТН, у которых оба вывода первичной обмотки изолированы от земли. Такая схема удобна при измерении мощности и энергии. К каждому ТН может подключаться номинальная нагрузка. Схема позволяет получать как фазное, так и линейное напряжение $U_{CA} = (U_{AB} + U_{BC})$. В последнем случае измерительные приборы подключаются между точ-

ками a и c . Однако при таком включении создаются дополнительные погрешности за счет тока приборов, проходящего через обе вторичные обмотки. В этом случае нагрузка ТН должна быть меньше номинальной.

В схеме рис. 3.16, б могут применяться ТН с одним заземленным выводом первичной обмотки. Каждая из обмоток подключена к фазному напряжению сети, поэтому номинальное напряжение ТН должно равняться $U_{\text{ном}}/\sqrt{3}$. Нагрузка подключается по схеме звезды или треугольника. Номинальное напряжение каждой вторичной обмотки равно $100/\sqrt{3}$.

Для контроля сопротивления изоляции и питания защиты, срабатывающей при КЗ на землю, имеются дополнительные обмотки, которые включаются по схеме разомкнутого треугольника $a_d x_d$. При симметричном режиме сумма ЭДС, наводимых в этих обмотках, равна нулю. Если один из проводов заземляется, то равновесие ЭДС нарушается и на выводах разомкнутого треугольника возникает напряжение, которое подается на звуковой сигнализатор.



Р и с. 3.16. Схемы включения ТН в трехфазных цепях

Возможны два режима работы схемы рис. 3.16, б. Если нейтраль сети изолирована или заземлена через реактор, то заземление одной из фаз сети, например, C , не ведет к КЗ. Установка может оставаться в работе длительное время. При этом напряжение на обмотке C падает до нуля, а на обмотках A и B увеличивается до линейного. В связи с этим индукция в магнитопроводах ТН A и B увеличивается в $\sqrt{3}$ раз. Во избежание недопустимого нагрева и резкого возрастания погрешности магнитопроводы не должны насыщаться при таком увеличении индукции.

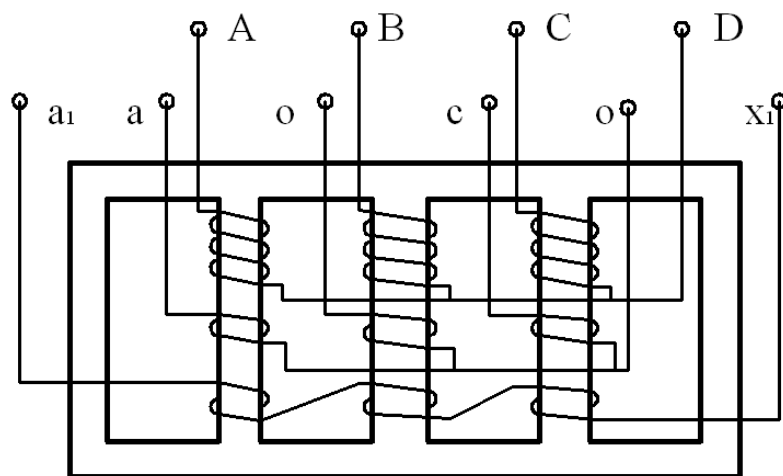
В установках с заземленной нейтралью заземление одной из фаз сети вызывает КЗ и срабатывание релейной защиты. Напряжение на неповрежденных фазах при этом не поднимается выше $(1,2 \div 1,3)U_H$.

Габариты и стоимость ТН могут быть уменьшены путем объединения трех однофазных ТН в один трехфазный. Применяются трехстержневые и пятистержневые ТН. Трехфазные трехстержневые ТН выполняются с изолированной нулевой точкой на стороне высокого напряжения. Если нулевую точку заземлить, то при заземлении одной фазы в сетях с изолированной нейтралью возникает аварийный режим работы.

Для контроля сопротивления изоляции систем с изолированной нейтралью применяются трехфазные пятистержневые ТН (рис. 3.17). При заземлении одной из фаз магнитные потоки, созданные обмотками неповрежденных фаз, замыкаются по крайним стержням, имеющим малое магнитное сопротивление. Дополнительные обмотки, соединенные в открытый треугольник a_1x_1 , обеспечивают работу сигнализации и релейной защиты. При симметричном режиме в сети на выходе a_1x_1 напряжение отсутствует.

При напряжениях выше 35 кВ ввиду резкого возрастания габаритов и стоимости ТН нормальной конструкции применяются каскадные ТН. В двухкаскадном ТН на напряжение 110 кВ (рис. 3.18, а) каждый каскад имеет свой магнитопровод (I и II). Обмотки высокого напряжения BH каждого каскада рассчитаны на 50% фазного напряжения. Один из выводов каждой обмотки BH соединен с магнито-

проводом. На стороне низкого напряжения $НН$ выходные обмотки $ax, a_{дхд}$ предназначены для питания измерительных приборов и реле в схеме защиты.



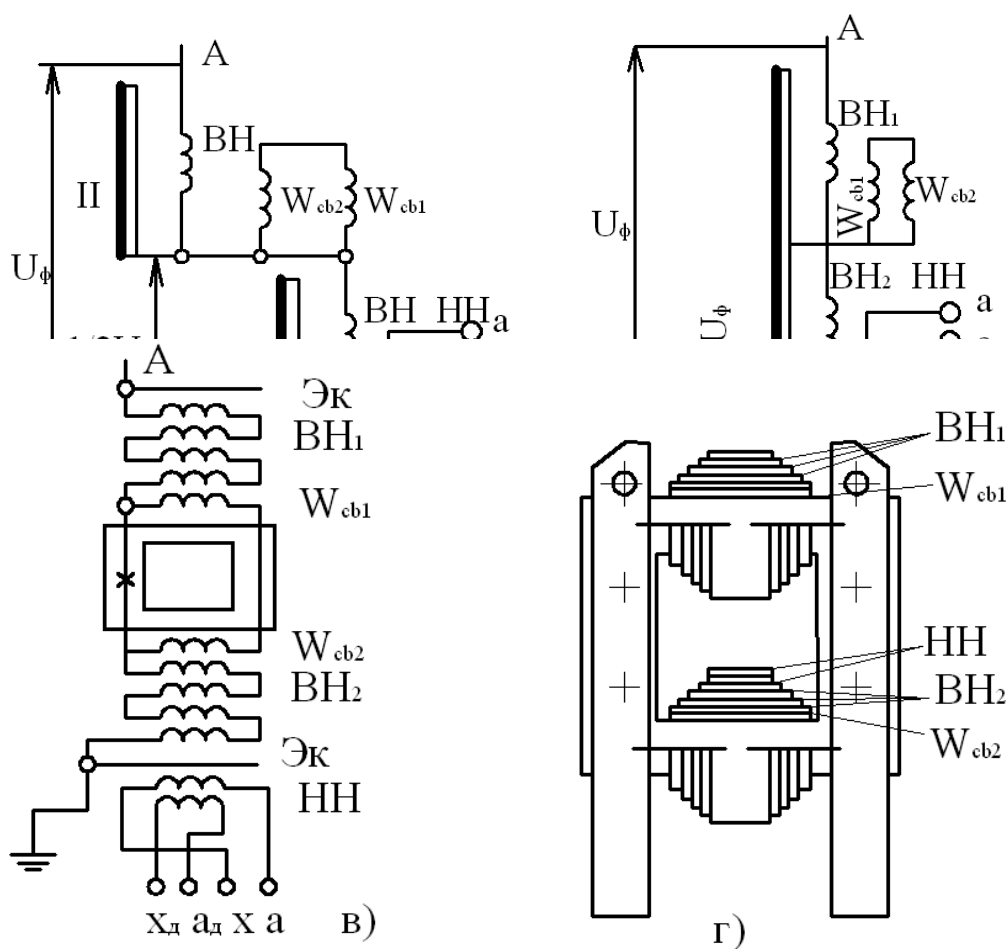
Р и с. 3.17. ТН с пятистержневым магнитопроводом

Обмотка связи w_{CB1} расположена на магнитопроводе I , а обмотка связи w_{CB2} — на магнитопроводе II . При отсутствии обмоток связи, если нагрузка не подключена к выходным обмоткам, напряжение разделится поровну между обмотками $ВН$, так как их индуктивные сопротивления холостого хода одинаковы. При включении нагрузки вторичный ток размагничивает магнитопровод и поток в нем уменьшается.

Реактивное сопротивление ступени I также уменьшается. Это ведет к тому, что напряжение между ступенями поделится неравномерно, причем большая часть ляжет на ступень II . Обмотки связи служат для выравнивания распределения напряжения между обмотками при включении нагрузки.

При холостом ходе ЭДС в этих обмотках одинаковы, так как равны потоки в магнитопроводах I и II . Обмотки w_{CB} включены встречно друг другу, и уравнительный ток равен нулю. При включении нагрузки поток в магнитопроводе I падает. ЭДС в обмотке w_{CB2} становится больше, чем ЭДС в обмотке w_{CB1} . В результате в этих обмотках протекает уравнительный ток, который размагничивает магнитопровод II и подмагничивает магнитопровод I . Этот ток таков, что верхний элемент воспринимает половину нагрузки, включенной на выходных

обмотках. Более совершенным является вариант рис. 3.18, б. При том же напряжении $110/\sqrt{3}$ кВ ТН имеет один магнитопровод. На верхнем горизонтальном стержне магнитопровода расположены обмотки связи w_{cb1} и первая обмотка высокого напряжения BH_1 , на нижнем – обмотка связи w_{cb2} , вторая обмотка высокого напряжения BH_2 и две обмотки низкого напряжения HH . Один из концов каждой обмотки BH_1 и BH_2 соединяется с магнитопроводом. Каждая обмотка ВН имеет изоляцию относительно магнитопровода, рассчитанную на напряжение $1/2 U_\phi$, что уменьшает размеры ТН. Собранный магнитопровод с изоляционными стойками показан на рис. 3.18, г. В трансформаторах на напряжение 110 кВ для снижения атмосферных перенапряжений необходимо равномерное распределение напряжения по катушкам обмотки ВН. С этой целью поверх обмоток ВН располагаются экраны Эк, которые электрически соединяются с последними витками этих обмо-



Р и с. 3.18. Каскадные трансформаторы напряжения

ток. Магнитопровод с обмотками крепится на изоляционных стойках, устанавливается в фарфоровый кожух и заливается маслом.

ТН на напряжение 220 кВ собирается из двух ТН на 110 кВ. Аналогично выполняются ТН на напряжения до 500 кВ. Для выравнивания напряжения между каскадами применяют охранные кольца. Изоляция верхних элементов, подвергающихся большей электрической нагрузке, соответственно усиливается.

Результирующее активное и индуктивное сопротивление обмоток каскадных ТН значительно больше, чем у ТН нормального исполнения. Поэтому для получения высокого класса точности приходится снижать нагрузку.

Как указывалось, для ТН характерна малая плотность тока в обмотках. В том случае, когда ТН используется как источник мощности и погрешность не играет особой роли, нагрузку обмоток можно значительно увеличить. Так, например, для ТН типа НОМ-10 при классе точности 0,5 допустима нагрузка 80 В-А, хотя максимальная мощность, которая может быть снята со вторичной обмотки, равна 720 В-А.

3.3.4. ЕМКОСТНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

Помимо электромагнитных ТН, для понижения высокого напряжения могут быть использованы емкостные делители. Принципиальная схема подобного устройства, понижающего напряжение сети 500 кВ, приведена на рис. 3.19. Делитель D состоит из конденсаторной батареи $C1$ и конденсатора $C2$. В чисто емкостной цепочке (цепь ТН AX_1 разомкнута) напряжение U_ϕ делится обратно пропорционально значениям емкостей. Емкость $C2$ на порядок больше $C1$, и ток цепочки определяется конденсатором $C1$. Емкость $C2$ выбирается так, чтобы напряжение на ней U_{c2} находилось в пределах 4-12 кВ. Для дальнейшего понижения напряжение через реактор P подается на ТН нормального исполнения и низкой стоимости. Нагрузка, имеющая номинальное напряжение 100 В, включается на вторичную обмотку этого ТН.

Если в схеме отсутствует реактор P , то с ростом нагрузки уменьшается входное сопротивление ТН и выходное напряжение начинает падать. Если реактор настроен в резонанс с емкостью $C_1 + C_2$ при частоте сети $f = 50$ Гц, то выходное напряжение мало зависит от нагрузки.

Для выявления основных свойств делителя примем, что ТН – идеальный и погрешности не вносит. Если пренебречь током холостого хода ТН, то схема рис. 3.19 может быть преобразована в схему рис. 3.20. Трансформатор и нагрузку можно заменить сопротивлением нагрузки Z_2 , приведенным к первичной обмотке ТН.

Воспользуемся методом наложения и, разомкнув цепь в точке A , определим напряжение на разрыве:

$$U_2' = U_\phi \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

Теперь замкнем накоротко источник питания, а в разрыве включим напряжение U_2' (рис. 3.19, б).

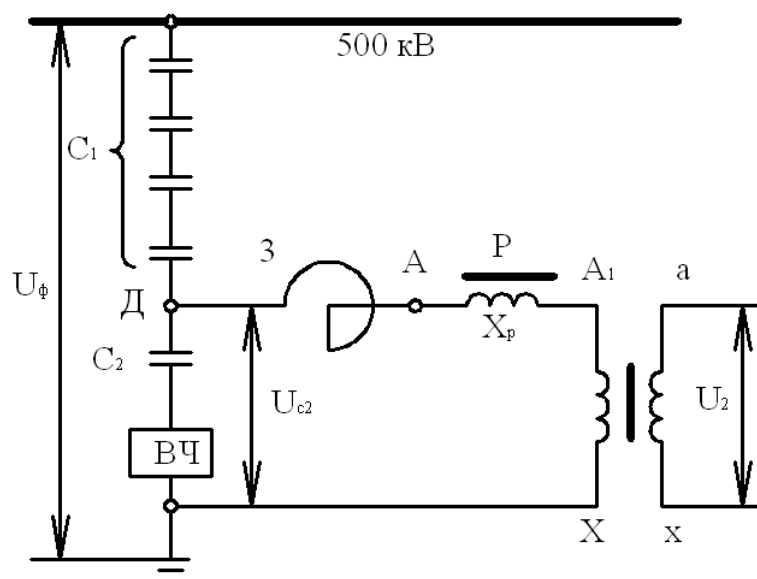
$$U_{C_2}' = jI_2' X_P - jI_2' \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)} + U_2'.$$

Поскольку реактор настроен в резонанс с емкостью $C_1 + C_2$, то

$$X_P = \omega L_P = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)},$$

тогда

$$U_{C_2}' = U_\phi \frac{C_1}{C_1 + C_2} = U_2'.$$

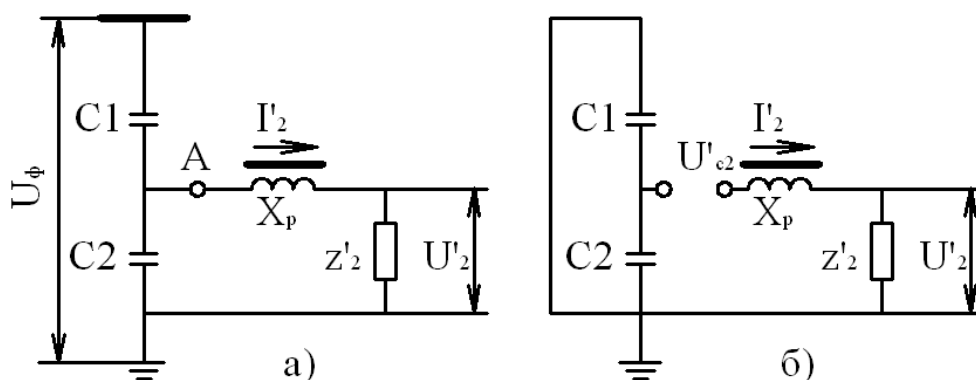


Р и с. 3.19. Емкостной делитель

Таким образом, при наличии реактора, настроенного в резонанс, напряжение на нагрузке U'_2 определяется только отношением $C_1 / C_1 + C_2$ и не зависит от Z'_2 . При сделанных допущениях погрешности определяются трансформатором ТН.

С ростом тока I'_2 напряжение U'_2 практически остается постоянным, в то время как напряжение на реакторе $I'_2 X_p = I'_2 / \omega(C_1 + C_2)$ пропорционально растет. В результате на конденсаторе C_2 возможно появление опасных для его работы напряжений. При КЗ на вторичной стороне появятся перенапряжения на конденсаторе C_2 , которые могут привести к его пробое. Для ограничения этих перенапряжений параллельно конденсатору C_2 ставится разрядник или используется аппарат защиты от КЗ в цепи нагрузки.

При использовании в качестве конденсатора C_1 конденсаторной бумагомасляной изоляции проходных изоляторов мощность полезной нагрузки ограничивается из-за малости емкости C_1 . Так, при номинальном напряжении $U_{ном} = 110$ кВ мощность нагрузки составляет 15 В-А. Погрешность по напряжению достигает 5%, а угловая погрешность доходит до 5° . В настоящее время в релейной защите высоковольтных линий широко используются сигналы высокой частоты. Релейная защита, работающая на высокой частоте (блок ВЧ, рис. 3.19), связана с линией высокого напряжения через конденсатор C_1



Р и с. 3.20. Упрощенная расчетная схема емкостного делителя

Сигналы высокой частоты подаются в линию высокого напряжения и воспринимаются устройством, расположенным в другой точке линии. Для таких защит разработаны специальные конденсаторы

большой емкости. Эти конденсаторы используются в емкостном делителе и дают возможность увеличить мощность нагрузки до 1000 В-А. Для того чтобы не пропускать токи высокой частоты, в цепь ТН устанавливается высокочастотный заградитель \mathcal{Z} , играющий роль фильтра. Емкостный делитель может быть использован также для отбора больших мощностей (многих киловольт-ампер) вместо понижающих силовых трансформаторов.

Выпускаются емкостные делители мощностью до 300 В-А первого класса точности. Исследования показали возможность создания делителей класса точности 0,2.

В конструкции реакторов и ТН предусмотрена возможность регулирования параметров для компенсации технологических разбросов по емкости конденсаторов делителя.

Индуктивность реактора регулируется изменением воздушного зазора в магнитопроводе и с помощью отводов обмотки. В ТН с помощью отводов обмотки регулируется коэффициент трансформации.

Сравнение стоимости емкостного делителя и каскадных ТН показывает, что делители целесообразно применять при напряжениях выше 110 кВ. При напряжениях 400 кВ и выше стоимость емкостного делителя примерно в 2 раза ниже стоимости каскадного ТН. При напряжении ниже 110 кВ использование делителя не дает ощутимого экономического эффекта.

Наличие конденсаторов делителя и нелинейных индуктивностей создает возможность феррорезонансных явлений не только на основной, но и на низших частотах (субгармониках).

В результате таких явлений могут возникать перенапряжения, опасные для изоляции, а также ложные срабатывания защиты. Возможно даже повреждение присоединяемых приборов. В настоящее время разработано много схем, эффективно ограничивающих эти перенапряжения.

Работа делителя зависит также от изменения частоты измеряемого напряжения, так как при этом возможны нарушения условия резонанса между реактором и конденсаторами.

3.3.5. ВЫБОР ТН

Номинальное напряжение первичной обмотки ТН должно соответствовать номинальному напряжению сети, в которую он включается, а если ТН включается между фазой и землей – то номинальному фазному напряжению.

Номинальное вторичное напряжение ТН должно соответствовать номинальному напряжению нагрузки.

Нагрузка должна быть равномерно распределена по фазам ТН. Суммарная нагрузка на фазу ТН должна быть меньше допустимой при заданных классе точности и коэффициенте мощности.

Сечение проводников, соединяющих ТН с нагрузкой, должно быть таким, чтобы падение напряжения на них составляло доли процента номинального вторичного напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие науки и техники, научно-технические исследования предполагают развитие и совершенствование методов проектирования и расчета существующих, а также разработку новых специальных электромеханических преобразователей. Поэтому соотношения и методы, приведенные в данном пособии, не являются неизменными и установившимися.

Данный курс лекций охватывает часть специальных электромеханических преобразователей и предназначен для изучения основ теории, конструкции, принципа действия, принципиальных схем и основных характеристик, проведения практических занятий по дисциплине и может быть использовано для самостоятельной работы студентов дневной и заочной форм обучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проектирование электрических машин: Уч. для вузов / *И.П. Копылов и др.* 3-е изд. М.: Высш. шк., 2002. 757 с.
2. *Копылов И. П.* Электрические машины. М.: Высш. шк., 2000. 607 с.
3. Проектирование электрических машин. Под ред. *Гольдберга О.Д.* 2-е изд. М.: Высш.шк., 2001. 430 с.
4. *Чунихин А.А.* Электрические аппараты. М.: Энергоатомиздат, CD-ROM, 2005.
5. *Алиев И.И.* Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах. М.: Радио-Софт, 2004. 190 с.
6. *Лихачев В.Л.* Справочник обмотчика. М.: СЛОН-Пресс, 2005. 240 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Специальные трансформаторы.....	4
1.1. Общие сведения.....	4
1.2. Автотрансформатор.....	4
1.3. Трансформаторы для преобразования числа фаз.....	9
1.3.1. Преобразователь трехфазной системы питания в двухфазную.....	9
1.3.2. Преобразователь трехфазной системы питания в шести- и двенадцатифазную.....	10
1.4. Особенности трансформаторов, применяемых в радио и телевизионных устройствах.....	12
1.5. Пик-трансформатор.....	14
1.6. Электромагнитный стабилизатор напряжения.....	17
1.7. Электромагнитные преобразователи частоты.....	19
Контрольные вопросы.....	22
2. Сварочные трансформаторы.....	23
2.1. Общие сведения об электросварке.....	23
2.2. Характеристики сварочной дуги.....	28
2.2.1. Требования к источникам питания сварочной дуги.....	30
2.3. Основы теории и конструкции сварочных трансформаторов.....	32
2.4. Осциллятор.....	35
3. Измерительные трансформаторы.....	36
3.1. Измерительные трансформаторы напряжения и тока (общие сведения).....	36
3.2. Трансформаторы тока.....	39
3.2.1. Общие сведения.....	39
3.2.2. Погрешности ТТ, зависимость погрешностей от различных факторов.....	42
3.2.2.1. Зависимость погрешности от первичного тока.....	42
3.2.2.2. Влияние сопротивления нагрузки.....	44
3.2.2.3. Влияние конструктивных параметров.....	45
3.2.3. Компенсация погрешности.....	45
3.2.4. Режимы работы ТТ.....	48
3.2.4.1. Работа ТТ при КЗ в контролируемой сети.....	48
3.2.4.2. Работа ТТ при наличии в токе КЗ апериодической составляющей.....	49
3.2.4.3. Работа ТТ при разомкнутой вторичной обмотке.....	51
3.2.5. Конструкция ТТ.....	52
3.2.6. Выбор ТТ.....	58
3.3. Трансформаторы напряжения.....	59
3.3.1. Назначение и основные параметры.....	59
3.3.2. Погрешности ТН.....	61
3.3.3. Конструкция ТН.....	65
3.3.4. Емкостные делители напряжения.....	71
3.3.5. Выбор ТН.....	75
Заключение.....	75
Библиографический список.....	76

Учебное издание

ЧЕБОТКОВ Эдуард Галактионович

**Специальные электромеханические преобразователи
(ч.1. Специальные трансформаторы)**

Редактор Г.В. Загребина
Технический редактор В.Ф. Елисеева
Оригинал-макет Е.Э. Парсаданян

Подп. в печать 20.06.08.
Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. п. л. 4,56.
Уч.-изд. л. 4,65. Тираж 75 экз. Рег. № 138.

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»
443100 г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии
Самарского государственного технического университета
443100 г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус N 8