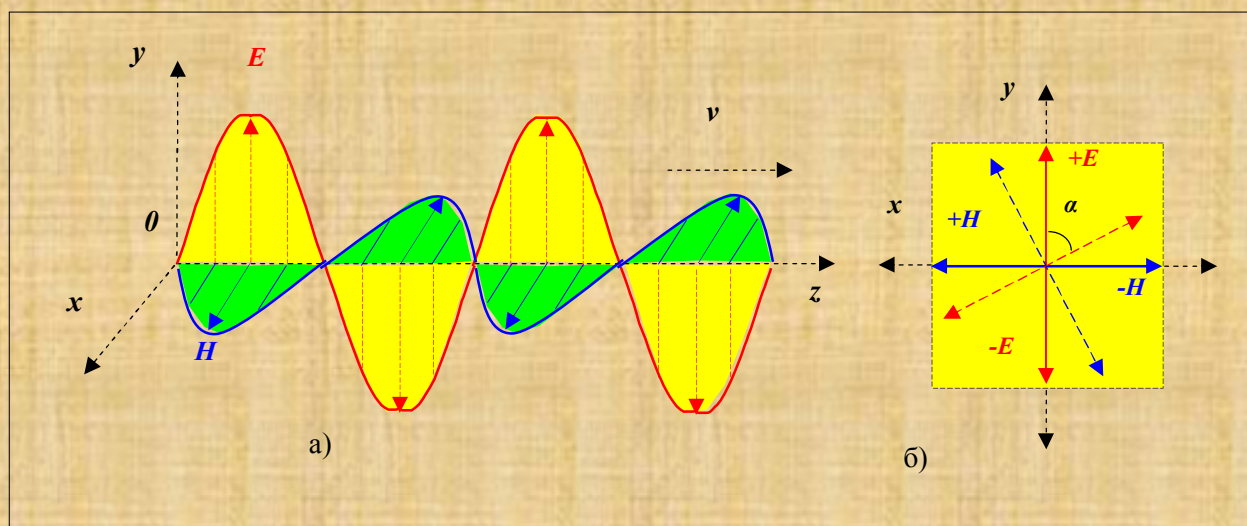


**Гуртовцев А.Л.**

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ  
*ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ  
И ОПТИЧЕСКИЕ*  
ТРАНСФОРМАТОРЫ  
И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКА**



**2009**

**Гуртовцев А.Л.**

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ  
И ОПТИЧЕСКИЕ  
ТРАНСФОРМАТОРЫ  
И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКА**  
(Законченная глава из незаконченной  
книги)

***Аннотация***

В 2008-2009 гг., в конце своей 28-летней деятельности в области автоматизированного учета и измерения электроэнергии и энергоносителей, я планировал издать итоговую книгу *“Измерение и учет энергии и энергоносителей в энергосистемах и у потребителей”*, тем более, что материал к ней был уже фактически подготовлен в более чем двухстах моих статьях, опубликованных по этой тематике в различных ведущих научно-технических журналах России, Беларуси и Украины. Но, ряд объективных и субъективных обстоятельств привел к тому, что я был вынужден отказаться от завершения этой книги. Тем не менее, несколько относительно автономных глав я успел завершить, и в качестве самостоятельного произведения разместил ранее в Интернете вторую главу в виде книги *“Электрическая энергия: понятия, законы, измерения”*. В данном труде я предлагаю читателям **третью главу** неопубликованной книги, **посвященную электромагнитным и оптическим (электронным) трансформаторам и преобразователям тока**. Если первая часть этой работы достаточно традиционна (она изложена мной с метрологических позиций), то вторая часть, касающаяся оптических трансформаторов, относительно нова. Мне думается, что этот материал может быть использован в технических колледжах и высших учебных заведениях СНГ в качестве учебного или справочного пособия в курсе электротехники и электрических измерений, а также специалистами-практиками, имеющими дело в энергосистемах и на промышленных предприятиях с преобразованиями и измерениями электрической энергии в однофазных и трехфазных сетях переменного тока различного уровня напряжения.

Книга имеет 21 рис., 3 табл., 47 библиогр. - 47 стр.

**Минск- 2009**  
**Интернет-издание**

## ГЛАВА 3

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКА

*«Трансформатор (от лат. transformare превращать, преобразовывать) - устройство для преобразования энергии из одной формы в другую или для изменения физической величины в заданное число раз»  
Словарь иностранных слов, 1988г.*

**Оглавление:** 3.1 Общие понятия – 3.2 Электромагнитные трансформаторы тока – 3.2.1 Термины и определения. Классификация – 3.2.2 Номинальные, метрологические и технические параметры – 3.2.3 Магнитные свойства магнитопровода трансформатора – 3.2.4 Теория электромагнитного трансформатора тока – 3.2.5 Выбор и эксплуатация трансформаторов тока – 3.3 Оптические трансформаторы и преобразователи тока – 3.3.1 Поляризация света и эффект Фарадея – 3.3.2 Оптическое волокно и передача светового сигнала – 3.3.3 Конструкция и характеристики оптических ТТ и ПТ – **Литература**

### 3.1 Общие понятия

Измерение электрической энергии в однофазных и трехфазных электрических сетях переменного тока осуществляется различными средствами измерительной техники, к которым, в частности, относят **измерительные преобразователи (ИП)**. Согласно метрологическим документам [3.1,3.2], ИП определяют как «техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал\*, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи». По месту размещения ИП в измерительной цепи\* различают **первичные (ПИП)**, т.е. первые в цепи преобразователи, на которые непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, и **промежуточные преобразователи**, а по характеру преобразования измеряемой величины в измерительный сигнал – **аналоговые (АП)**, **аналого-цифровые (АЦП)** и **цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи**. Конструктивно обособленные ПИП называют **датчиками (Д)**. ИП или Д функционально входят в состав измерительных устройств (ИУ), измерительных приборов (ПР) или измерительных систем (ИС).\*

\*Согласно [3.1], **измерительный сигнал** определяют как «сигнал, содержащий количественную информацию об измеряемой физической величине», **измерительную цепь** – как «совокупность элементов средств измерений, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода» («измерительную цепь ИС называют **измерительным каналом**»), **измерительное устройство** – как «часть измерительного прибора (установки или системы), связанную с измерительным сигналом и имеющую обособленную конструкцию и назначение» (в частности, измерительным устройством может быть ИП), **измерительный прибор** – как «средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне», **измерительную систему** – как «совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях».

Среди ИП выделяют **масштабные преобразователи**, которые преобразуют масштаб измеряемой величины в измерительный сигнал того же рода и вида, что и измеряемая величина (например, преобразователи переменного тока в переменный ток той же частоты,



но меньшего масштаба), и **передающие преобразователи**, измерительный сигнал которых отличается по роду или виду от измеряемой величины (например, преобразователи переменного тока в унифицированный токовый сигнал 4-20 мА). ИП, предназначенные для преобразования силы тока в измерительный сигнал, относят к **измерительным преобразователям тока (ИПТ)** или **датчикам тока (ДТ)**. Масштабные ИП называют **измерительными трансформаторами тока (ИТТ)**. ИП, ДТ и ИТТ используются в качестве ИПИП в электрических сетях переменного тока для подключения к ним измерительных приборов во всех тех случаях, когда непосредственное подключение этих приборов в точки измерений электрической энергии невозможно из-за больших токов или напряжений в этих точках.

Согласно терминологическим стандартам [3.3,3.4], **трансформатор** – это «статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока». Под **трансформатором тока** понимают «трансформатор, в котором при нормальных условиях применения вторичный ток практически пропорционален первичному току и при правильном включении сдвинут относительно него по фазе на угол, близкий к нулю» [3.4]. Под **первичным током  $I_1$**  понимают «ток, протекающий по первичной обмотке трансформатора тока и подлежащий трансформации», а под **вторичным током  $I_2$**  – «ток, протекающий по вторичной обмотке трансформатора тока» [3.3]. Ко вторичной обмотке ИТТ подключают **вторичную цепь**, т.е. «внешнюю цепь, получающую сигналы измерительной информации от вторичной обмотки ИТТ». Вторичная цепь содержит, как правило, измерительный прибор. Данные определения относятся к традиционному и наиболее массовому виду трансформаторов, в основе действия которого лежит явление электромагнитной индукции - к **электромагнитному трансформатору**.

Основное назначение ИТТ - это масштабное преобразование силы  $I_1$  первичного переменного тока в силу  $I_2$  вторичного тока. Отношение действительного первичного тока к действительному вторичному току в любой точке диапазона их изменений называют **действительным (истинным) коэффициентом трансформации**:

$$\text{Действительный коэффициент трансформации ИТТ:} \quad n = I_1 / I_2 \quad (3.1.1)$$

Для ИТТ, как правило,  $n \gg 1$ , т.е. трансформатор **понижает** величину первичного тока в  $n$  раз до величины вторичного тока, что дает возможность свести реальный процесс измерения первичного тока большой величины к процессу измерения вторичного тока относительно малой величины. Измерив  $I_2$  и зная  $n$ , можно вычислить  $I_1$ :

$$I_1 = n \cdot I_2. \quad (3.1.2)$$

Вычисление по (3.1.2) дает правильные значения первичного тока только при условии, что коэффициент  $n$  имеет неизменное значение во всем **рабочем диапазоне** изменения этого тока. Такой диапазон всегда конкретен и ограничен **наименьшим  $I_{1\min}$**  и **наибольшим  $I_{1\max}$**  рабочими значениями тока (согласно [3.5], «**наибольшее (наименьшее) рабочее значение** – это **допускаемый верхний (нижний) предел изменения рабочего значения параметра электротехнического устройства**»), так как пока невозможно создать техническое устройство, работающее в неограниченном диапазоне изменения измеряемой физической величины. Таким образом, для ИТТ всегда полагают, что в рабочем диапазоне  $I_{1\min} \leq I_1 \leq I_{1\max}$ .

При нормировании любого диапазона изменения того или иного параметра электротехнического изделия, включая ток ИТТ, используют **номинальное значение параметра**, которое согласно [3.5] определяют как «**значение параметра электротехнического изделия (устройства), указанное изготовителем, при котором оно должно работать, являющееся**



исходным для отсчета отклонений». Зная это значение, в частности, **номинальный первичный ток  $I_{1ном}$  ТТ**, рабочий диапазон его изменения задают в процентах от этого тока, например, как  $1-120\% I_{1ном}$ . При выполнении изготовителем трансформатора всех *технических условий* на свое изделие, гарантируется, что в рабочем диапазоне *коэффициент трансформации  $n$*  будет иметь установленное значение с определенной погрешностью, зависящей от класса точности трансформатора (как правило, эта погрешность постоянна или линейно меняется в границах отдельных частей рабочего диапазона, например, для ТТ класса точности с литерой *S* она различна в поддиапазонах  $1-5, 5-20$  и  $20-120\% I_{1ном}$ ).

Для измерения *вторичного тока ТТ* используют те или иные стандартные измерительные приборы, и поэтому для ТТ нормируют не только первичный, но и вторичный ток, задавая его номинальную величину – **номинальный вторичный ток  $I_{2ном}$** . Под эту величину подбирают и **номинальный ток измерительного прибора:  $I_{прном}=I_{2ном}$** . Отношение номинальных первичного и вторичного токов ТТ называют **номинальным коэффициентом трансформации**:

<p><b>Номинальный коэффициент трансформации ТТ:</b></p> $n_{ном} = I_{1ном} / I_{2ном}$	(3.1.3)
-----------------------------------------------------------------------------------------	---------

Например, при  $I_{1ном}=1000A$  и  $I_{2ном}=5A$   $n_{ном}=1000/5=200$ , т.е. вторичный номинальный ток в 200 раз меньше первичного номинального тока. Коэффициент  $n_{ном}$ , в отличие от  $n$ , определяет отношение токов не в любой точке рабочего диапазона изменения первичного тока, а только в одной конкретной точке - при номинальном значении. Его можно рассматривать как тот предел, к которому должен стремиться коэффициент  $n$  во всех точках диапазона измерения первичного тока:  $n \approx n_{ном}$ . В соответствии с этим, приближенную величину первичного тока  $I_1^*$  вычисляют не по выражению (3.1.2), а по формуле:

$$I_1^* = n_{ном} \cdot I_2. \quad (3.1.4)$$

Детально вопросы достижения требуемой метрологической точности коэффициентов трансформации электромагнитных ТТ и оценки в целом их погрешностей рассматриваются в следующем параграфе.\*

\* Иногда возникает вопрос: “Являются ли ТТ средством измерений и должны ли они в связи с этим подвергаться периодической поверке?” Согласно [3.1], **средством измерений (СИ)** называют “техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени”. Ключевыми в этом определении являются понятия измерения (“совокупности операций, ... обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины”) и единицы измерения: если техническое средство не выдает значения величины и не хранит или не воспроизводит единицу измерения, что характерно для ТТ, то, следовательно, оно не может быть признано в качестве СИ. Однако, в [3.1] измерение рассматривается не только как **абсолютное**, основанное на прямых измерениях физической величины, но и как **относительное**, т.е. “измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы...”. ТТ осуществляет в неявном виде относительное измерение вторичного тока как доли первичного тока ( $I_2 = I_1 / n_{ном}$ ), равной номинальному коэффициенту трансформации. Эта доля хранится в конструкции ТТ, что превращает его как масштабный преобразователь в СИ (со всеми вытекающими из этого обстоятельства последствиями, включая поверку).

На практике необходимость использования ТТ возникает как в **низковольтных** (напряжением до 1 кВ), так и в **высоковольтных электрических сетях** переменного тока. В низковольтных сетях ТТ применяют при условии  $I_1 > (0.8-0.9) \cdot I_{прмакс}$ , где  $I_{прмакс}$  – наибольшее рабочее значение тока измерительного прибора. Коэффициент (0.8-0.9) вводится с целью уменьшения наибольшего значения первичного тока до величины, при которой прибор может *длительно функционировать* без опасности перегрева и выхода из строя (для многих приборов их наибольший ток допускается только в течение достаточно ограниченного интервала

времени). В сетях  $0,4 \text{ кВ}$  при выполнении обратного условия  $I_I < (0,8-0,9) \cdot I_{\text{ПРмакс}}$  нет необходимости применять *ТТ*, и приборы включают в сеть для измерения тока  $I_I$  без *ТТ*, т.е. непосредственно.

В высоковольтных сетях *ТТ* применяют при любых значениях тока  $I_I$ , что требуется по условиям обеспечения безопасности измерений. Выполнение этой задачи является важной дополнительной функцией *ТТ*, которая реализуется в них за счет гальванической развязки первичной и вторичной цепей, т.е. исключением контактной электрической связи между ними с заменой ее бесконтактной магнитной связью. При этом дополнительно используют и другие меры обеспечения безопасности (например, заземление вторичной обмотки *ТТ*).

Большинство действующих стандартов на трансформаторы, включая *ТТ*, а также существующая в этой области терминология, исторически ориентированы на электромагнитные трансформаторы. Однако в последние годы в связи с развитием новых технологий выходят на стадию серийного производства и широкого применения трансформаторы иного вида, работа которых основана не на принципе электромагнитной индукции, а использовании других эффектов магнитного поля, окружающего проводник с током, в частности, **эффект Фарадея** [3.6].

Эффект Фарадея является одним из эффектов *магнитооптики*, раздела оптики, изучающей явления, связанные с испусканием, распространением и поглощением света в веществе (например, в оптоволоконном кабеле), помещенном в магнитное поле. Эффект заключается во вращении плоскости поляризации предварительно линейно поляризованного света под воздействием внешнего магнитного поля, причем угол поворота  $\Theta$  плоскости поляризации линейно зависит от величины напряженности магнитного поля  $\Theta \sim H$ , а последняя – от величины тока в проводнике  $H \sim I_I$ , создающего это поле. Таким образом, зная соотношение  $\Theta \sim I_I$  и, измерив  $\Theta$ , можно по обратной зависимости определить  $I_I$ .

Преобразователи, реализующие эффект Фарадея, применяют для измерений больших токов в высоковольтных электрических сетях напряжением  $110 \text{ кВ}$  и выше. Терминология по устройствам этого вида еще не установилась и поэтому в технической литературе для них встречаются различные наименования: «*оптические*», «*магнитооптические*», «*оптоэлектронные*», «*оптоволоконные*», «*волоконнооптические*», «*оптикоэлектрические*» *ТТ*, *ПТ* или *ДТ*. Строго говоря, указанные устройства не являются *ТТ* в традиционном смысле, а относятся к виду *передающих преобразователей*, преобразующих переменный или постоянный ток большого масштаба в соответствующий ему измерительный сигнал иного рода и/или вида (например, сигнал тока, напряжения и т.п.). *Оптические ТТ* и *ПТ* рассматриваются в параграфе 3.3.

*Ниже подробно рассматривается классификация современных ТТ, их технические и метрологические параметры, принципы конструкции и работы, особенности эксплуатации, сравнительные достоинства и недостатки.*

## 3.2 Электромагнитные трансформаторы тока

### 3.2.1 Термины и определения. Классификация

Основными конструктивными элементами электромагнитного *ТТ* являются *первичная обмотка* (через нее протекает первичный ток, подлежащий трансформации), *вторичная обмотка* (через нее протекает трансформированный, вторичный ток), *магнитная система* (комплект элементов определенной геометрической формы из ферромагнитного магнитомягкого материала, предназначенный для локализации в нем основного магнитного поля трансформатора), *изоляция* (совокупность изоляционных деталей и изоляционной среды,

исключающая замыкания металлических частей трансформатора, находящихся под разными потенциалами, между собой и с заземленными частями) и **корпус** (оформляет *ТТ* как отдельное законченное изделие с заданными эксплуатационными характеристиками).

Стандарт [3.7] определяет *общие технические требования* к электромагнитным *ТТ* на номинальное напряжение от 0,66 до 750 кВ включительно (не распространяется на *ТТ* нулевой последовательности, лабораторные, суммирующие, блокирующие и насыщающиеся). Согласно стандарту, *ТТ* классифицируют по следующим основным признакам:

- по роду установки (климатическому исполнению и категории размещения) по стандарту [3.8]; например, трансформатор с обозначением *УЗ* предназначен для эксплуатации в макроклиматическом районе с умеренным климатом (*У*) и размещением в закрытых помещениях с естественной вентиляцией (категория 3), а с обозначением *УХЛ1* – в районе с умеренным и холодным климатом на открытом воздухе (категория 1);

- по принципу конструкции: **опорные (О)** - для установки на опорной плоскости, **проходные (П)** - для использования в качестве ввода\*, **шинные (Ш)** - первичной обмоткой служит шина распределительного устройства, **разъемные (Р)** - без первичной обмотки, с магнитной системой, которая может размыкаться и замыкаться вокруг проводника с измеряемым током, **встроенные (В)** - первичной обмоткой у них служит ввод электротехнического устройства\*\*; допускается сочетание в конструкции *ТТ* нескольких перечисленных признаков (например, *втулочный трансформатор* является одновременно проходным и шинным), а также специальное конструктивное исполнение (рис.3.2.1);

\***ввод** – проходной изолятор (изолятор, предназначенный для провода токоведущих элементов через стенку сооружения, имеющую иной электрический потенциал) с внутренней изоляцией из жидкого, твердого, газообразного диэлектрического материала или их комбинации [3.9];

\*\* **электротехническое устройство** – совокупность взаимосвязанных *электротехнических изделий* (изделий, предназначенных для производства или преобразования, передачи, распределения или потребления электроэнергии), находящихся в конструктивном и/или функциональном единстве [3.10].

- по виду изоляции: с **литой изоляцией (Л)** - изоляцией из литевого органического материала, например, полиуретана или эпоксидной смолы, с **фарфоровой крышкой (Ф)**, в **пластмассовом корпусе (П)**, **маслонаполненные (М)**, **газонаполненные (Г)**, с твердой изоляцией (кроме фарфоровой и литой) или с полимерной крышкой;

- по числу ступеней трансформации: **одноступенчатые** - с одной ступенью трансформации тока, **каскадные (К)** - с несколькими последовательными ступенями трансформации тока;

- по числу вторичных обмоток: с одной, с несколькими обмотками;

- по назначению вторичных обмоток: **для измерения и учета** (для передачи сигнала измерительной информации измерительным приборам), **для защиты** (для передачи сигнала измерительной информации на устройства защиты и управления), **для измерения и защиты, для работы с нормированной точностью в переходных режимах**;

- по числу коэффициентов трансформации: с одним коэффициентом (согласно [3.3], *однодиапазонный ТТ*), с несколькими коэффициентами (согласно [3.3], *многодиапазонный ТТ*); получают путем изменения числа витков первичной и/или вторичной обмотки, а также путем применения нескольких вторичных обмоток с различными числами витков, соответствующих различным значениям номинального вторичного тока).

**Примеры условных обозначений *ТТ*:** *ТОП-0,66-100/5 УЗ* – трансформатор опорный в пластмассовом корпусе на напряжение сети 0,66 кВ с номинальными первичным 100А и вторичным 5А токами исполнения *УЗ*; *ТЛП-10-1-0,2S/0,5/10P-1000/1* – трансформатор проходной с литой изоляцией на напряжение сети 10 кВ конструктивного варианта 1 с двумя вторичными обмотками для измерения и учета классов точности 0,2S и 0,5 и одной вторичной обмоткой для защиты класса 10P на номинальные первичный 1000 А и вторичный 1А токи.





Рис.3.2.1 Внешний вид некоторых современных типов ТТ:

а-г) ТТ ГК «Трансформэлектро» (г.Москва) с литой изоляцией – опорный ТЛО-24-2-0,2/5Р-1000/5 (а), проходные ТЛП-10-2-0,5S/10Р- 300/5(б) и ТЛП-10-3-0,2S/0,5/10Р- 600/5 (в), шинный проходной ТЛП-10-1-0,2S/0,5/10Р -3000/5 (г); д-е) ТТ ОАО «СЗТТ» (г. Екатеринбург) – литой опорный ТОЛ-35 (д),опорный шинный в пластмассовом корпусе ТОП-0,66-1-10-0,5-30/5 У3; ж) ТТ ЗАО «Днеста» (г. Днепропетровск) – опорный шинный в пластмассовом корпусе Т-0,66-1-0,5S-400/5 У3; з) ТТ ОАО «МЭТЗ» (г. Минск) опорный шинный в пластмассовом корпусе ТОП-0,66-2- 0,5S-200/5 У3

Стандарт [3.3] дополнительно определяет еще несколько видов ТТ:

- **образцовый ТТ** – «трансформатор, служащий для проверки по нему других ТТ или расширения пределов измерения образцовых измерительных приборов и утвержденный в качестве образцового органами государственной метрологической службы»;
- **лабораторный ТТ** – «трансформатор, предназначенный для эпизодического использования при электрических измерениях и проверке измерительных приборов и ТТ»;
- **компенсированный ТТ** – «трансформатор, точность трансформации тока которого в определенном диапазоне первичного тока обеспечивается с помощью специальных средств» (например, дополнительной обмотки подмагничивания);
- **насыщающийся ТТ** – «трансформатор с малой кратностью насыщения»;
- **ТТ нулевой последовательности** – «трансформатор, предназначенный для определения тока нулевой последовательности в трехфазных цепях» (предназначен для питания схем защиты от замыкания на землю отдельных жил трехфазного кабеля путем трансформации появляющихся при замыкании токов нулевой последовательности);
- **суммирующий ТТ** – «трансформатор, предназначенный для суммирования токов нескольких электрических цепей»;

- **промежуточный ТТ** – «трансформатор, предназначенный для включения во вторичную цепь основного ТТ для получения требуемого коэффициента трансформации или разделения электрических цепей»;

- **комбинированный трансформатор тока и напряжения (ТТН)** – «сочетание ТТ и ТН, объединенных в одном конструктивном исполнении»;

Стандарт [3.4] дополнительно определяет **однофазный трансформатор** как «трансформатор, в магнитной системе которого создается однофазное магнитное поле», и **трехфазный трансформатор** как «трансформатор, в магнитной системе которого создается трехфазное магнитное поле». ТТ изготавливают в виде однофазных трансформаторов.

В дополнение к приведенной стандартной классификации первичную обмотку ТТ по исполнению подразделяют на *одновитковую* и *многовитковую*. В свою очередь одновитковая обмотка может быть как *собственной*, так и *внешней*. В первом случае она может иметь *стержневую* (стержень, или шинка, круглой или прямоугольной формы) или *U-образную* форму. *Внешнюю* одновитковую первичную обмотку имеют *шинные* (роль первичной обмотки выполняет шина электроустановки, пропускаемая при монтаже ТТ сквозь его внутреннее отверстие *прямоугольной, крестообразной* – для горизонтальной или вертикальной установки ТТ - или иной формы), *разъемные* (их магнитопровод состоит из двух соединяемых друг с другом при монтаже частей, «одеваемых» на токопровод), *проходные* (роль первичной обмотки выполняет неизолированный ввод) и *встроенные* (роль первичной обмотки выполняет токопровод проходного изолятора, изоляция которого одновременно изолирует вторичную обмотку от первичной) трансформаторы. *Многовитковые ТТ* выполняют с *катушечной* первичной обмоткой, с *петлевой*, со *звеньевой* и другими типами обмоток [3.3].

Детальнее рассмотрим **встроенные трансформаторы (ТВ)** [3.11-3.13]. Они являются широко распространенной разновидностью ТТ и характеризуются *отсутствием собственной первичной обмотки и собственной высоковольтной изоляции*. ТВ встраивают в высоковольтные *силовые трансформаторы* и *выключатели*, ввода которых, как отмечено выше, выполняют роль первичной одновитковой обмотки и одновременно высоковольтной изоляции вторичной обмотки ТВ (в этом плане ТВ отличаются от проходных ТТ, которые реализуют дополнительно функцию высоковольтной изоляции неизолированного ввода). По виду установки ТВ подразделяют на *внутренней* и *наружной* установки, а ТВ внутренней установки - для работы в *масляной, газовой* или *воздушной* средах. Типичные конструкции различных ТВ приведены на рис. 3.2.2: на фото представлены ТВ известного европейского производителя - австрийской компании ЭПРО Галлспох Гмбх (а-д) и крупнейшего российского изготовителя ОАО «СЗТТ», г.Екатеринбург, (е).

Хотя конструкция ТВ проста (*это медный провод, намотанный на изолированный кольцевой магнитопровод*), но к ней предъявляются специфические требования, связанные как с ограничениями габаритов ТВ (*по высоте, внутреннему и внешнему диаметрам*), так и со средой размещения, способами защиты и крепления ТВ.

Подавляющее большинство ТВ предназначено для работы в *масляной среде*, температура которой может достигать ста и выше градусов Цельсия. При этом необходимо обеспечить долговременную стабильность метрологических характеристик ТВ и защиту таблички с паспортными данными от ее разрушения. В этих целях производители применяют для магнитопроводов ТВ специальные высококачественные сорта электротехнической стали, а для защиты от горячей масляной среды - полимерные пленки (например, *полиэфирную* или *целлофановую* ленту), которые наматывают на ТВ в виде *бандаж* и которые при помещении в горячую среду подвергаются *термоусадке*, тем самым полностью защищая ТВ от механических и химических повреждений и загрязнений (см. рис.3.2.2, а,в). ТВ для работы в

газовой или воздушной среде конструктивно не отличаются от «масляных», но их бандаж подвергается дополнительной смоляной пропитке.

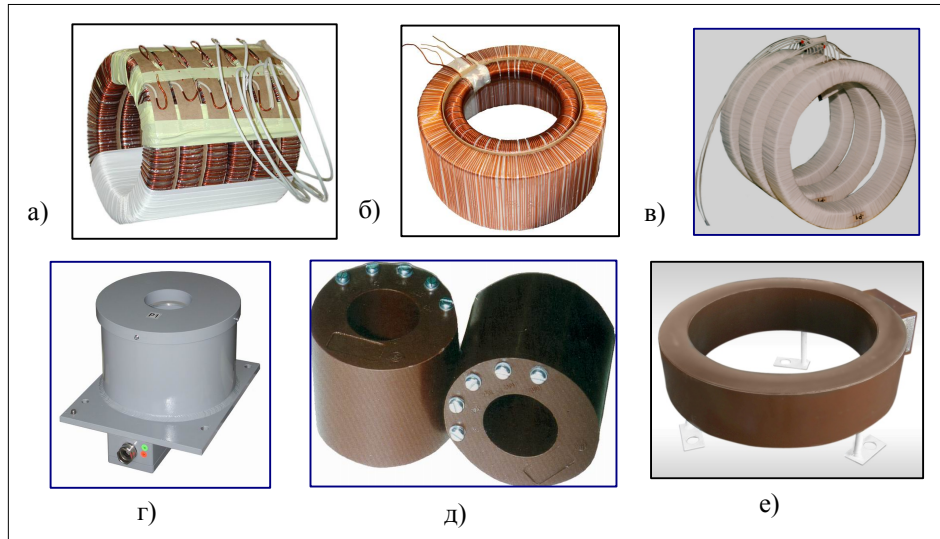


Рис.3.2.2 Конструкции *ТВ* внутренней (а,б,в) и наружной (г,д,е) установки: а) *ТВ* с пятью аксиальными сердечниками одного диаметра, б) *ТВ* с двумя коаксиальными (вложенными) сердечниками, в) *ТВ* с тремя отдельными сердечниками, изолированными полиэфирной лентой, г) *ТВ* в алюминиевом корпусе, д) *ТВ* в литом корпусе, е) *ТВ* в литом корпусе с внешними креплениями

После установки *ТВ* *внутри* силовых трансформаторов или масляных выключателей они становятся малодоступны для каких-либо оперативных изменений. Поэтому обмотки *ТВ* выполняют, как правило, с несколькими внешними отводами, позволяющими в процессе эксплуатации менять дискретно значение коэффициента трансформации. Отводы делают в виде гибкого многожильного изолированного медного провода необходимой длины. Кроме того, для дополнительной проверки *ТВ* на месте установки его часто снабжают *проверочной обмоткой*, которая имитирует первичный ввод (сразу после проведения испытаний концы этой обмотки обрезают). Поскольку *ТВ* выполняют одновременно, как правило, функции измерения и защиты, то конструктивно они могут выполняться на нескольких аксиальных или коаксиальных сердечниках: одни из них используются для защиты, а другие для измерений (например, в *ТВ* на рис. 3.2.2, б внешний сердечник используется для целей защиты, а внутренний для измерений). *ВТ* для *наружной установки* (на наружную часть ввода) имеют усиленную защиту от воздействий внешней среды и выполняют, как правило, в литом корпусе из полимера и со специальным крепежом для фиксации *ВТ* на вводе. По требованию заказчика производители изготавливают специальные конструкции *ВТ*, например, в корпусе из алюминия (рис. 3.2.2, г) или со специальными подставками (рис. 3.2.2, е).

### 3.2.2 Номинальные, метрологические и технические параметры

К основным параметрам *ТТ* стандарт [3.7] относит **номинальные параметры**:

а) **номинальное напряжение  $U_{ном}[кВ]$**  (кроме встроенных *ТТ*); выбирается из значений 0,66; 3; 6; 15; 20; 24; 27; 35; 110; 150; 220; 330; 500 и 750;



б) номинальный первичный ток  $I_{1ном}[A]$ ; выбирается из значений 1; 5; 10; 15; 20 и т.д. (до 40000 A);

в) номинальный вторичный ток  $I_{2ном}[A]$ ; выбирается из значений 1; 2 и 5;

г) номинальный коэффициент трансформации  $n_{ном}=I_{1ном}/I_{2ном}$  (несократимая дробь); например, 1000/5;

д) номинальная вторичная нагрузка  $S_{2ном} [B\cdot A]$  с коэффициентом мощности  $\cos\varphi_2=1$  (активная нагрузка) или  $\cos\varphi_2=0,8$  (активно-индуктивная нагрузка); допускается обозначение вторичной нагрузки  $Z_{2ном}=S_{2ном}/I_{2ном}^2 [Ом]^*$ ; при  $\cos\varphi_2=1$  выбирается из значений 1; 2 и 2,5, а при  $\cos\varphi_2=0,8$  – из значений 3; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 50; 60; 75 и 100  $[B\cdot A]$ ;

е) класс точности ТТ (для ТТ с одной вторичной обмоткой) или вторичных обмоток (для ТТ с несколькими вторичными обмотками); выбирается для обмотки измерений и учета из значений 0,1; 0,2; 0,2S; 0,5; 0,5S; 1; 3; 5 и 10, а для обмотки защиты – из значений 5P и 10P;

ж) номинальная предельная кратность вторичной обмотки, предназначенной для защиты,  $K_{ном};^{**}$  выбирается из значений от 5 до 30 (по требованию потребителя в стандартах на ТТ конкретных типов допускается устанавливать другие значения);

з) номинальный коэффициент безопасности приборов вторичной обмотки, предназначенной для измерений,  $K_{Бном};^{***}$  значения устанавливаются в стандартах на ТТ конкретных типов (обычно в диапазоне от 1,5 до 10);

и) номинальная частота напряжения сети  $f_{ном}$ , равная 50 или 60 Гц;

\* согласно [3.3], **вторичная нагрузка ТТ** определяется как “полное сопротивление внешней вторичной цепи ТТ, выраженное в омах, с указанием коэффициента мощности... может характеризоваться также кажущейся мощностью в вольтамперах, потребляемой ею при данном коэффициенте мощности при номинальном вторичном токе”;

\*\* согласно [3.3], под **предельной кратностью ТТ** понимается «наибольшее значение кратности первичного тока (отношения первичного тока к его номинальному значению), при котором полная погрешность при заданной вторичной нагрузке не превышает 10%», а под **номинальной предельной кратностью** – «гарантируемая ТТ предельная кратность при номинальной вторичной нагрузке» (для срабатывания защиты при резком возрастании тока  $I_1$ , т.е. в режиме короткого замыкания первичной цепи, важно, чтобы защита успела, до вхождения магнитной системы ТТ в насыщение при дальнейшем, сверх предельной кратности увеличении  $I_1$ , измерить  $I_2$  хотя бы с погрешностью не более 10%);

\*\*\* этот параметр определяется как “отношение номинального тока безопасности приборов к номинальному первичному току ТТ” и означает, что при превышении кратности первичного тока выше заданного коэффициента безопасности, токовая погрешность вторичной обмотки для измерений должна превысить 10%, т.е. ТТ должен выполнить функцию ограничения тока во вторичной цепи (за счет вхождения его магнитной системы в состояние насыщения), предохраняя тем самым от повреждений измерительные приборы, включенные в эту цепь; очевидно, что требования к ТТ по предельной кратности вторичной обмотки и коэффициенту безопасности противоречивы и поэтому реализуются для отдельных обмоток (измерения и защиты) одного и того же ТТ или для отдельных ТТ.

Согласно [3.3], **класс точности ТТ** - это “обобщенная характеристика, определяемая установленными пределами допускаемых погрешностей при заданных условиях работы”, и он обозначается числом, которое равно пределу допускаемой токовой погрешности в процентах при номинальном первичном токе. **Номинальный класс точности ТТ** – это “класс точности, гарантируемый для ТТ при номинальной вторичной нагрузке и указываемый на его паспортной табличке”, т.е. он определяется при номинальных первичном токе и вторичной нагрузке. Как правило, значение номинального класса точности ТТ сохраняется не только при номинальных значениях параметров, но и при их изменении в определенном диапазоне.

В [3.3] **токовая погрешность  $\delta_{ТТ}$**  определяется как “погрешность, которую ТТ вносит в измерение тока, возникающая вследствие того, что действительный коэффициент трансформации не равен номинальному”, т.е.  $n \neq n_{ном}$ . Эта погрешность является относительной погрешностью и выражается в процентах от текущего или номинального значения параметра (первичного или вторичного тока, номинального коэффициента трансформации). Если  $I_1$  – действительный, истинный первичный ток (его значение зависит только от нагрузки

первичной цепи и величина вторичного тока  $I_2$  на него не влияет), а  $I_1^*$  – его приближенное значение, найденное по действительному, измеренному значению  $I_2$  и номинальному коэффициенту трансформации  $n_{ном}$  (см. формулу 3.1.4), то *токовая погрешность* трансформатора определится из выражения:

$$\delta = ((I_1^* - I_1)/I_1) \cdot 100\% = ((n_{ном} I_2 - n I_2)/n I_2) \cdot 100\% = ((n_{ном} - n)/n) \cdot 100\% \quad (3.2.1)$$

Поскольку точное значение  $n$ , как и точное значение  $I_1$ , неизвестно, но  $n \approx n_{ном}$ , то от (3.2.1) можно перейти к приближенному равенству

$$\delta \approx ((n_{ном} - n)/n_{ном}) \cdot 100\%, \quad (3.2.2),$$

которое определяет искомую токовую погрешность через разность и отношение номинального и действительного коэффициентов трансформации  $ТТ$ . В случае, если  $I_1^* < I_1$  или  $n_{ном} < n$ , то  $\delta < 0$ , т.е. токовая погрешность отрицательна.

На практике токовую погрешность  $ТТ$  обычно задают не как погрешность коэффициента трансформации, а в виде эквивалентной погрешности вторичного тока, определяемой как “*арифметическая разность между действительным вторичным током  $I_2$  и приведенным к вторичной цепи действительным первичным током, выраженная в процентах к этому приведенному первичному току*” [3.3]. Согласно данному определению токовая погрешность  $ТТ$  представляется в виде:

**Токовая погрешность  $ТТ$ :**

$$\delta = ((I_2 - I_1/n_{ном})/(I_1/n_{ном})) \cdot 100\% \approx ((I_2 - I_1/n_{ном})/I_2) \cdot 100\% = (1 - n/n_{ном}) \cdot 100\%$$

(3.2.3)

Данная формула эквивалентна двум предыдущим (для доказательства достаточно умножить числитель и знаменатель дроби 3.2.3 на  $n_{ном}$  с заменой  $n_{ном} \cdot I_2 = I_1^*$ ).

Кроме токовой погрешности,  $ТТ$  вносит в процесс измерения первичного тока еще и *угловую погрешность  $\Theta$* , которая по [3.3] определяется как “*угол между векторами первичного и вторичного токов при таком выборе их направлений, чтобы для идеального трансформатора тока этот угол равнялся нулю*”. Угловая погрешность образуется из-за сдвига фазы вторичного тока относительно фазы первичного тока в процессе передачи электромагнитной энергии из первичной обмотки во вторичную и ее использования во вторичной цепи. Угловая погрешность выражается в *минутах* или *сантирадianaх\** и считается положительной, когда вектор вторичного тока опережает вектор первичного тока. Угловая погрешность, как и токовая, в общем случае может быть как положительна, так и отрицательна. Физический смысл угловой погрешности подробно рассматривается в следующем параграфе при анализе векторной диаграммы  $ТТ$ .

\* Один градус плоского угла содержит 60 мин (') или 360 сек ("). Полный угол окружности равен  $360^\circ = 21600' = 2\pi$  радиан (*радиан* – центральный угол окружности, соответствующий длине дуги, равной радиусу этой окружности; радиан содержит примерно  $57^\circ 17' 45''$ ). Отсюда, одна минута равна  $2,909 \cdot 10^{-4}$  радиан  $= 2,909 \cdot 10^{-2}$  *сантирадиан (срад)* и составляет 0,029% от полного угла (эта величина используется для перевода абсолютной угловой погрешности, выраженной в минутах, в относительную погрешность, выраженную в процентах).

Пределы допускаемых токовой и угловой погрешностей вторичных обмоток для измерений и учета в рабочих условиях применения  $ТТ$  при установившемся режиме должны соответствовать значениям, указанным ниже в таблице 3.2.1 [3.7]. График допускаемой области погрешностей, т.е. области, за пределы которой они не должны выходить, приведен для  $ТТ$  классов точности 0,5S и 0,5 по токовой погрешности на рис.3.2.3. Из таблицы и графика следует, что для  $ТТ$  без литеры “S” допускаемые погрешности нормируются для поддиапазонов первичного тока 5-20, 20-100 и 100-120  $I_1/I_{ном}\%$ , а с литерой “S” (обозначим такие  $ТТ$  как  $ТТ_s$ ) – для поддиапазонов 1-5, 5-20 и 20-120  $I_1/I_{ном}\%$  ( $ТТ_s$  обладают меньшей погрешностью в диапазоне первичного тока меньше номинального). Вне указанных границ диапазонов (5-120% для  $ТТ$  и 1-120% для  $ТТ_s$ ) погрешности не определены и могут, вообще говоря, принимать любые значения.

Отметим, что погрешности  $TT$  нормируются в заданных поддиапазонах первичного тока с учетом допускаемого диапазона изменения вторичной нагрузки  $TT$ : 25-100 % от  $S_{2ном}$  (при  $\cos\varphi_2=1$  и  $\cos\varphi_2=0,8$ ). Кроме того, стандарт [3.7] устанавливает повышенный (более, чем 25% от номинальной нагрузки) нижний предел вторичных нагрузок в абсолютных величинах для нагрузок, не превышающих  $10B \cdot A$  (нагрузка/нижний предел): 1/0,8; 2/1,25; 2,5/1,5; 3/1,75; 5/3,75 и 10/3,75. Подробно вопросы работы  $TT$  при перегрузке или недогрузке вторичной обмотки рассматриваются в следующем параграфе.

Пределы допускаемых погрешностей вторичных обмоток для защиты в рабочих условиях применения при установившемся режиме и номинальной вторичной нагрузке должны быть по токовой/ угловой погрешностям не более  $\pm 1\%/\pm 60'(\pm 1,8 \text{ срад})$  для класса точности 5P и  $\pm 3\%$ /не нормируется – для класса точности 10P (соответственно при  $K_{ном}=5$  и 10).

При эксплуатации  $TT$  вышеуказанных параметров бывает недостаточно для оценки действительных погрешностей  $TT$ . Поэтому стандарт [3.7] устанавливает, что “по согласованию между потребителем и изготовителем в эксплуатационной документации на трансформаторы должны быть указаны зависимости погрешностей от влияющих факторов: первичного тока, вторичной нагрузки, частоты и температуры, а также динамические характеристики. Зависимости погрешностей от каждого влияющего фактора определяют при номинальном значении всех остальных влияющих факторов и с указанием точности определения”.

Таблица 3.2.1

Допускаемые области погрешностей  $TT$  для классов точности 0,1; 0,2; 0,2S; 0,5; 0,5S

Класс точности	Первичный ток в % от $I_{\text{ном}}$	Предел допускаемой погрешности			Предел вторичной нагрузки в % от номинальной
		токовой, $\delta$ , %	Угловой $\theta$		
			мин, (')	срад	
0,1	5	$\pm 0,4$	$\pm 15$	$\pm 0,45$	25-100 при $\cos \varphi_2=0,8$ (активно-индуктивная нагрузка)
	20	$\pm 0,2$	$\pm 8$	$\pm 0,24$	
	100-120	$\pm 0,1$	$\pm 5$	$\pm 0,15$	
0,2	5	$\pm 0,75$	$\pm 30$	$\pm 0,9$	
	20	$\pm 0,35$	$\pm 15$	$\pm 0,45$	
	100-120	$\pm 0,2$	$\pm 10$	$\pm 0,3$	
0,2S	1	$\pm 0,75$	$\pm 30$	$\pm 0,9$	
	5	$\pm 0,35$	$\pm 15$	$\pm 0,45$	
	20	$\pm 0,2$	$\pm 10$	$\pm 0,3$	
	100	$\pm 0,2$	$\pm 10$	$\pm 0,3$	
	120	$\pm 0,2$	$\pm 10$	$\pm 0,3$	
0,5	5	$\pm 1,5$	$\pm 90$	$\pm 2,7$	
	20	$\pm 0,75$	$\pm 45$	$\pm 1,35$	
	100-120	$\pm 0,5$	$\pm 30$	$\pm 0,9$	
0,5S	1	$\pm 1,5$	$\pm 90$	$\pm 2,7$	
	5	$\pm 0,75$	$\pm 45$	$\pm 1,35$	
	20	$\pm 0,5$	$\pm 30$	$\pm 0,9$	
	100	$\pm 0,5$	$\pm 30$	$\pm 0,9$	
	120	$\pm 1,0$	$\pm 30$	$\pm 0,9$	



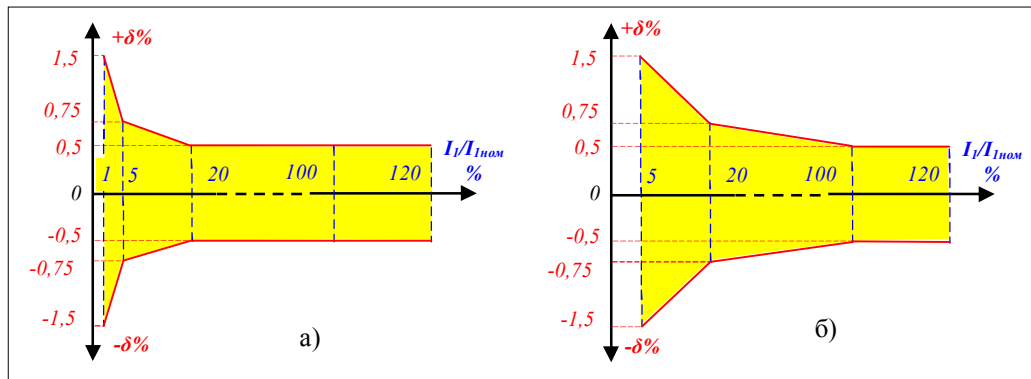


Рис.3.2.3 График допускаемой области погрешностей для  $ТТ$  классов точности 0,5S (а) и 0,5 (б)

Токовая и угловая погрешности рассчитываются по действующими значениям первичного и вторичного токов и используются для оценки точности  $ТТ$  в установившемся режиме работы. В *переходном режиме* (например, при КЗ в первичной цепи) для этой цели используют **полную погрешность**, которую, согласно [3.3], определяют как “действующее значение разности между произведением номинального коэффициента трансформации на мгновенное действительное значение вторичного тока и мгновенным значением первичного тока в установившемся режиме”. Эту погрешность выражают обычно в процентах действующего значения первичного тока и используют при расчете защит.

Стандарт [3.7] выдвигает к  $ТТ$ , помимо вышерассмотренных номинальных и метрологических требований, *технические требования*, включая общие требования по климатическому исполнению и категории размещения, по изоляции, по нагреву и стойкости при токах короткого замыкания (КЗ), по обозначению выводов обмоток. Так, например, изоляция первичной обмотки (первичной цепи)  $ТТ$  на номинальное напряжение 0,66 кВ должна выдерживать воздействие испытательного напряжения 3 кВ частотой 50 Гц в течение 1 мин, а для  $ТТ$  на номинальное напряжение от 3 до 500 кВ должна соответствовать стандарту [3.14]. Важной характеристикой прочности изоляции высоковольтных  $ТТ$  является *уровень частичных разрядов\** изоляции первичной обмотки, который измеряется в *пикокулонах (пКл)* и не должен превышать для  $ТТ$  с бумажно-масляной или газовой изоляцией 10 пКл, а для  $ТТ$  с твердой изоляцией – 20 пКл.

\* **Частичный разряд (ЧР)** – это искровой разряд малой мощности, который образуется внутри газовых включений изоляции или на ее поверхности (как правило, загрязненной или увлажненной) в оборудовании среднего и высокого напряжения. С течением времени повторяющиеся ЧР вызывают старение изоляции, ее разрушение и, в конечном счете, ее электрический пробой. Разрушение изоляции под действием ЧР происходит длительно, в течение месяцев или лет. Чем меньше уровень ЧР, тем прочнее изоляция. Например, для уменьшения уровня ЧР при изготовлении  $ТТ$  с литой изоляцией используют литые компаунды (эпоксидной смолы, полиуретана) в вакууме.

Требования по нагреву ограничивают *наибольшие рабочие первичные токи*  $I_{1нр}$  (номинальные токи длительного режима)  $ТТ$  и допустимую наибольшую температуру нагрева

конструктивных элементов трансформаторов. *ТТ* на номинальное напряжение 0,66 кВ при продолжительном режиме протекания таких токов должны соответствовать стандарту [3.15], а *ТТ* на более высокие напряжения (за исключением встроенных *ТТ*, работающих на трансформаторном масле) – стандарту [3.16]. Допустимые значения наибольших рабочих первичных токов *ТТ* в диапазоне до 10 кА равны, как правило, номинальным или не превышают их более, чем на 4-7% (например, для  $I_{ном}=300\text{А}$   $I_{лр}=320\text{А}$ ).

Требования к стойкости при токах КЗ для *ТТ* на напряжение свыше 0,66 кВ определяют их устойчивость к *нормированным токам*, действие которых трансформатор способен выдержать при КЗ в течение *нормированного времени*, - *электродинамическому* (для шинных, встроенных и разъемных *ТТ* не определяется) и *термическому* воздействиям токов КЗ, параметры которых не превышают установленных значений\*: а) *тока электродинамической стойкости*  $i_d$  или его кратности  $K_d$  по отношению к амплитуде  $I_{ном}$ ; б) *тока термической стойкости*  $I_m$  или его кратности  $K_m$  по отношению к  $I_{ном}$ ; в) времени протекания тока  $t_k$ , равного 1 или 3с для *ТТ* с  $U_{ном} \leq 220\text{ кВ}$  и 1 или 2с для *ТТ* с  $U_{ном} \geq 330\text{ кВ}$ . Указанные величины устанавливаются в стандартах на *ТТ* конкретных типов.

\*согласно [3.3], *ток электродинамической стойкости* определяется как «*наибольшее амплитудное значение тока КЗ за все время его протекания, которое ТТ выдерживает без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе*» (этот ток характеризует способность *ТТ* противостоять механическим воздействиям тока КЗ), а *ток термической стойкости* – как «*наибольшее действующее значение тока КЗ за промежуток времени, которое ТТ выдерживает в течение этого промежутка времени без нагрева токоведущих частей до температур, превышающих допустимые при токах КЗ, и без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе*».

Выводы первичных и вторичных обмоток *ТТ* должны обозначаться, согласно [3.7], соответственно как  $L_1, L_2$  и  $I_1, I_2$  ( $1I_1-1I_2$ ,  $2I_1-2I_2$  и т.д. в случае нескольких вторичных обмоток), где индексом 1 обозначают *начало*, а индексом 2 – *конец* обмотки (при направлении тока в первичной обмотке от  $L_1$  к  $L_2$  ток во вторичной обмотке в тот же момент времени должен быть направлен через вторичную цепь от  $I_1$  к  $I_2$ ).

### 3.2.3 Магнитные свойства магнитопровода трансформатора

Технические, метрологические и другие параметры современных электромагнитных *ТТ* определяются в первую очередь характеристиками их *магнитных систем – магнитопроводов (сердечников)*. Эти характеристики зависят не только от конструкции магнитопроводов (их структуры, размера и формы), но, главным образом, - от типа и марки используемого магнитного материала, его электромагнитных свойств. В качестве материала для магнитопроводов современных *ТТ* используют, как правило, три группы различных ферромагнитных магнитомягких сплавов: а) *электротехническую сталь (ЭТС)\**, б) *пермаллой (ПМ)\*\**, б) *нанокристаллические сплавы (НКС)\*\*\** [3.17-3.20].

\**ЭТС* (сталь - сплав железа с углеродом до 2% С) содержит добавки кремния (до 4,8% Si), который увеличивает ее магнитную проницаемость и электросопротивление, снижая удельные потери энергии в материале. *ЭТС* подразделяют по видам продукции на *листовую, рулонную и ленту*, а *тонколистовую ЭТС* классифицируют: а) по структурному состоянию и виду прокатки на три класса: 1- горячекатаную изотропную, 2 - холоднокатаную изотропную, 3- холоднокатаную анизотропную с ребровой текстурой (с выраженным ориентированным зерном); б) по содержанию кремния на шесть типов (например, тип 4 содержит 2,8-3,8 Si); в) по основной нормируемой характеристике – *удельным магнитным потерям*  $P[\text{Вт/кг}]$  – при заданной индукции  $B[\text{Тл}]/\text{частоте}[Гц]$  на пять групп: 0 - ( $P_{1,7/50}$ ), т.е. при  $B=1,7\text{ Тл}$  и  $f=50\text{ Гц}$ ; 1 – ( $P_{1,5/50}$ ) и другие [3.20]. По содержанию кремния *ЭТС* подразделяют на *динамную* ( $<2,8\%\text{Si}$  - типы 0-3, обладает повышенной механической прочностью) и *трансформаторную* ( $>2,8\%\text{Si}$  - типы 4 и 5, обладает повышенными магнитными свойствами). Для изготовления магнитопроводов *ТТ*, работающих в электрической сети 50-60 Гц, используют чаще всего высококачественную тонколистовую трансформаторную сталь класса 3, типа 4, группы 0 или 1, т.е. марок 340х (например, 3408) или 341х, изготавливаемую толщиной 0,27-0,35мм, шириной 650-1000мм и поставляемую сталепрокатным предприятием изготовителю трансформаторов в виде рулонов весом до 5 т.

**\*\*ПМ** – железоникелевый сплав, содержащий 45-80% никеля (*Ni*), железо (*Fe*), хром, кремний, молибден (*Mo*) (ПМ относится по [3.21] к *первой группе прецизионных высоколегированных деформируемых сплавов* - магнитомягким сплавам с высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой в слабых полях). Различают *низконикелевые* (40-50% *Ni*) и *высоконикелевые* (70-83% *Ni*) пермаллои (с ростом процента никеля возрастают величины магнитной проницаемости и удельных магнитных потерь, уменьшается индукция насыщения). Наиболее высокими магнитными свойствами обладают *супермаллои*, например, марки 80НМ (80% *Ni*, 15% *Fe*, 5% *Mo*). ПМ производят в виде лент или листов толщиной соответственно 0,02-2,5 мм и 3-22 мм.

**\*\*\* НКС** (аморфные сплавы, или металлические стекла) – это быстрозакаленные ферромагнитные сплавы на основе железа, кремния, бора (*B*), ниобия (*Nb*) и меди (*Cu*), получаемые путем разлива расплава на поверхность вращающегося с большой скоростью валька-холодильника. При высокой скорости охлаждения (до 1 млн.  $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ) в сплаве толщиной 0,025-0,03 мм резко замедляется тепловое движение атомов, они теряют способность менять своих соседей и формировать крупнокристаллическую решетку (кристаллы и домены не успевают вырасти, их линейные размеры в тысячи раз меньше обычных - не более 10-20 нм), сплав приобретает аморфный, стекловидный характер. К настоящему времени получены сотни различных сплавов в аморфном состоянии (одни из первых - сплавы под торговой маркой “Finemet” состава 73,5%*Fe*, 13,5%*Si*, 9%*B*, 3%*Nb*, 1%*Cu*), причем у некоторых из них процесс кристаллизации удается подавить при существенно меньших (тысячи и даже сотни  $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ) скоростях охлаждения. Состав и свойства НКС регламентируются техническими условиями их изготовителей.

Основные характеристики образцов ферромагнетиков (например, в виде ленточных кольцевых магнитопроводов) определяют по *кривым намагничивания* – зависимостям магнитной индукции *B* (или намагниченности *J*, см. параграф 2.3) от напряженности магнитного поля *H*, в котором исследуются эти образцы (рис. 3.2.4)\*. Такие кривые имеют вид *петли магнитного гистерезиса* - замкнутой кривой, выражающей зависимость магнитной индукции (намагниченности) материала от амплитуды напряженности магнитного поля при его периодическом достаточно медленном изменении [3.19]. Гистерезис (*от греч. hysteresis отставание, запаздывание*) характеризует неоднозначную связь между физическими величинами: значение одной величины зависит не только от текущего значения другой величины, но и от ее предыдущих значений, от истории процесса изменения величин. При магнитном гистерезисе одному и тому же значению *H* соответствуют разные значения *B* (или *J*). \*\*

\*На тороиде с внутренним радиусом *r* находится равномерно и плотно навитая обмотка провода с числом витков *w*. При этом силовые магнитные линии в ферромагнетике представляют собой окружности, а векторы напряженности и индукции магнитного поля направлены по касательным к ним. Для тонкостенного тороида, в котором  $\Delta r \ll r$ , можно принять длину всех магнитных линий одинаковой и равной  $L=2\pi \cdot r$ . Тогда напряженность магнитного поля равна  $H=F/L=I \cdot w/2\pi \cdot r$ , где  $F=I \cdot w$  – *магнитодвижущая сила* (см. параграф 2.3). Каждому значению напряженности *H* магнитного поля в тороиде соответствует определенная намагниченность ферромагнитного материала, а следовательно, и соответствующее значение магнитной индукции *B*.

\*\* Помимо магнитного известны и другие виды гистерезиса (например, диэлектрический, упругий). Магнитный гистерезис обусловлен *доменной структурой* ферромагнетика (*домены* – области с пространственно однородными упорядоченными магнитными моментами атомов или ионов, т.е. области *спонтанной намагниченности*). В однородном многодоменном ферромагнетике в отсутствие внешнего поля его суммарная намагниченность близка к нулю, так как домены имеют одинаковую величину намагниченности, но разное направление. Под действием внешнего поля магнитный момент ферромагнетика увеличивается за счет *поворота* разноориентированных доменов по полю и их *смещения* - увеличения числа и размеров намагниченных по полю доменов за счет поглощения ими других доменов. Вращение и смещение доменов связаны с изменением их *границ (стенок)*, которое затруднено из-за наличия в материале дефектов (дислокаций, примесей, неоднородностей), препятствующих движению доменов и требующих затрат энергии на преодоление сопротивления дефектов. Поэтому перемагничивание материала всегда приводит к *магнитным потерям на гистерезис* (они являются частью общих *удельных магнитных потерь* – потерь мощности, поглощаемой в единице массы ферромагнетика и рассеиваемой в виде тепла при воздействии на него меняющегося во времени магнитного поля; другой частью таких потерь в быстроменяющихся полях являются *удельные магнитные потери на вихревые токи* [3.19]). Доменная память запоминает историю изменения внешнего магнитного поля, создавая в ферромагнетике соответствующие магнитные структуры с адекватными значениями магнитной индукции.



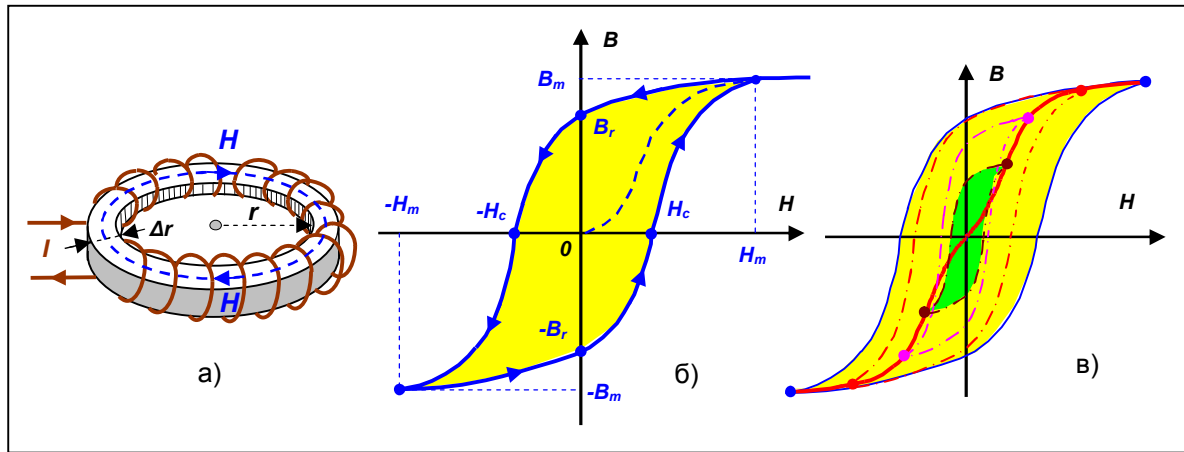


Рис.3.2.4 Кольцевой магнитопровод (а) и его петли магнитного гистерезиса по индукции: б) начальная кривая намагничивания (штриховая линия) и предельная петля магнитного гистерезиса, в) семейство симметричных петель магнитного гистерезиса (штрихпунктирные линии) и основная кривая намагничивания (утолщенная линия)

Среди кривых намагничивания различают, согласно [3.19], **начальную кривую намагничивания** (определяет зависимость  $B$  (или  $J$ ) от  $H$  в процессе намагничивания предварительно размагниченного ферромагнетика при последовательном возрастании  $H$ ), **симметричную петлю магнитного гистерезиса** (петлю, получаемую при циклическом изменении  $H$  между равными по абсолютному значению максимальным  $H_{max}$  и минимальным  $H_{min}$  значениями  $H$  и симметричную относительно начала координат; если поле изменять в пределах, меньших чем насыщение, то получают *непредельную*, или *частную* симметричную петлю), **предельную петлю магнитного гистерезиса** (симметричную петлю, максимальное значение намагниченности которой соответствует **намагниченности технического насыщения ( $НТН$ )**, под которой понимается такая намагниченность, которая не может быть существенно повышена при дальнейшем увеличении  $H$ ; при этом образец состоит из одного домена с магнитным моментом насыщения, направленным по полю) и **основную кривую намагничивания** (кривую, представляющую собой геометрическое место вершин симметричных петель магнитного гистерезиса, которые получаются при последовательно возрастающих максимальных значениях  $H$ ).

Кривые намагничивания используют для определения магнитных характеристик ферромагнетиков: **индукции технического насыщения  $B_s$**  (определяется экстраполяцией из области  $H$ , соответствующей  $НТН$ , к  $H=0$ ); **остаточной индукции  $B_r$**  (сохраняется в ферромагнетике после намагничивания его до  $НТН$  и уменьшения  $H$  до нуля); **коэрцитивной силы по индукции  $H_c$**  (равна  $H$ , необходимой для изменения магнитной индукции от  $B_r$  до нуля, т.е. полного размагничивания материала); **начальной магнитной проницаемости  $\mu_n$**  (значении  $\mu$  на начальной или основной кривой намагничивания по индукции при стремлении  $H$  к нулю, деленном на значение магнитной постоянной  $\mu_0=1,2566 \cdot 10^{-6}$  Гн/м) и **максимальной магнитной проницаемости  $\mu_{max}$**  (максимальном значении  $\mu$  как функции  $H$  на основной кривой намагничивания по индукции).

Вид, размеры и параметры петли магнитного гистерезиса разных ферромагнетиков различаются в широких пределах. На петлю сильно влияет, помимо вида и марки материала, его термическая, химическая и механическая обработки, изменяющие количество дефектов в материале (после обработки материал всегда, в целях снятия внутренних напряжений, подвергается *отжигу* – термической обработке с последовательным нагревом, выдержкой и медленным охлаждением). Коэффициент прямоугольности, равный отношению  $K_n = B_r/B_s$ , задает форму петли: **прямоугольную** (при  $K_n \geq 0,85$ ) или **округлую** (при  $K_n < 0,85$ ). Площадь петли определяет энергию, теряемую в образце за один цикл перемагничивания – *магнитные потери на гистерезис*. Эта площадь существенно зависит от коэрцитивной силы: чем меньше величина  $H_c$ , тем меньше площадь и, следовательно, меньше потери энергии. По величине  $H_c$  ферромагнетики подразделяют на **магнитомягкие** ( $H_c < 4$  кА/м) и **магнитотвердые** ( $H_c \geq 4$  кА/м) [3.19]. Для магнитопроводов ТТ используют магнитомягкие материалы с узкой петлей гистерезиса, которые работают, как правило, в диапазоне изменения напряженности магнитного поля до  $H=800$  А/м с  $H_c=0,4-12$  А/м и с минимальными потерями на перемагничивание (например, удельные магнитные потери для ЭТС марок 340х, нормируемые при  $f=50$  Гц,  $H=100$  А/м,  $B=1,7$  Тл, составляют 1,1-1,6 Вт/кг [3.20]).

С ростом частоты  $f$  переменного магнитного поля, т.е. числа циклов перемагничивания в единицу времени, к гистерезисным потерям в материале добавляются другие потери, связанные с **вихревыми токами** (“электрическими токами в проводящем теле, вызванными электромагнитной индукцией, замыкающимися по контурам, образующим односвязную область” [3.22]) и **магнитной вязкостью** (реакцией материала, зависящей от длительности воздействия поля и проявляющейся магнитным последствием – дополнительным по отношению к гистерезису запаздыванием). При этом площадь петли на высоких частотах перемагничивания существенно увеличивается: **статическая петля гистерезиса** (образуется при медленных изменениях напряженности квазипостоянного магнитного поля) превращается **в динамическую петлю гистерезиса** (образуется при намагничивании материала переменным магнитным полем). В общем случае, удельные магнитные потери тем меньше, чем меньше площадь динамической петли гистерезиса и частота перемагничивания, но больше удельное электрическое сопротивление  $\rho$  материала (типичная величина  $\rho$  для ЭТС и ПМ составляет 0,5-0,6, а для НКС – 1,3-1,6 мкОм·м).

На рис. 3.2.5 в качестве примера приведены основные кривые намагничивания для ленточных кольцевых магнитопроводов низковольтных ТТ класса 0,5S из ЭТС, НКС и их комбинации. Для обеспечения работы ТТ с заданной точностью важны в первую очередь линейные участки этих кривых, находящиеся на графиках до области насыщения, и их крутизна. При обеспечении линейности сохраняется пропорциональность между первичным и вторичным токами ТТ, позволяющая по измеренному вторичному току правильно, с допустимыми погрешностями определить первичный ток, а необходимая крутизна кривой дает возможность правильно отслеживать даже небольшие изменения первичного тока.

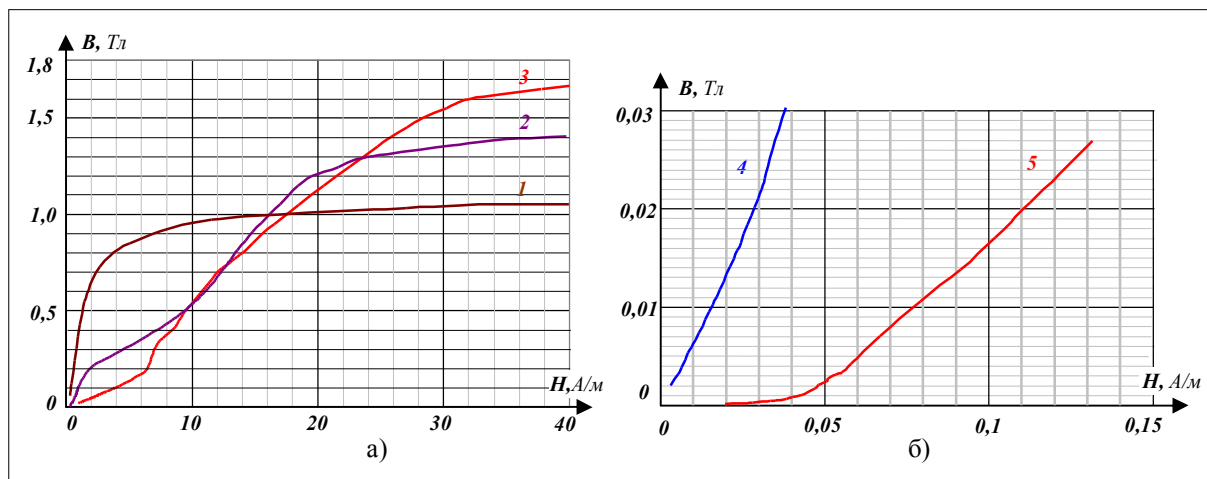


Рис.3.2.5 Основные кривые намагничивания ленточных кольцевых магнитопроводов из различных сплавов: а) 1- *НКС 5БДСР* (Ашинский металлургический завод), 2 - комбинированный магнитопровод (20% *5БДСР* и 80% *ЭТС 3425*), 3– *ЭТС 3405*; б) начальные участки основных кривых намагничивания: 4- *НКС (Германия)*, 5 – *ЭТС 3407*

Из кривых намагничивания следует, что для магнитопроводов из *НКС* они обладают линейностью и максимальной крутизной не только на основном, но и на начальном участке намагничивания, в котором магнитопроводы работают при токах  $1-5\% I_{ном}$ . Большая крутизна кривой на этих участках свидетельствует о высоких значениях начальной  $\mu_n$  и максимальной  $\mu_{max}$  магнитных проницаемостей. Для сравнения,  $\mu_n$  и  $\mu_{max}$  большинства *НКС* находятся соответственно в диапазонах  $(10^4 - 2 \cdot 10^5)$  и  $(10^5 - 1,5 \cdot 10^6)$ , а для *ЭТС* – в диапазонах  $(10^2 - 10^3)$  и  $(10^3 - 5 \cdot 10^4)$ . Вместе с тем, в магнитопроводах из *НКС* быстрее (при меньших значениях  $H$ ) достигается уровень технического насыщения, а индукция насыщения имеет меньшие значения, чем для *ЭТС*.

В силу этих особенностей, магнитопроводы из *НКС* позволяют для *ТТ* высокого класса точности (с литерой “S”) обеспечить требуемый уровень погрешностей не только при малых первичных токах, но и во всем диапазоне  $1-120\% I_{ном}$ . Из-за возможности быстрого вхождения в режим насыщения такие *ТТ* имеют, как правило, малое значение номинального коэффициента безопасности ( $K_{Бном}=1,5-3$ ) и чувствительны к перегрузкам по первичному току. Поэтому при их эксплуатации необходимо обеспечить работу *ТТ* строго в установленном диапазоне первичного тока. Магнитопроводы из *ЭТС*, наоборот, характеризуются нелинейным характером начального участка кривой намагничивания, меньшей его крутизной и поэтому для них труднее обеспечить правильную работу *ТТ* при первичных токах, меньших  $5\% I_{ном}$  (особенно в процессе эксплуатации и магнитного старения материала). Зато такие магнитопроводы позволяют сохранить погрешности в допустимых пределах при первичных токах, значительно больших номинальных, и имеют более высокий коэффициент безопасности ( $K_{Бном}=5-10$ ). *ТТ* с комбинированными сердечниками (см.рис.3.2.4,а, кривая 2) позволяют объединить эксплуатационные достоинства магнитопроводов из *НКС* и *ЭТС*, скомпенсировав одновременно их недостатки.

Дополнительные преимущества магнитопроводов из *НКС* связаны с их высоким удельным сопротивлением (в 3-4 раза выше, чем у *ЭТС*), позволяющем снизить удельные магнитные потери на вихревые токи до 0,3-0,4 Вт/кг при  $f=50$  Гц, до 5-6 Вт/кг при  $f=20$  кГц или 100-120 Вт/кг при  $f=100$  кГц (в анизотропной *ЭТС* такие потери могут достигать 90% всех магнитных потерь). Это же свойство *НКС* позволяет упростить и удешевить изготовление ленточных сердечников, так как снимает необходимость изоляции слоев ленты лаком: для этого достаточна естественная оксидная пленка на поверхности лент. Магнитопроводы из *НКС* обладают устойчивостью к магнитному старению и расчетной стабильностью своих электромагнитных характеристик на 50-100 лет, что важно для длительной эксплуатации *ТТ*. За счет высоких магнитных свойств сердечников можно снизить их габариты и затраты провода на вторичную обмотку, что дополнительно уменьшает электрические потери в меди *ТТ*.

Температура точки Кюри (“критической температуры, выше которой ферромагнетик становится парамагнетиком” [3.19], т.е. теряет свою спонтанную намагниченность) для ряда *НКС*, например, типа *Finemet* составляет  $570^\circ\text{C}$  (для сплава *5БДСР* -  $350^\circ\text{C}$ ), а максимальная температура их длительного применения не менее  $240^\circ\text{C}$ . Аморфные сплавы характеризуются минимальным уровнем внутренних дефектов (дислокаций), что обеспечивает изделиям из *НКС*

высокую прочность и твердость, стойкость к износу и коррозии, но вместе с тем пониженную пластичность (носителями пластичности являются дислокации, отсутствующие в *НКС*) и более высокую хрупкость. Поэтому сердечники из *НКС* следует предохранять и защищать от ударов (с этой целью их помещают в защитный полимерный корпус или заливают компаундом в *ТТ* с литой изоляцией). Суммируя, следует отметить, что по своим электромагнитным свойствам *НКС* существенно превосходят *ЭТС*, сопоставимы с лучшими марками пермаллоя, отличаясь от последних более низкой стоимостью, а от обоих своих предшественников - большей стойкостью и стабильностью своих магнитных характеристик.

### 3.2.4 Теория электромагнитного трансформатора тока

Типовая структурная схема *ТТ*, присоединенного к фазе электрической сети, приведена на рис.3.2.6 [3.17]. Первичная обмотка *ТТ* включается в фазу последовательно (в рассечку токопровода), а вторичная обмотка замыкается через *линии связи* (провода длиной  $l_{2n}$ ) на вторичную нагрузку  $Z_{2np}$ , которая моделирует входное полное сопротивление измерительного прибора. Первичная и вторичная обмотки электрически изолированы друг от друга, но взаимосвязаны магнитопроводом, который локализует и в  $\mu$  раз усиливает магнитный поток  $\Phi_1 = B \cdot S$ , создаваемый мдс  $F_1 = I_1 \cdot w_1$ , где  $B = \mu_0 \mu H_1$  – магнитная индукция в магнитопроводе,  $S$  – площадь его сечения, а  $H_1 = f(I_1)$  – напряженность магнитного поля первичного тока (для одновитковой первичной обмотки  $F_1 = I_1$ )\*.

\*Вообще говоря, магнитную связь между первичной и вторичной обмоткой можно организовать и без магнитопровода, например, путем намотки вторичной обмотки поверх первичной, как это делается в так называемых «воздушных» *ТТ* (их преимущество перед обычными *ТТ* – высокая линейность зависимости вторичного тока от первичного). Но, при этом, во-первых, трудно обеспечить требуемую изоляцию низковольтной вторичной цепи относительно высоковольтной первичной цепи (особенно при токах *КЗ* в первичной цепи), и, во-вторых, величины вторичной эдс и тока окажутся в тысячи раз меньше (в силу уменьшения магнитного потока и величины мощности, передаваемой с ним во вторичную цепь), что потребует их предварительного усиления для обеспечения срабатывания измерительных приборов, подключенных к вторичной обмотке *ТТ*.

Величина тока  $I_1$  в первичной цепи *ТТ* не зависит от тока его вторичной цепи и определяется *первичной нагрузкой*  $Z_1$  – совокупностью *электроприемников* (*ЭП*), подключенных к электросети, которая в процессе работы может *скачкообразно* (из-за процессов включения/отключения отдельных *ЭП*) или *плавно* (при изменении режимов работы *ЭП*) изменяться в больших пределах. Напомним, что работа *ТТ* по первичному току нормируется стандартами в диапазоне 5-120% или 1-120%  $I_{1ном}$  (для *ТТ* класса точности с литерой *S*; *ТТ* отдельных изготовителей обладают возможностью работать в классе и в более широком диапазоне первичного тока). В силу того, что сопротивление первичной обмотки *ТТ*, как правило, ничтожно мало (например, для одновитковой стержневой обмотки в виде медной шинки оно составляет миллионные доли ома), падение напряжения на ней не превышает сотых-тысячных долей вольта при любых номинальных первичных токах.

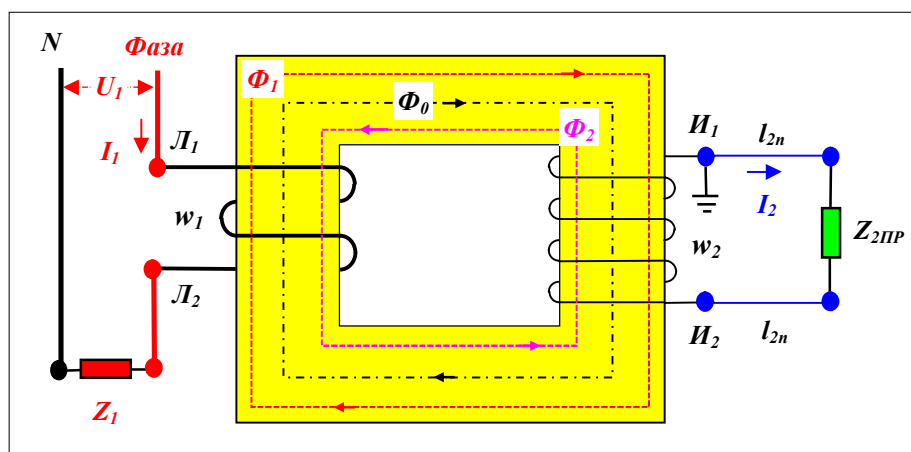




Рис.3.2.6 Типовая структурная схема трансформатора тока, включенного в электрическую сеть, с присоединенной вторичной нагрузкой

Нормальным режимом работы  $ТТ$  является режим, близкий к режиму  $КЗ$  его вторичной цепи [3.17, 3.23-3.27]. Например, для  $ТТ$  с номинальной мощностью вторичной нагрузки  $S_{2ном}=5ВА$  и номинальным вторичным током  $I_{2ном}=5А$ , максимальная нагрузка вторичной цепи не должна превышать номинальную:  $Z_{2max} < Z_{2ном} = S_{2ном}/I_{2ном}^2 = 5/5^2 = 0,2Ом$ . Максимальная нагрузка вторичной цепи  $Z_{2max}$  равна сумме сопротивлений проводов  $Z_{2л}$  (на объектах учета измерительные приборы нередко размещаются на удалении в десятки-сотни метров от  $ТТ$ , и в этих условиях нельзя пренебрегать сопротивлением соединительных проводов) и сопротивления  $Z_{2ПР}$  последовательных цепей подключаемых к  $ТТ$  измерительных приборов:  $Z_{2max} = Z_{2л} + Z_{2ПР}$ .

Работа  $ТТ$  в нормальном режиме происходит следующим образом. При появлении первичного тока изменяющийся вместе с ним магнитный поток  $\Phi_1$  начинает циркулировать по замкнутому магнитопроводу, индуцируя во вторичной обмотке эдс  $e_2 = -w_2 d\Phi_1/dt$ , которая создает в этой же обмотке и во вторичной цепи, на которую она замкнута, ток  $i_2$ . В соответствии с *правилом Ленца* (см. параграф 2.5), этот ток своим магнитным полем противодействует изменению магнитного потока  $\Phi_1$ , т.е. создаваемый ток  $i_2$  магнитный поток  $\Phi_2$  в каждый момент времени направлен против потока  $\Phi_1$ . В результате взаимодействия встречных магнитных потоков в магнитопроводе в стационарном режиме устанавливается уменьшенный суммарный магнитный поток  $\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2$  (в векторном виде  $\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2$ ), направление которого совпадает с направлением  $\Phi_1$ , а величина не превышает, как правило, одного процента  $\Phi_1$ . Этот результирующий нормальный поток  $\Phi_0$  индуцирует во вторичной обмотке небольшую эдс  $e_{02} = -w_2 d\Phi_0/dt$  (ее величина, например, при  $I_{2ном}=5А$  и  $Z_{2ном}=0,2Ом$  равна  $1В$ ), поддерживающую во вторичной цепи ток, пропорциональный значению тока первичной цепи.

В случае  $КЗ$  в первичной цепи, когда  $Z_1$  стремится к нулю и первичный ток в десятки-сотни раз превышает номинальный (длительность протекания тока  $КЗ$  определяется быстродайствием защиты и не превышает, как правило, долей секунды), безопасность вторичной цепи  $ТТ$  и включенных в нее измерительных приборов обеспечивается за счет вхождения магнитопровода в насыщение. При этом, несмотря на возрастание первичного тока, магнитный поток в сердечнике ограничен, и, следовательно, ограничены вторичные эдс и ток\*.

В таком режиме возможная кратковременная перегрузка по вторичному току определяется номинальным коэффициентом безопасности  $K_{Бном}$  приборов измерительной обмотки  $ТТ$ .

\*в воздушных  $ТТ$ , из-за отсутствия в них сердечника, выполняющего функции ограничения магнитного потока, при  $КЗ$  в первичной цепи возможен выход из строя элементов, включенных во вторичную цепь.

Не нормальным, или аварийным режимом работы  $ТТ$ , является режим разомкнутой вторичной цепи. При исчезновении из-за обрыва вторичной цепи тока  $i_2$  и созданного им магнитного потока  $\Phi_2$  нормальный поток  $\Phi_0$  возрастает до  $\Phi_1$ . При этом, во-первых, во вторичной обмотке индуцируется большая эдс  $e_2$  (до нескольких киловольт, в зависимости от силы тока в первичной цепи), которая может вызвать пробой изоляции и поражение электрическим током обслуживающего персонала, и, во-вторых, из-за большого увеличения магнитной индукции в сердечнике значительно возрастают в нем удельные магнитные потери, что приводит к нагреву и вибрации сердечника, и в конечном счете к его преждевременному магнитному старению и метрологическому отказу  $ТТ$ . Поэтому при эксплуатации  $ТТ$  нельзя допускать размыкания его вторичной цепи при наличии ненулевого первичного тока. В случае замены измерительного прибора, подключенного к вторичной обмотке работающего  $ТТ$ , эту обмотку необходимо предварительно «закоротить», а после переподключения прибора убрать



влево. Поток  $\Phi_0$  производится мдс  $F_0$ , равной векторной сумме  $F_0 = F_1 + F_2 = I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1$ , величина которой не превышает в нормальном режиме работы  $ТТ$ , как правило, одного процента  $F_1$  (на диаграмме масштаб  $F_0$  преувеличен). Мдс  $F_0$  опережает поток  $\Phi_0$  на угол  $\varphi_0$ , называемым *углом потерь*, и характеризуется реактивной (индуктивной)  $F_{0p}$  составляющей, создающей магнитный поток  $\Phi_0$ , и активной  $F_{0a}$  составляющей, которая затрачивается на магнитные потери в сердечнике. Реактивная составляющая коллинеарна потоку  $\Phi_0$ , а активная перпендикулярна к нему.

Вектор  $F_1$  строится как векторная сумма  $F_0$  и  $-F_2$  (очевидно, что всегда  $F_1 \geq F_2$ ). Угол  $\Theta$  между векторами  $F_1$  и  $-F_2$  (или токами  $I_1$  и  $-I_2$ ) представляет собой *угловую погрешность  $ТТ$* , которая, как следует из табл.3.2.1, не должна превышать, например, для  $ТТ$  класса точности 0,5 или 0,5S, величины 90 мин, или  $1,5^\circ$  на нижней нормируемой границе первичного тока (на диаграмме масштаб  $\Theta$  преувеличен). Эта погрешность считается *положительной*, когда вектор  $-F_2$  опережает вектор  $F_1$  (в общем случае угол  $\Theta$  может быть как положительным, так и отрицательным, что определяется соотношением углов  $\varphi_2$  и  $\varphi_0$ ).

Качественный анализ векторной диаграммы показывает, что угол  $\varphi_2$  между вторичными током и эдс тем больше, чем меньше сумма «потерь в меди» ( $R_{2m} + R_{2h}$ ) и/или больше сумма реактивных сопротивлений вторичной обмотки и нагрузки ( $X_{2m} + X_{2h}$ ). Максимальное значение  $\varphi_2 = 90^\circ$  угол имеет, если «потери в меди» равны нулю. При этом вектор эдс  $E_2$  перпендикулярен вектору  $I_2$  и соответственно вектор  $\Phi_0$  коллинеарен вектору  $-F_2$  (или  $-I_2$ ). Если при этом «потери в стали» равны нулю ( $F_{0a} = 0$ ), то данным векторам коллинеарен и вектор  $F_0$ , а, следовательно, и вектор  $F_1$ , равный геометрической сумме векторов  $F_0$  и  $-F_2$ . Таким образом, в *идеальном  $ТТ$*  (без потерь в «стали и меди») *угловая погрешность равна нулю:  $\Theta = 0$* . Можно показать (см. ниже), что в таком  $ТТ$  равен нулю и вектор  $F_0 = 0$ . Тогда  $F_1 = -F_2$  и по модулю  $I_1 w_1 = I_2 w_2$ . Из этого равенства следует:

$$I_1 = n_w \cdot I_2, \quad (3.2.4)$$

где  $n_w$  - **витковый коэффициент трансформации** (этот коэффициент дополняет ранее введенные *действительный* и *номинальный* коэффициенты трансформации).

**Витковый коэффициент трансформации  $ТТ$ :**  
 $n_w = w_2 / w_1$

(3.2.5)

В *идеальном  $ТТ$*  угловая и токовая погрешности равны нулю, а токи в обмотках обратно пропорциональны числам витков во всем диапазоне изменения токов. В *реальном же  $ТТ$*  всегда  $F_0 \neq 0$  (или  $I_0 \neq 0$ ) и  $\Theta \neq 0$ . Кроме того, реальный  $ТТ$  может работать только в определенном диапазоне первичных и вторичных токов, выбор которого привязан к их номинальным значениям.

Значения токовой  $\delta$  и угловой  $\Theta$  погрешностей  $ТТ$  зависят сложным образом от соотношения величин  $I_0$ ,  $I_2$ ,  $n_w$ ,  $n_{ном}$ ,  $\varphi_0$  и  $\varphi_2$ . Для количественного анализа погрешностей составим их уравнения на основе векторной диаграммы [3.25, 3.26, 3.28]. Из диаграммы видно, что  $\cos \Theta = (F_2 + F_0 \cdot \cos \varphi_{02}) / F_1$ , откуда следует, что  $I_1 w_1 = (I_2 w_2 + I_0 w_1 \cdot \cos \varphi_{02}) / \cos \Theta$ . Поскольку  $\Theta$  мал (менее  $1,5^\circ$ ), то можно положить  $\cos \Theta \approx 1$ . Тогда для  $I_1$  получим  $I_1 = (I_2 w_2 + I_0 w_1 \cdot \cos \varphi_{02}) / w_1$ , а действительный коэффициент трансформации равен:

$$n = I_1 / I_2 = w_2 / w_1 + I_0 \cdot \cos \varphi_{02} / I_2 = n_w + I_0 \cdot \cos \varphi_{02} / I_2. \quad (3.2.6)$$

Из формулы (3.2.6) видно, что для *идеального  $ТТ$* , в котором  $I_0 = 0$ , действительный коэффициент всегда равен витковому коэффициенту трансформации  $n = n_w$ . Для *реального же  $ТТ$*  всегда  $n > n_w$  на величину второго члена уравнения. Иными словами, при расчете первичного тока  $I_1^*$  по формуле (3.2.4) его значение всегда будет получаться с недостатком, т.е. с отрицательной угловой погрешностью  $\delta$ :  $I_1^* < I_1$ . Если принять условие:

$$n_{ном} = n_w, \quad (3.2.7)$$

то как следует из (3.2.6),  $n > n_{ном}$ , т.е. и в этом случае токовая погрешность будет отрицательна во всем диапазоне изменения  $I_1$  (тем более это сохранится при  $n_w > n_{ном}$ ). Если принять противоположное условие:

$$n_{ном} > n_w, \quad (3.2.8),$$

то в зависимости от величины  $\Delta n = n_{ном} - n_w$  и ее соотношения с величиной второго члена уравнения (3.2.6), токовая погрешность может быть отрицательна при одних значениях тока  $I_1$  и положительна при других его значениях, обращаясь в ноль при изменении знака. Уменьшить значение  $n_w$  при заданном  $n_{ном}$  можно за счет уменьшения на  $\Delta w_2$  количества витков вторичной обмотки: при неизменных  $I_1$ ,  $w_1$  с уменьшением  $n_w$  увеличивается  $I_2$ , т.е. уменьшается отрицательная токовая погрешность. Уменьшение токовой погрешности  $TT$  путем изменения числа витков вторичной обмотки называют **витковой коррекцией** [3.3].

Токовая погрешность реального  $TT$ , с учетом формул (3.2.3), (3.2.6), равенства углов  $\varphi_{02} = (\pi/2 - (\varphi_0 + \varphi_2))$ , которое следует из векторной диаграммы, и формулы приведения  $\cos(\pi/2 - \alpha) = \sin \alpha$  имеет вид [3.28]:

$$\delta = (1 - n_w/n_{ном} - I_0 \sin(\varphi_0 + \varphi_2)/n_{ном} I_2) \cdot 100\%. \quad (3.2.9),$$

При выводе уравнения *угловой погрешности* из временной диаграммы можно определить *тангенс*  $\Theta$  как отношение  $\operatorname{tg} \Theta = I_0 w_1 \sin \varphi_{02} / (I_2 w_2 + I_0 w_1 \cos \varphi_{02})$ . Величиной второго слагаемого в знаменателе дроби в сравнении с первым слагаемым можно пренебречь. Кроме того, в силу малости угла  $\Theta$  тангенс можно заменить самим углом (для  $\Theta \leq 1,5^\circ$  относительная погрешность такой замены меньше 0,02%). Тогда, с учетом замены угла  $\varphi_{02} = (\pi/2 - (\varphi_0 + \varphi_2))$  и формулой приведения, получим:

$$\Theta \approx I_0 w_1 \cos(\varphi_0 + \varphi_2) / w_2 I_2 = I_0 \cos(\varphi_0 + \varphi_2) / n_w I_2. \quad (3.2.10).$$

Из (3.2.9) и (3.2.10) при выполнении условия (3.2.7), с учетом формулы (3.1.4), следует:

$$\begin{aligned} &\text{Токовая } \delta \text{ и угловая } \Theta \text{ погрешности } TT \text{ при условии } n_{ном} = n_w: \\ &\delta = (-I_0 \sin(\varphi_0 + \varphi_2) / n_{ном} I_2) \cdot 100\% = (-I_0 \sin(\varphi_0 + \varphi_2) / I^*_1) \cdot 100\% \\ &\Theta \approx I_0 \cos(\varphi_0 + \varphi_2) / n_{ном} I_2 = I_0 \cos(\varphi_0 + \varphi_2) / I^*_1 \end{aligned} \quad (3.2.11)$$

Из (3.2.11) следует, что при  $n_{ном} = n_w$  и активно-индуктивной вторичной нагрузке  $TT$  токовая погрешность всегда отрицательна (так как  $0 < (\varphi_0 + \varphi_2) < \pi$ ), а угловая погрешность может быть как положительна (при  $(\varphi_0 + \varphi_2) < \pi/2$ ), так и отрицательна (при  $(\varphi_0 + \varphi_2) > \pi/2$ , что маловероятно, так как для этого требуются очень большие «потери в стали» - большой угол  $\varphi_0$  и очень малые «потери в меди» - большой угол  $\varphi_2$ ).

Для идеального  $TT$ , в котором  $I_0 = 0$ , обе погрешности равны нулю, независимо от значений других величин, входящих в формулы (в этом случае на векторной диаграмме вектор  $F_1$  совпадает с вектором  $-F_2$ ). В реальном  $TT$  всегда  $I_0 \neq 0$  и на значения погрешностей влияют все величины, входящие в их уравнения. В целях упрощения анализа, для конкретных  $TT$  можно исключить из рассмотрения величину  $\varphi_0$ , считая ее фиксированной в конструкции  $TT$ , а составляющую  $\varphi_2$  - свести к составляющей  $\varphi_{2н} = \varphi_2 - \varphi_{2м}$  ( $\varphi_{2м}$  также фиксирована). Тогда погрешности  $TT$  определяются тремя основными величинами:  $I_0$ ,  $I^*_1$  (или  $I_2$ ) и  $\varphi_{2н}$  ( $\varphi_{2н}$  зависит от соотношения реактивного  $X_{2н}$  и активного  $R_{2н}$  сопротивлений вторичной нагрузки  $Z_{2н}$ ). Графики токовой и угловой погрешностей  $TT$  принято изображать в виде их функциональной зависимости от процента отношения первичного тока к его номинальному значению. Типовые совмещенные графики погрешностей приведены на рис. 3.2.8 на примере  $TT$  класса точности 0,5S.

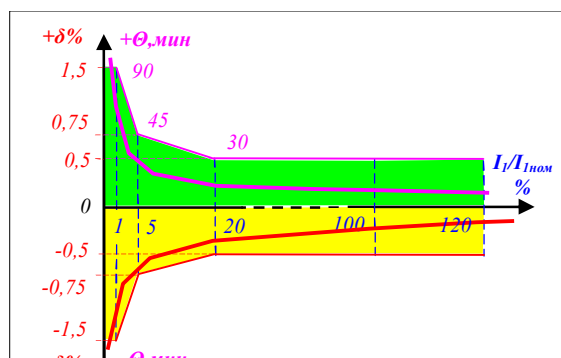




Рис.3.2.8 Совмещенные графики токовой  $\delta$  и угловой  $\Theta$  погрешностей  $TT$  класса точности  $0,5S$

Из графиков видно, что, в соответствии с формулами (3.2.11), наибольшие значения токовая и угловая погрешности имеют при минимальных значениях первичного тока, а с его увеличением они, наоборот, уменьшаются, причем отрицательная токовая погрешность становится при этом менее отрицательной, не достигая нуля и не пересекая оси абсцисс. Такое поведение погрешностей при малом первичном токе связано с пологим нелинейным характером начального участка основной кривой намагничивания сердечника из ЭТС (см. рис.3.2.5,б) и его низкой начальной магнитной проницаемостью. Как результат, при значительном уменьшении первичного тока магнитная индукция в сердечнике и связанный с ней ток намагничивания  $I_0$  сохраняются непропорционально большими, что ведет к увеличению отношения  $I_0/I^*_I$  (для сердечника из ПМ или НКС погрешности  $TT$  при минимальном первичном токе увеличиваются в гораздо меньшей степени).

При разомкнутой вторичной цепи  $TT$ , когда  $Z_{2н} = \infty$ ,  $I_2 = 0$  и погрешности  $\delta, \Theta$ , как следует из (3.2.11), из-за операции деления на нуль не определены. В нормальном режиме, когда  $Z_{2н} \leq Z_{2ном}$  и ток  $I_0 \approx 1\% I_1$ , погрешности зависят от  $I_2$ ,  $X_{2н}$  и  $R_{2н}$  и меняются следующим образом:

а) при уменьшении значения  $Z_{2н}$  (вплоть до нуля, когда  $\varphi_{2н} = 0$  и  $\cos \varphi_{2н} = 1$ ) ток  $I_2$  соответственно возрастает, а  $I_0$ ,  $\varphi_2$  и  $\sin(\varphi_0 + \varphi_2)$  уменьшаются, что ведет к уменьшению величины  $\delta$ : она становится более положительной, т.е. ее график смещается вверх; аналогично, уменьшается величина  $\Theta$ : она становится менее положительной, т.е. ее график смещается вниз, хотя и в меньшей степени, чем график  $\delta$ , что связано с одновременным увеличением  $\cos(\varphi_0 + \varphi_2)$  при уменьшения  $I_0$ ;

б) при сохранении значения  $Z_{2н}$ , но увеличении  $\cos \varphi_{2н}$  за счет снижения реактивной составляющей нагрузки, величины токов  $I_0$ ,  $I_2$  сохраняются,  $\sin(\varphi_0 + \varphi_2)$  уменьшается,  $\cos(\varphi_0 + \varphi_2)$  возрастает, и в результате  $\delta$  становится менее отрицательной, т.е. ее график смещается вверх, а  $\Theta$ , наоборот, увеличивается и ее график смещается также вверх;

в) в случае гипотетического полного исключения активных составляющих вторичной обмотки  $TT$  и ее нагрузки, очевидно, что  $\varphi_2 = 90^\circ$ , вектор потока  $\Phi_0$  совпадает по направлению с вектором  $-F_2$ , а вектор  $F_1$  опережает  $-F_2$ , т.е. угловая погрешность становится отрицательной.

Примеры рассмотренного смещения графиков  $\delta$  и  $\Theta$  для конкретных типов  $TT$  при изменении величины и характера их вторичной нагрузки приведены в [3.28-3.30] и на рис.3.2.9.

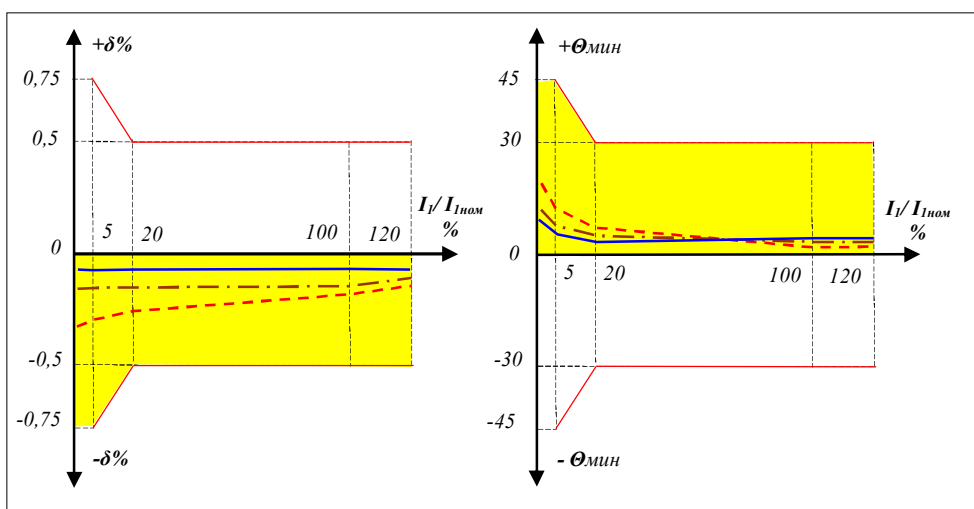


Рис.3.2.9 Графики токовой и угловой погрешностей для  $T-0,66-I-0,5S$  с сердечником из НКС при уменьшении вторичной нагрузки от  $Z_{2ном}$  (штриховая) до  $0,25Z_{2ном}$  (штрих-пунктирная) и  $Z_{2ном}=0$  (сплошная линия)

Из (3.2.9) и (3.2.10) при выполнении условия (3.2.8), т.е. использовании витковой коррекции, с учетом того, что  $n_w = (w_2 - \Delta w_2) / w_1 = w_2 / w_1 - \Delta w_2 / w_1 = n_{ном} - \Delta n_w$ , где  $\Delta w_2$  – абсолютная витковая коррекция,  $\Delta n_w = \Delta w_2 / w_1$ ,  $\Delta n_w \ll n_{ном}$ , следует:

$$\begin{aligned} & \text{Токовая } \delta \text{ и угловая } \Theta \text{ погрешности } TT \text{ при условии } n_{ном} > n_w: \\ & \delta = (\Delta n_w / n_{ном} - I_0 \sin(\varphi_0 + \varphi_2) / n_{ном} I_2) \cdot 100\% = (\delta_w - I_0 \sin(\varphi_0 + \varphi_2) / I^*_1) \cdot 100\% \\ & \Theta \approx I_0 \cos(\varphi_0 + \varphi_2) / (n_{ном} - \Delta n_w) I_2 \approx I_0 \cos(\varphi_0 + \varphi_2) / I^*_1 \\ & \text{где } \delta_w = \Delta n_w / n_{ном} = \Delta w_2 / w_2 - \text{относительная витковая коррекция} \end{aligned} \quad (3.2.12)$$

Витковая коррекция уменьшает витковый коэффициент, увеличивая тем самым при неизменном первичном токе вторичный ток и уменьшая токовую погрешность первичного тока, рассчитываемого не по витковому, а по номинальному коэффициенту трансформации. Если в отсутствие витковой коррекции пределом, к которому стремится отрицательная токовая погрешность является ось абсцисс (нуль), то с введением витковой коррекции таким пределом становится, как следует из формулы (3.2.12), положительная величина  $\delta_w$ , которая определяет прямую, параллельную оси абсцисс, расположенную в первом квадранте координатной плоскости. При наличии в  $TT$  витковой коррекции график  $\delta$  смещается вверх, пересекая в некоторой точке ось абсцисс. Тем самым токовая погрешность при одних (минимальных) значениях первичного тока остается по-прежнему отрицательной, но при других (больших) значениях этого тока становится положительной. В точке пересечения оси абсцисс она равна нулю.

Как следствие, токовая погрешность меняет свой характер, превращаясь из систематической (отрицательной) в случайную, т.е. имеющую разную полярность и различные значения в зависимости от величины первичного тока. Это обстоятельство является одной из причин широкого применения в большинстве  $TT$  витковой коррекции\*. Другая причина связана с трудностями обеспечения без витковой коррекции точной работы  $TT$  класса точности 0,2S и 0,5S с сердечниками из ЭТС в области минимальных первичных токов.

\* В  $TT$  без витковой коррекции токовая погрешность всегда отрицательна, т.е. трансформатор постоянно недоучитывает электроэнергию, что дает необоснованные экономические преимущества одной из сторон, участвующих в коммерческих расчетах по электроэнергии. При этом ущерб всегда несет продавец электроэнергии (энергоснабжающая организация), а выгоду получает покупатель (потребитель). В некоторых странах принято, что если погрешность  $TT$  носит систематический характер (хотя и остается в рамках своего класса точности), то такому  $TT$  присваивают более низкий класс точности.

Токовая погрешность  $TT$  ограничивается в рамках соответствующего класса точности, как это следует из табл.3.2.1, допустимыми пределами  $\pm \delta_{дон}$ . Например, для  $TT$  класса точности 0,5 (см. рис.3.2.3,б)  $\delta_{дон} = \pm 0,5\%$  при первичном токе  $100-120\% I_{1ном}$  и вторичной нагрузке  $0,25-100\% S_{2ном}$ . Витковая коррекция приводит к тому, что в соответствии с формулой (3.2.12) значение  $\delta_w$ , ограничивающее возможный абсолютный положительный рост токовой погрешности, может превысить допустимые границы класса точности:  $\delta_w > \delta_{дон}$ . Обычно

$\Delta w_2=0,5-1$ , т.е. абсолютная коррекция проводится на виток или полвитка. Например, для *ТЛМ-10-0,5-300/5*, рассмотренного в [3.30],  $w_1=2$ ,  $w_2=119$  (с учетом сделанной коррекции; без коррекции  $w_2=120$  и  $n_w=120/2=60$ ) и  $n_{ном}=300/5=60$ . В этом случае  $\Delta w_2=1$ ,  $\Delta n_w=1/2=0,5$  и  $\delta_w=\Delta w_2/w_2=1/120=0,83\%$ , что превышает допустимую границу  $0,5\%$  класса точности. Это не имеет особого значения, если вторичная нагрузка ТТ остается в рамках стандартного диапазона, так как все ТТ должны работать в классе при уменьшении вторичной нагрузки до  $25\% S_{2ном}$ . Но если в реальных условиях эксплуатации ТТ возможно понижение этой нагрузки меньше  $25\% S_{2ном}$ , то реален выход ТТ за пределы допуска своего класса точности (рис.3.2.10).

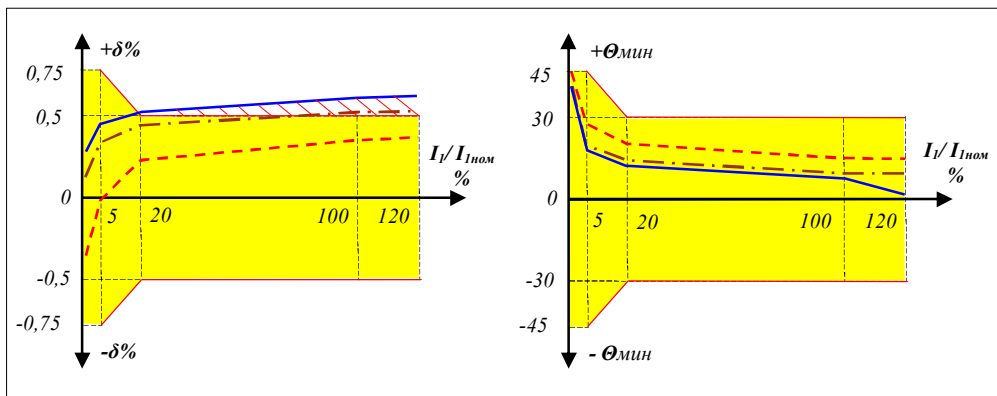


Рис.3.2.10 Графики токовой и угловой погрешностей для *T-0,66-1-0,5S* с сердечником из ЭТС при уменьшении вторичной нагрузки от  $Z_{2ном}$  (штриховая) до  $0,25Z_{2ном}$  (штрих-пунктирная) и  $Z_{2ном}=0$  (сплошная линия)

Действительно, при уменьшении величины вторичной нагрузки, как следует из (3.2.12) и выше проведенного анализа аналогичной ситуации в случае *ТТ* без коррекции, величина второго слагаемого (вычитаемого) уменьшается (оно становится менее отрицательным, продолжая быть меньше нуля), но разность, т.е. значение  $\delta$ , увеличивается: график погрешности смещается вверх в сторону ее верхней границы. Наоборот, при увеличении вторичной нагрузки увеличивается вычитаемое, а разность, т.е. значение  $\delta$ , уменьшается. Не исключено, что при определенном уменьшении вторичной нагрузки,  $\delta$  приблизится к  $\delta_w$  и тем самым выйдет за пределы класса точности. Чтобы такого при любом самом низком значении вторичной нагрузки гарантированно не произошло, достаточно потребовать выполнения условия:

$$\delta_w < \delta_{доп}, \quad (3.2.13)$$

т.е. относительная витковая коррекция не должна превышать по токовой погрешности допустимой границы класса точности  $\delta_{доп}$ .

Поведение *угловой погрешности* для *ТТ* с витковой коррекцией, как следует из (3.2.12), аналогично ее поведению для случая *ТТ* без витковой коррекции: она остается в классе, независимо от величины снижения вторичной нагрузки.

Рассмотренная прикладная теория работы электромагнитного ТТ позволяет обоснованно отнестись в выбору трансформаторов и анализу их работы в реальных условиях эксплуатации с целью обеспечения точного и достоверного учета электроэнергии.

### 3.2.5 Выбор и эксплуатация трансформаторов тока

Оптимальный выбор электромагнитного ТТ для установки и эксплуатации в конкретном месте электросети определяется рядом основных факторов, важных для такого выбора. Главные эксплуатационные параметры ТТ и решающие факторы их выбора для обеспечения правильного измерения и учета электроэнергии приведены в табл. 3.2.2.

Таблица 3.2.2. Факторы оптимального выбора ТТ

№	Параметры ТТ	Факторы выбора
1	<b>Номинальное и наибольшее рабочее напряжение, <math>U_{1ном}, U_{1наиб}, кВ</math></b>	Выбор производят по номинальному и наибольшему напряжению электросети, в которой необходимо выполнять измерение и учет электроэнергии. Для сети 0,4 кВ используют ТТ на 0,66 или 0,72 кВ.
2	<b>Номинальная частота переменного тока, <math>f, Гц</math></b>	Выбор производят из значений 50 Гц или 60 Гц с учетом частоты электросети
3	<b>Номинальные первичный и вторичный токи, <math>I_{1ном}, I_{2ном}, А</math></b>	Выбор $I_{1ном}$ производят по среднему $I_{1ср}$ и максимальному $I_{1мр}$ рабочим значениям первичного тока в точке измерения таким образом, чтобы $I_{1ср} < I_{1ном} \leq 120\% I_{1мр}$ (ТТ должен работать в целях сохранения максимальной точности учета преимущественно при $I_{1ср} > 20\% I_{1ном}$ для ТТ с литерой S и $I_{1ср} \geq 100\% I_{1ном}$ для ТТ без литеры S). Выбор $I_{2ном}$ производят по номинальному току используемых измерительных приборов или приборов учета из значений 1, 2 или 5 А.
4	<b>Количество и вид вторичных обмоток, класс точности, номинальная вторичная нагрузка, <math>В \cdot А^{**}</math></b>	Количество и вид вторичных обмоток (для измерения и учета, для защиты) определяется системным использованием ТТ. Если ТТ применяют только для измерений и учета, то он содержит одну или более обмоток для измерения и учета, к которым могут подключаться отдельно измерительные приборы и приборы учета. Класс точности вторичных обмоток определяется требованиями продавца электроэнергии. Как правило, для коммерческого учета электроэнергии используют ТТ класса не ниже 0,5S. В точках измерения сети, которые имеют особый статус (например, межгосударственных или межсистемных перетоков) или через которые проходят большие потоки электроэнергии, устанавливают, как правило, ТТ класса 0,2S. На крупных межсистемных перетоках возможна установка ТТ с двумя высокоточными вторичными обмотками для независимого подключения основного и дублирующего счетчиков электроэнергии в целях повышения достоверности и надежности коммерческого учета электроэнергии.
5	<b>Условия эксплуатации</b>	Определяют выбор ТТ по климатическим факторам (диапазонам температуры, давления, влажности) и местам установки (на открытом воздухе, в помещениях с различными условиями). По согласованию потребителя с изготовителем можно изготовить ТТ для специфических условий применения.
6	<b>Электродинамическая и термическая стойкость</b>	Величины токов электродинамической и термической стойкости определяют устойчивость ТТ, используемых в сетях напряжением более 0,66 кВ, к механическим повреждениям при токах КЗ и их устойчивость к возгоранию. Они должны быть рассчитаны по месту установки ТТ и использоваться по этим величинам для его выбора. ТТ с более высокими значениями этих величин обладают большей стойкостью (она обеспечивается, в частности, за счет использования в ТТ корпуса или изоляции из самозатухающих полимеров с высоким классом нагревостойкости).
7	<b>Номинальная</b>	$K_{ном}$ выбирают обычно из значений 2-30 исходя из требований автоматической



	<b>предельная кратность вторичной обмотки для защиты и номинальный коэффициент безопасности приборов обмотки для измерений и учета, <math>K_{ном}</math>, <math>K_{Бном}</math></b>	защиты в электроустановке. $K_{Бном}$ выбирают из значений 2-30 исходя из требований безопасности по кратковременной токовой перегрузке для используемых измерительных приборов или приборов учета. Чем меньше этот коэффициент, тем больше безопасность прибора и меньше вероятность его повреждения при возникновении тока КЗ в первичной цепи ТТ. Но для обеспечения малого $K_{Бном}$ , например, 1,5-2, необходимо вхождение сердечника ТТ в насыщение уже при первичном токе, равном 150-200% $I_{ном}$ . Такой подход требует очень строгого выбора номинального тока ТТ относительно наибольшего первичного рабочего тока. Современные ТТ могут работать в классе даже при 200-300% $I_{ном}$ , что автоматически требует увеличения $K_{Бном}$ .
8	<b>Метрологическая надежность</b>	ТТ должен обеспечить стабильность своих метрологических характеристик в процессе действия влияющих факторов (перепадов температуры, влажности, вибрации, радиации и т.д.) в течение всего своего срока службы. На метрологическую надежность влияет прежде всего качество магнитной системы и изоляции ТТ. Метрологически более надежны магнитопроводы из НКС (или комбинации НКС с ЭТС) и ТТ с литой изоляцией, имеющие минимальный уровень частичных разрядов (менее 10 пКл). При выборе ТТ оценить их метрологическую надежность можно на основе статистики по метрологическим отказам, имеющейся, как правило, у производителя и в энергосистемах (крупных потребителей ТТ).
9	<b>Защита от хищений</b>	ТТ для сетей низкого напряжения (0,4-10 кВ) могут подвергаться манипуляциям со стороны отдельных физических лиц с целью хищения электроэнергии. Для защиты от таких действий ТТ должны иметь четкую, не изменяемую в процессе эксплуатации маркировку своих параметров на корпусе и табличке-шильдике (или саморазрушающуюся наклейку-маркировку с фиксацией следов взлома), защиту от несанкционированного доступа к контактам вторичных обмоток (например, путем использования прозрачной защитной крышки, ограничивающей доступ к вторичным контактам и защищающей табличку и клеймо, раздельным пломбированием вторичных обмоток), неразъемный или пломбируемый контакт клеммы напряжения на шинке или шине ТТ и другие защиты от несанкционированного доступа.
10	<b>Конструктивные особенности</b>	Конструктивные особенности ТТ должны соответствовать конструктивным особенностям электроустановки, в которой ТТ устанавливают (например, по габаритам, по унифицированным установочным и присоединяемым размерам, по унифицированному отверстию для ориентации шины и использования как шин различного сечения, так и кабеля, по контактной поверхности шинки ТТ, обеспечивающей надежность ее соединения с медными или алюминиевыми шинами электроустановки и т.п.). Конструкция ТТ должна обеспечивать удобство его установки, доступа к клеммам и к шильдику ТТ.
11	<b>Сервис</b>	В комплект ТТ должны входить метизы для крепления ТТ на месте его установки и набор документации, позволяющий потребителю получить представление о всех метрологических и технических параметрах ТТ, а также о доступном эксплуатационном сервисе, включая поверку и ремонт ТТ (адреса и телефоны соответствующих организаций).
12	<b>Цена</b>	Цена имеет решающее значение только после оценки параметров по п.1-11 и при их относительном равенстве по аналогичным моделям ТТ от разных изготовителей (поставщиков), участвующих в тендерном отборе. Цена ТТ зависит от уровня напряжения, на который они устанавливаются, и возрастает прямо пропорционально этому уровню.

\* Определение  $I_{Icp}$  и  $I_{I,mp}$  производят по присоединенной в точке измерения электрической мощности электроустановок с учетом расписания и режимов их работы, путем разовых прямых замеров рабочих токов или на основании их непрерывного мониторинга за определенный промежуток времени (сутки, рабочая неделя) [3.32];

\*\*При выборе номинальной вторичной нагрузки обмотки для измерения и учета необходимо оценить как максимальное (при включении в эту обмотку последовательно нескольких токовых цепей измерительных приборов), так и минимальное значение вторичной нагрузки, при которой этот класс еще сохраняется. В первом случае номинальная вторичная нагрузка должна быть не меньше суммы нагрузок всех измерительных приборов,

включаемых во вторичную цепь обмотки. Во втором случае во вторичную цепь включается, как правило, один универсальный прибор учета, для которого достаточно минимальное значение номинальной нагрузки обмотки. В современном учете массово используются электронные счетчики электроэнергии, токовые цепи которых, подключаемые к ТТ, имеют мощность, в десятки-сотни раз меньше, чем  $0,25\% S_{2ном}$  большинства ТТ [3.28]. Если при этом используют ТТ с такой относительной витковой коррекцией, при которой  $\delta_w > \delta_{доп}$ , то при малой вторичной нагрузке ТТ может выйти из класса. Поэтому при выборе ТТ необходимо знать относительную витковую коррекцию ТТ (этот показатель в эксплуатационной документации обычно отсутствует) или требовать от изготовителя ТТ предоставления соответствующих графиков погрешностей ТТ с учетом величины вторичной нагрузки.

При эксплуатации электромагнитных ТТ необходимо обеспечить их максимальную защиту от действия влияющих факторов, способных вызвать метрологический отказ ТТ или повреждение и требующих последующего их ремонта или замены. Такая защита может быть обеспечена путем правильного выбора ТТ при его заказе и покупке (например, за счет формирования адекватного набора требований к параметрам ТТ), использованием дополнительных защитных мер на месте его установки (например, путем размещения в шкафу, щите или щитке), но, главное, - за счет обеспечения *правильного режима функционирования ТТ*, под которым понимается следующее:

а) исключение работы *ТТ* в условиях перегрузки его вторичной цепи (при ошибочном выборе длины и сечения соединительных проводов, избыточного количества и видов измерительных приборов или приборов учета, подключаемых к вторичной обмотке) и тем более при ее разрыве (при отключении измерительных приборов или соединительных проводов без предварительного закорачивания вторичной обмотки);

б) заземление входной клеммы вторичной обмотки *ТТ*;

в) правильный выбор номинального первичного тока *ТТ*, адекватный реальной нагрузке в точке измерения;

г) минимизация условий перегрева (обеспечение естественной вентиляции), вибраций конструкции, на которые устанавливается *ТТ*, и воздействий сильных электромагнитных полей высокой частоты (например, от рядом расположенных антенн локационных или других станций);

д) минимизация условий возникновения токов *КЗ* в первичных цепях *ТТ\**;

е) использование быстродействующих автоматических защит для отключения электроустановок при возникновении *КЗ* в первичных цепях *ТТ*.

\*В [3.18] описан процесс сезонных изменений точности сведения баланса электроэнергии и мощности по показаниям приборов учета по району электрических сетей (РЭС): зимой баланс сводился с точностью до 1%, а летом расходился на несколько процентов. И так несколько сезонов подряд. Исследования выявили, что причиной этого стал летний рост деревьев, который приводил к учащению *КЗ* на линиях 0,4-10 кВ, проходивших в лесных чащобах (летний рост количества *КЗ* на линиях электропередач связан также с грозами и миграцией птиц). Как показано в [3.17,3.31], намагничивание сердечников ТТ из ЭТС постоянным магнитом, постоянным током или токами *КЗ* (они имеют аperiodическую составляющую, которая по действию эквивалентна постоянному току), приводит к существенному, в 2-3 раза, возрастанию токовой погрешности ТТ в диапазоне первичного тока  $1-40\% I_{ном}$ . Сердечник возвращается в нормальное размагниченное состояние только при возрастании первичного переменного тока сверх  $40-50\% I_{ном}$  (для сердечников из НКС восстановление происходит уже при  $1-3\% I_{ном}$ ). Поскольку в РЭС летние нагрузки были ниже зимних, то ТТ оставались в намагниченном состоянии вплоть до зимы, когда нагрузки возрастали, первичные токи увеличивались и перемангничивали ТТ, возвращая их нормальное состояние. После выяснения этого факта и проведения дополнительной вырубki деревьев вдоль линий электропередачи, сезонные колебания небаланса уменьшились.

В работе [3.18] дополнительно приведена статистика метрологических отказов по устаревшим типам ТТ с открытым сердечником и с бумажной изоляцией, установленных в сетях 0,4 кВ-0,66: отказы на объектах энергосистемы достигали 25- 80% у ТТ, срок службы которых составил 8-15 лет, а у потребителей - менее 8%. Предположительно, значительно более высокая частота отказов у ТТ энергосистем связана с более высокой частотой появления токов *КЗ* (в энергосистеме по сети 0,4 кВ частота *КЗ* суммируется по отдельным потребителям).

Соблюдение вышеприведенных требований к выбору и эксплуатации *ТТ* позволяет продлить их срок службы и сократить эксплуатационные издержки.

### 3.3 Оптические трансформаторы и преобразователи тока

#### 3.3.1 Поляризация света и эффект Фарадея

Действие *оптических трансформаторов (ОТТ)* и *преобразователей (ОПТ)* тока основано на явлении поляризации света и эффекте Фарадея. Рассмотрим физические принципы этих явлений.

**Свет** в узком смысле - это видимое излучение, т.е. электромагнитные волны в интервале частот  $f=(7,5-4,0) \cdot 10^{14} \text{ Гц}$  (или  $750-400 \text{ ТГц}$ ) и длин волн  $\lambda=0,4-0,76 \text{ мкм}$ , воспринимаемые глазом. Световые волны различных частот идентифицируются человеком как различные цвета – от длинноволнового красного до коротковолнового фиолетового. Под светом в широком смысле понимают *оптическое излучение*, включающее кроме видимого, ультрафиолетовое ( $\lambda=0,01-0,4 \text{ мкм}$ ) и инфракрасное ( $\lambda=0,74-2000 \text{ мкм}$ ) излучения. Электромагнитное излучение одной определенной и строго постоянной частоты называют *монохроматическим* (одноцветным) [3.6].

**Электромагнитные волны (ЭМВ)** представляют собой распространяющиеся в пространстве колебания электромагнитного поля. В ЭМВ объединены изменения электрического и магнитного полей: всякое изменение напряженности  $E$  электрического поля в какой-нибудь точке пространства вызывает в смежных точках появление переменного магнитного поля, изменение напряженности  $H$  которого в свою очередь порождает меняющееся электрическое поле. Если источником электрического поля в физической среде являются неподвижные электрические заряды, а источником магнитного поля – равномерно движущиеся электрические заряды (постоянный ток), то источник ЭМВ – это неравномерно (ускоренно) движущиеся электрические заряды, в частности, их колебания и любой переменный ток [3.33]. Интенсивность ЭМВ мала на частоте  $f=50-60 \text{ Гц}$  промышленного переменного тока, но достигает больших значений на радио и световых частотах\*.

\*Интенсивностью волны называют величину, равную энергии, переносимой в среднем волной через единицу площади в единицу времени, т.е. мощность волны, приходящаяся на единицу площади  $[Вт/м^2]$ . Интенсивность волны прямо пропорциональна квадрату произведения частоты колебаний на его амплитуду [3.34]. Интенсивность ЭМВ определяется амплитудными значениями  $E_m$  и  $H_m$  (в первую очередь значением  $E_m$ , которое по своему действию на электрические заряды всегда и во много раз превышает аналогичное действие  $H_m$ ) и частотой колебаний: с возрастанием частоты в 10 раз интенсивность ЭМВ увеличивается в 100 раз.

Общим свойством любой ЭМВ является **поперечность** ее колебаний\*\*.

**Поперечность электромагнитных (световых) волн: в изотропных средах векторы напряженности электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей волны перпендикулярны друг к другу и к направлению распространения волны - ее лучу (или вектору скорости распространения волны  $v$ ).**

\*\* Волной называют распространяющиеся в пространстве колебания вещества или поля. Колебания вещества порождают упругую волну, а колебания электромагнитного поля – электромагнитную волну. Если колебания частиц среды происходят вдоль направления распространения волны (путем попеременного сжатия-расширения среды), то ее называют **продольной**, а если перпендикулярно направлению распространения волны, то – **поперечной**. В жидких и газообразных телах возможны только продольные, а в твердых телах как продольные, так и поперечные волны. Волновой поверхностью, или фронтом волны называют геометрическое место точек, колеблющихся в одной и той же фазе (например, в фазе положительной амплитуды «горба» поперечной волны). Если фронт является плоскостью, перпендикулярной направлению распространения волны, то такие волны называют **плоскими** (плоские волны противопоставляют сферическим волнам). Лучом называют линию, касательная в каждой точке которой, совпадает с направлением распространения волны. ЭМВ – это плоские волны,

у которых луч – прямая, перпендикулярная фронту волны. Поперечность ЭМВ не зависит ни от характера излучателя, ни от среды и направления распространения волны в ней, хотя среда и оказывает влияние на направление луча волны (через явления тяготения, преломления, отражения и др.) и на взаимную перпендикулярность векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  (в некоторых анизотропных средах, например, в ферромагнетиках).

На рис.3.3.1 приведен график ЭМВ, созданной электрическим вертикально направленным вибратором (штыревой антенной).

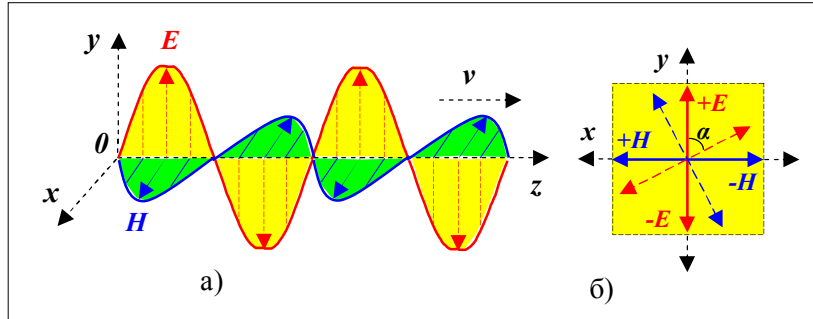


Рис.3.3.1 График колебаний векторов напряженности электрического  $\mathbf{E}$  и магнитного  $\mathbf{H}$  полей в линейно поляризованной ЭМВ ( $\mathbf{v}$  – вектор скорости волны): а) вид сбоку волны, б) вид спереди - с фронта волны

Колебания векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  изображены происходящими строго в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, пересекающих луч волны - вертикальной для  $\mathbf{E}$  и горизонтальной для  $\mathbf{H}$ . Это обусловлено вертикальным расположением источника излучения - *единичного электрического вибратора*, в котором колебания вектора  $\mathbf{E}$  происходят вдоль оси  $y$  (на рисунке вибратор не показан). При повороте вибратора в вертикальной плоскости  $xOy$  по часовой стрелке на угол  $\alpha$  поворачиваются соответствующим образом и плоскости колебаний векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  (рис.3.3.1,б, штриховые векторы). Волну, в которой направления колебаний векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  происходят в строго фиксированных плоскостях, называют **линейно** или **плоско поляризованной** волной. В случае аналогичной световой волны говорят о **линейно поляризованном свете**. Плоскость, в которой колеблется вектор  $\mathbf{E}$ , называют **плоскостью поляризации**\* [3.6]. Поляризация характеризует *поперечную анизотропию* ЭМВ, т.е. неэквивалентность различных направлений в плоскости, перпендикулярной лучу волны. Это свойство лишает волну *осевой симметрии* относительно ее луча из-за наличия *выделенных направлений колебаний векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$* .

\*Ранее по историческим причинам *плоскостью поляризации* называли плоскость колебания вектора  $\mathbf{H}$  [3.34]. Поскольку почти всегда векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  перпендикулярны друг другу, то для полного описания состояния поляризации, вообще говоря, достаточно знания поведения лишь одного вектора  $\mathbf{E}$ .

Обычный источник света, например, Солнце или любое раскаленное тело, можно рассматривать как *систему огромного множества элементарных электрических вибраторов*, имеющих произвольную и постоянно меняющуюся во времени пространственную ориентацию\*. В световой волне такого источника отсутствуют выделенные фиксированные направления колебаний вектора  $\mathbf{E}$ : все колебания хаотичны, происходят по всем направлениям, перпендикулярных лучу, и равномерно распределены по фронту волны относительно ее луча. Такой свет называют **естественным светом** и говорят, что он **неполяризован**.

\*В качестве естественных вибраторов выступают атомы вещества в возбужденном состоянии, которые при постоянных изменениях своих энергетических уровней излучают *волновые цуги* – синусоидальные обрывки волны, длительностью порядка  $10^{-8}$ с (в каждом цуге содержится более миллиона периодов колебаний световой волны). У каждого волнового цуга *своя плоскость поляризации*, т.е. в каждом элементарном акте излучения свет полностью поляризован и вектор  $\mathbf{E}$  имеет фиксированное положение. Но *макроскопический источник света* состоит из огромного количества частиц-излучателей, пространственная ориентация плоскостей поляризации которых и моменты испускания света распределены хаотично, и, кроме того, их поляризация меняется из-за взаимодействия



самих излучателей друг с другом. В *общем излучении* направление вектора  $\mathbf{E}$  в каждый момент времени не определено, постоянно и беспорядочно меняется за очень малые промежутки времени.

*Полную поляризацию монохроматического света* характеризуют проекцией траектории конца вектора  $\mathbf{E}$  в некоторой точечной области луча на плоскость, перпендикулярную лучу - фронтальную плоскость (начало вектора  $\mathbf{E}$  всегда находится на луче, т.е. на оси  $z$ ). На этой плоскости проекция конца вектора  $\mathbf{E}$  в любой момент времени может быть представлена некоторой *точкой* с координатами  $E_x$  и  $E_y$ , определяющими вершины двух ортогональных векторов  $\mathbf{E}_x$  и  $\mathbf{E}_y$ , на которые может быть разложен любой вектор  $\mathbf{E}$ :  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y$ . (рис.3.3.2,а). *Гармоническое колебание* вектора  $\mathbf{E}$  имеет вид  $\mathbf{E} = E_m \sin(\omega t + \varphi)$ , где круговая частота  $\omega$ , амплитуда  $E_m$  и начальная фаза  $\varphi$  являются *константами*. Как известно, при сложении двух гармонических колебаний с одинаковой частотой, но разными амплитудами и фазами, образуется гармоническое колебание той же частоты. Поэтому ортогональные векторы такого колебания представляются в виде  $\mathbf{E}_x = E_{mx} \sin(\omega t + \varphi_x)$  и  $\mathbf{E}_y = E_{my} \sin(\omega t + \varphi_y)$ . В *реальных* световых колебательных процессах, в отличие от *гармонических*, частота, амплитуда и фаза колебаний могут постоянно и хаотически меняться. Так как *монохроматический* свет имеет постоянную частоту  $\omega$ , то указанные изменения относятся к амплитуде и фазе колебаний (на фронтальной плоскости они отображаются как изменения *модуля*  $E$  вектора  $\mathbf{E}$  и его *фазы*  $\varphi$  или как соответствующие изменения его ортогональных векторов  $\mathbf{E}_x$  и  $\mathbf{E}_y$ ).

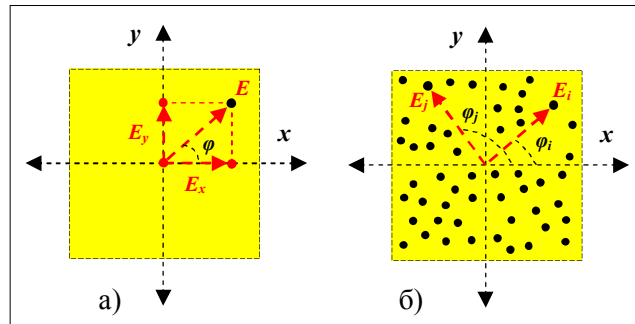


Рис.3.3.2 Проекция конца вектора  $\mathbf{E}$  в точечной области светового луча на его фронтальную плоскость: а) единичная проекция вектора  $\mathbf{E}$  в некоторый фиксированный момент времени и ее разложение на ортогональные векторы  $\mathbf{E}_x$ ,  $\mathbf{E}_y$ , б) проекции двух векторов  $\mathbf{E}_i$  и  $\mathbf{E}_j$  с фазами  $\varphi_i$  и  $\varphi_j$  в неполяризованном световом луче

Фронтальную плоскость *неполяризованной световой волны* можно представить в виде равновероятно распределенного множества точек, каждая из которых совпадает с проекцией конца вектора  $\mathbf{E}_i$  или  $\mathbf{E}_j$  ( $i \neq j$ ;  $i, j = 0, 1, 2, \dots$ ) (рис.3.3.2,б). Векторы  $\mathbf{E}_i$  или  $\mathbf{E}_j$  определяют одно из возможных положений *вектора общего излучения*  $\mathbf{E}$ , проекция конца которого в каждый фиксированный момент времени случайно совпадает с одной из точек  $i$  или  $j$ , имеющих соответственно фазы  $\varphi_i$  или  $\varphi_j$ . За ненулевой интервал времени проекция вектора на фронтальной плоскости совершает хаотическое перемещение от одних ее точек к другим по непредсказуемой траектории. Если направления колебаний вектора  $\mathbf{E}$  упорядочены каким-либо образом, то свет называют **поляризованным**. Различают *частично* (колебания одних направлений преобладают над колебаниями других направлений) и *полностью поляризованный* свет (колебания происходят по строго определенным траекториям). Обычно *частично поляризованный* свет состоит из *естественной* и *поляризованной составляющих*.

В *полностью поляризованном монохроматическом свете* траектория перемещения конца вектора  $\mathbf{E}$  предсказуема и в общем случае описывает *поверхность эллиптического цилиндра*, проекция которого на фронтальную плоскость представляет собой *эллипс поляризации* (рис.3.3.3,а,б). Условием *эллиптической поляризации* является строгое постоянство во времени разности фаз  $\Delta\varphi = (\varphi_i - \varphi_j)$  между любыми двумя векторами  $\mathbf{E}_i$  или  $\mathbf{E}_j$  или

их соответствующими ортогональными проекциями (в *неполяризованном* свете эта разность фаз непрерывно и хаотически меняется)\* [3.6]. Такая поляризация дополнительно характеризуется *право-* или *левосторонним* направлением вращения вектора  $\mathbf{E}$  в световой волне (на рис.3.3.3 показано правое вращение - *правый винт*).

\*Две или более ЭМВ со строго одинаковой частотой и постоянной разностью фаз называют *когерентными* (связанными, соединенными). Суперпозиция волн приводит к их *интерференции* - пространственному перераспределению энергии в результирующем колебании в зависимости от разности фаз образующих его исходных колебаний: усилению интенсивности колебаний в одних точках и их ослаблению в других точках пространства. Для когерентных волн интерференция проявляется в виде устойчивой во времени *интерференционной картины* - чередованием областей максимумов и минимумов энергии. Например, при интерференции света образуются чередующиеся области высокой (максимумы) и низкой (минимумы) освещенности.

Предельными случаями эллиптической поляризации являются *линейная* и *циркулярная* (круговая) поляризация. В линейно поляризованном свете разность фаз  $\Delta\varphi=0$  (или кратна  $\pi$ , т.е. равна  $n\pi$ , где  $n=1,2,3,\dots$  - целое число), эллиптический цилиндр вырождается в плоскость, а эллипс - в отрезок *прямой линии*, по которой перемещается проекция вектора  $\mathbf{E}$  (рис.3.3.3,в). Для определения состояния линейно или плоско поляризованного света достаточно указать положение его *плоскости поляризации* (например, указать угол  $\alpha$  отклонения плоскости от вертикали). При круговой поляризации  $\Delta\varphi=(2n-1)\pi/2$ , эллиптический цилиндр *становится круговым*, а эллипс превращается в *окружность* (рис.3.3.3,г). Подобно тому, как вектор  $\mathbf{E}$  представим на плоскости суммой двух ортогональных векторов  $\mathbf{E}_x$  и  $\mathbf{E}_y$ , его же можно представить в линейно поляризованном свете *суперпозицией двух форм круговой поляризации*  $\mathbf{E}_+$  и  $\mathbf{E}_-$  с противоположным направлением вращения:  $\mathbf{E}=\mathbf{E}_++\mathbf{E}_-$  (если, например, разность фаз  $\Delta\varphi=\varphi_+-\varphi_-=0$ , то  $\alpha=0$ , а при  $\varphi_+>\varphi_-$  будет  $\alpha>0$ , т.е. плоскость поляризации займет положение, показанное на рис.3.3.3,в).

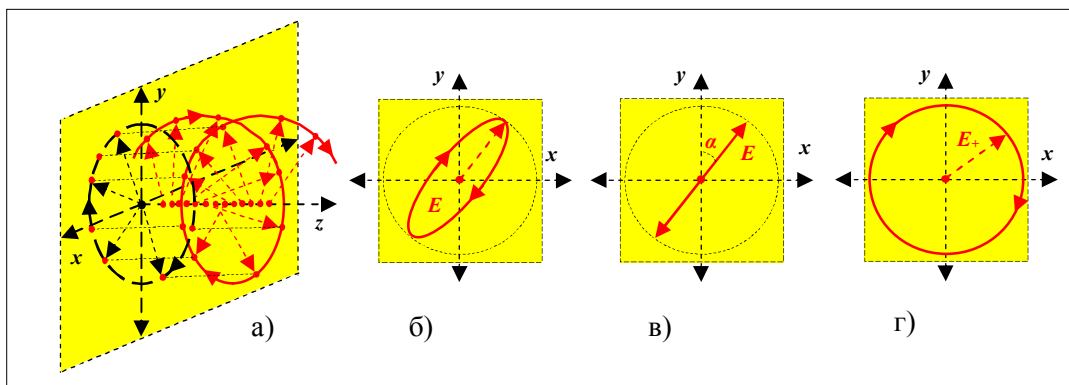


Рис.3.3.3 Проекция конца вектора  $\mathbf{E}$  полностью поляризованного светового луча на его фронтальную плоскость: а) моментальные изображения колебаний вектора  $\mathbf{E}$  в ЭМВ с эллиптической поляризацией и их проекции, б) проекция эллиптической поляризации, в) проекция линейной поляризации, г) проекция круговой поляризации

Поляризация света может производиться различными способами.\* Среда, обладающие свойством поляризации света, называют *поляризаторами* (их разновидностью являются *поляроиды* – тонкие пленки с поляризатором), а приборы, с помощью которых обнаруживается положение плоскости поляризации, - *анализаторами* (анализатором может служить и сам поляризатор) [3.34].

\*Свет поляризуется в процессах: а) прохождения через *анизотропную среду* с естественной или индуцированной *оптической анизотропией*, б) *отражения* и *преломления* на границе раздела двух сред в результате различия оптических характеристик границы для компонент, поляризованных параллельно и

перпендикулярно плоскости падения, в) в средах с различными коэффициентами поглощения для различных поляризаций (дихроизм), г) при **двойном лучепреломлении (ДЛП)**, д) в лазерных источниках света.

**Оптической анизотропией (ОА)** называют различие оптических свойств среды в зависимости от направления распространения в ней оптического излучения и его поляризации (проявляется в виде ДЛП, дихроизма, изменения поляризации). Для любого агрегатного состояния вещества ОА обусловлена асимметрией строения молекул, а в кристаллах – анизотропией поля электрических сил, связывающих ионные решетки с электронами (ОА присуща всем кристаллам, за исключением кубических). Для анализа ОА в кристаллах выделяют **оптическую ось (ОО)** – направление, в котором свет распространяется, не испытывая ДЛП. Структура кристалла вдоль ОО симметрична и поэтому при прохождении вдоль нее луча света он сохраняет все свои свойства. Но если луч направлен под углом к ОО, то он подвергается ДЛП, т.е. расщепляется на две компоненты: **обыкновенный (ОЛ)** и **необыкновенный (НЛ)** лучи. Эти два луча *ортогонально плоско поляризованы*, т.е. колебания вектора  $\mathbf{E}$  в них происходят во взаимно ортогональных плоскостях, имеют различные показатели преломления  $n_o$  и  $n_n$  (для НЛ  $n_n$  зависит, а для ОЛ  $n_o$  не зависит от угла падения;  $n_o = n_n$  при падении луча вдоль ОО) и поглощения. Из-за различных показателей преломления оба луча расходятся в среде (чем больше разность  $n_o - n_n$ , тем больше ДЛП), а из-за различных показателей поглощения один из них может полностью поглощаться средой, а другой проходить через нее с минимальным поглощением (*линейный дихроизм*). При *круговой поляризации* использую понятие **кругового дихроизма** – различное поглощение для света правой и левой поляризаций.

В качестве поляризаторов широко используют кристаллы с большим ДЛП, например, кристаллы *турмалина* (поляризует проходящий свет в одной плоскости, поглощая полностью второй луч) или *исландского шпата* (пропускает оба ортогонально поляризованных луча). Если на пути естественного света поставить две турмалиновые пластинки так, чтобы их оптические оси были перпендикулярны друг другу («скрещенные» поляризаторы), то свет через эту систему не пройдет: поляризованный свет от первой пластинки поглотится второй. При соосном же размещении этих пластинок поляризованный свет беспрепятственно пройдет и через вторую пластинку.

Линейно поляризованный свет можно подвергать в физических средах *операциям поворота его плоскости поляризации* в целях решения тех или иных технических задач. Такой поворот могут вызывать как *оптически активные вещества* (различные кристаллы, их расплавы и растворы), так и внешние *физические поля*, воздействующие на среду прохождения света. Возможность воздействия на поляризованный свет в среде при помощи постоянного магнитного поля лежит в основе магнитооптического **эффекта Фарадея**.

**Эффект (явление) Фарадея** - это вращение плоскости поляризации линейно поляризованного света, распространяющегося в среде вдоль постоянного магнитного поля, в котором находится эта среда.

Основная особенность магнитооптического эффекта Фарадея заключается в его *невозвратности*, т.е. нарушении *принципа обратимости* светового луча: его движение «назад» дает такой же угол поворота и в ту же сторону, что и движение «вперед». Изменение же направления магнитного поля, напротив, изменяет направление вращения плоскости поляризации на противоположное.

Феноменологическое объяснение этого явления дает возникающая в среде под действием магнитного поля *циркулярная анизотропия*, связанная с неэквивалентностью двух направлений вращения в плоскости, перпендикулярной полю. Как следствие, при распространении в среде вдоль магнитного поля пучка линейно поляризованного монохроматического света *фазовые скорости* (скорости пространственного перемещения фазы волны) его право- и левовращающей поляризованных составляющих различны, за один и тот же интервал времени они проходят в среде различные пути, что и приводит к вращению плоскости поляризации результирующего пучка света. В эффекте Фарадея магнитное поле влияет на поляризацию света лишь косвенно, изменяя оптические характеристики среды прохождения света (в вакууме магнитное поле не оказывает на свет влияния).

Вращение плоскости поляризации монохроматического линейно поляризованного света, распространяющегося в изотропной немагнитной среде вдоль магнитного поля подчиняется **закону Верде** [3.6]:

$$\Theta = V \cdot l \cdot H, \quad (3.3.1)$$

где  $\Theta$  – угол поворота (угол Фарадея [радиан в СИ; угловая минута в СГСМ]),  $H$  [А/м в СИ; Э в СГСМ] – магнитная напряженность поля,  $l$  [м в СИ; см в СГСМ] – длина пути светового луча в среде вдоль силовой линии магнитного поля,  $V$  – постоянная Верде (удельное магнитное вращение) [рад/А в СИ; мин/Э·см в СГСМ], зависящая от длины волны света (частоты), плотности среды и от ее температуры (слабо). Для большинства сред  $V > 0$  (правостороннее вращение) и составляет сотые доли угловой минуты ('):  $V = (0,01 - 0,02) \text{ мин/Э·см}$ . Знак угла поворота плоскости поляризации связан с направлением магнитного поля и не зависит от направления распространения луча (по полю или против поля). При многократном прохождении света через среду, помещенную в постоянное магнитное поле, угол поворота плоскости поляризации возрастает в соответствующее число раз. Это свойство используется в конструкции *ОТТ* или *ОПТ* для повышения их чувствительности.

### 3.3.2 Оптическое волокно и передача светового сигнала

Возможность применения эффекта Фарадея для бесконтактного измерения в токопроводе величины постоянного тока очевидным образом вытекает из закона Верде. Постоянный ток порождает вокруг токопровода постоянное магнитное поле, поместив в которое чувствительный элемент с линейно поляризованным светом, можно определить по углу поворота последнего величину напряженности магнитного поля, а по ней и величину самого тока в токопроводе за те или иные фиксированные промежутки времени.

Сложнее обстоит дело для переменного тока. Его магнитное поле является переменным не только по величине, но и по направлению, изменяясь на противоположное каждый полупериод, т.е. каждые 10 мс для промышленного тока с частотой  $f_m = 50 \text{ Гц}$ . В магнитном поле такого тока вращение плоскости поляризации света в чувствительном элементе также изменяется на противоположное каждый полупериод. Поэтому для полного периода синусоидального тока (и кратных ему периодов) угол Фарадея равен нулю. Следовательно, все измерения угла Фарадея необходимо проводить отдельно для положительных и отрицательных полупериодов тока, синхронизируя с ними начало и конец соответствующих измерений.

Главным чувствительным элементом любого *ОТТ* или *ОПТ*, существенно влияющим на его основные технические и метрологические параметры, является **оптическое волокно (ОВ)** – *волокно для передачи световой энергии и оптических сигналов*. Рассмотрим конструкцию, основные свойства и характеристики *ОВ*, предварительно напомним содержание некоторых понятий геометрической оптики, используемых ниже\*.

\**Оптическое излучение*, или свет, при его прохождении через границу раздела двух сред подвергается процессам отражения, преломления и поглощения света. **Отражение света** – это появление световой волны, распространяющейся от границы раздела двух сред обратно в передающую среду (при этом, по крайней мере, первая среда должна быть прозрачна для падающего и отражаемого светового луча). Пространственное распределение интенсивности отраженного света определяется отношением размеров неровностей  $\Delta l$  поверхности границы раздела к длине волны  $\lambda$  падающего луча: при шероховатой (матовой) поверхности, в которой размеры неровностей соизмеримы с  $\lambda$  или превышают ее  $\Delta l \geq \lambda$ , происходит диффузное (рассеянное) отражение, а при гладкой поверхности, когда  $\Delta l \ll \lambda$ , – правильное, или зеркальное отражение. При полной или неполной прозрачности отражающей среды помимо отражения света наблюдается явление его преломления в отражающей среде, а при ее неполной прозрачности или непрозрачности – явление его поглощения. **Преломление света** – это изменение направления распространения светового луча при его прохождении через границу раздела двух сред, а **поглощение света** – это уменьшение его интенсивности при прохождении через среду, заполненную веществом (в полностью прозрачной среде поглощение света отсутствует).

При зеркальном отражении имеется определенная связь между положениями падающего и отраженного луча: отраженный луч лежит в плоскости, проходящей через падающий луч и нормаль к отражающей поверхности, и **угол отражения**  $\psi_2$  равен углу падения  $\psi_1$ , т.е.  $\psi_1 = \psi_2$  (рис.3.3.4.а). Интенсивность отраженного света характеризуется коэффициентом отражения (для диэлектрика как отражающей среды он выражается формулой Френеля) и зависит от  $\psi_1$ , поляризации падающего луча, а также от соотношения показателей преломления  $n_2$  и  $n_1$



второй и первой сред. Поляризация отраженного луча меняется с изменением  $\psi_1$  и различна для компонент падающего луча, поляризованных параллельно или перпендикулярно плоскости падения: при угле  $\psi_1$ , равном так называемому *углу Брюстера*, отраженный луч *естественного* света становится *полностью поляризованным* перпендикулярно плоскости падения (эту особенность зеркального отражения используют в ряде *поляризаторов*).

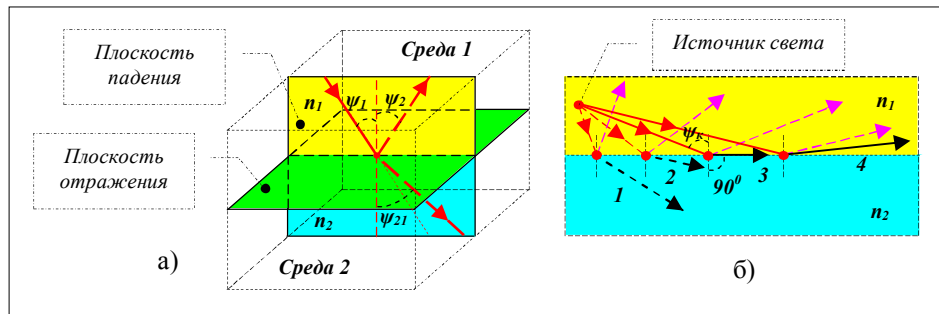


Рис.3.3.4 Пути отражения и преломления света: а) зеркальное отражение и преломление света на границе раздела двух оптических сред 1 и 2 с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  ( $n_2 < n_1$ ,  $\psi_{21} > \psi_1$ ), б) переход к полному внутреннему отражению ( $\psi_k$  – критический угол падения)

Процесс *преломления* света на границе раздела двух однородных изотропных прозрачных (непоглощающих) сред 1 и 2 характеризуется количественно *абсолютными*  $n_1$ ,  $n_2$  и *относительным*  $n_{21}$  показателями преломления (рис.3.3.4,а). Преломление света подчиняется двум закономерностям: преломленный луч лежит в плоскости луча падения, и синусы углов падения  $\psi_1$  и преломления  $\psi_{21}$  связаны соотношением – **законом Снелля** -  $n_1 \cdot \sin \psi_1 = n_2 \cdot \sin \psi_{21}$ . **Относительный показатель преломления**  $n_{21}$  - это безразмерное отношение *скоростей* распространения света в первой ( $v_1$ ) и второй ( $v_2$ ) средах:  $n_{21} = v_1/v_2$ . Если первой средой служит вакуум (в вакууме  $v_1 = c \approx 3 \cdot 10^{10}$  см/с  $= 3 \cdot 10^8$  м/с), то показатель преломления среды относительно него называют **абсолютным**:  $n_1 = c/v_1$  ( $n_2 = c/v_2$ ). Очевидно, что в веществе абсолютный показатель преломления всегда превышает единицу  $n_i > 1$  (для воздуха его можно принять с большой точностью равным 1), и чем он больше, тем меньше в среде скорость распространения световой волны (среду с большим  $n_i$  называют *оптически более плотной*). *Относительный показатель преломления есть отношение абсолютных показателей*:  $n_{21} = v_1/v_2 = n_2/n_1 = \sin \psi_1 / \sin \psi_{21}$ . Он может быть равен единице при  $n_2 = n_1$  ( $v_1 = v_2, \psi_1 = \psi_{21}$ ), больше единицы при  $n_2 > n_1$  ( $v_1 > v_2, \psi_1 > \psi_{21}$ ) или меньше единицы при  $n_2 < n_1$  ( $v_1 < v_2, \psi_1 < \psi_{21}$ ). В общем случае  $n_i$  среды зависит от длины волны  $\lambda$  света (при преломлении нехроматического света составляющие его лучи с различной  $\lambda$  идут по разным направлениям – явление *дисперсии света*).

Таким образом, если абсолютный показатель преломления второй среды меньше чем у первой, то угол преломления второй среды больше угла преломления первой среды, т.е. преломленный луч во второй среде будет распространяться ближе к поверхности преломления-отражения. При максимальном значении угла преломления, равным  $90^\circ$ , преломленный луч распространяется параллельно поверхности преломления (луч 3 на рис.3.3.4,б). Угол падения  $\psi_1$ , при котором угол преломления  $\psi_{21} = 90^\circ$ , называют *критическим* или *предельным* углом падения  $\psi_k$ . При  $\psi_1 > \psi_k$  преломление во вторую среду прекращается и в первой, оптически более плотной среде наступает процесс **полного внутреннего отражения (ПВО)**: энергия ЭМВ полностью локализуется в первой среде (волна только частично, на ее длину, проникает во вторую среду, но затем возвращается обратно в первую среду). При ПВО коэффициент отражения максимален и практически равен единице.

ОВ является *световодом (волноводом)*, т.е. передает ЭМВ оптического диапазона с одной, входной его поверхности (*торца световода*) на его другую, выходную торцевую поверхность. Конструкция ОВ представляет собой цилиндрическое *стеклянное волокно* в *защитной оболочке\**, световедущая жила которого – *сердцевина*, выполнена из сверхчистого кварцевого стекла\*\* и окружена *оболочкой* из другого стекла или полимера с *меньшим показателем преломления* (рис.3.3.5). Вследствие этого на *поверхности раздела сердцевины и оболочки* лучи света, падающие под соответствующими углами, подвергаются *полному внутреннему отражению*. Благодаря этому свойству ОВ обеспечивает возможность передачи световой волны на большое расстояние без промежуточного усиления и с минимальными потерями энергии.

\* изготавливается из пластмассы или эпоксидных композиций с большим показателем преломления света и обеспечивает механическую защиту световода, а также его устойчивость к воздействию окружающей среды и внешних источников оптического излучения.

\*\* максимальная очистка стекла достигается методом химического осаждения кварца  $SiO_2$  из газовой фазы.

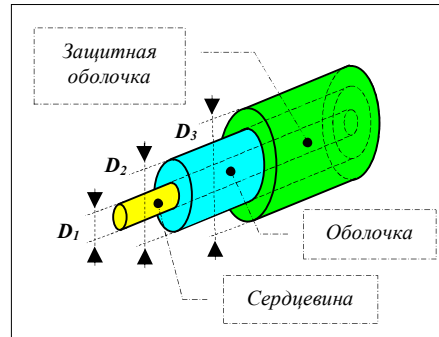


Рис.3.3.5 Конструкция оптического волокна

Существуют два основных типа *ОВ*: **многомодовые** и **одномодовые** [3.31]. В многомодовом *ОВ* оптический сигнал представляется *множеством мод*, каждая из которых имеет свою отдельную линейно-ломаную траекторию, а в одномодовом – *одной модой* с траекторией вдоль оси волокна (*аксиальный луч*)\*. По конструкции эти волокна различаются системой диаметров сердцевин и оболочек: для *многомодовых* волокон  $D_1=50-100$ ,  $D_2=125-140$ ,  $D_3=250$  мкм, а для *одномодовых*  $D_1=5-10$ ,  $D_2=125$ ,  $D_3=250$  мкм, т.е. в одномодовом *ОВ* диаметр сердцевин на порядок меньше, превосходя всего лишь в несколько раз длину волны передаваемого по световоду монохроматического света в его *ближней инфракрасной (ИК)* области с  $\lambda \approx 0,8-1,7$  мкм.

В зависимости от изменения показателя преломления сердцевин по координате вдоль диаметра - *профилю показателя преломления*, различают *ОВ* со *ступенчатым* и *градиентным профилем*. В первом случае сердцевина имеет, как для многомодовых, так и одномодовых *ОВ*, *постоянный показатель преломления*  $n_1$  вдоль всего диаметра  $D_1$  (и длины волокна), который скачкообразно меняется до значения  $n_2$  на границе раздела сердцевин и оболочек (рис.3.3.6). Типичные значения  $n_1, n_2 = \{1,45, \dots, 1,55\}$ . Во втором случае сердцевина многомодового волокна имеет *переменный профиль показателя преломления* (например, параболический профиль), в котором  $n_1$  плавно и симметрично уменьшается от центра к оболочке до величины  $n_2$ . В *ОТТ* и *ОПТ* применяется исключительно *одномодовое ОВ*.

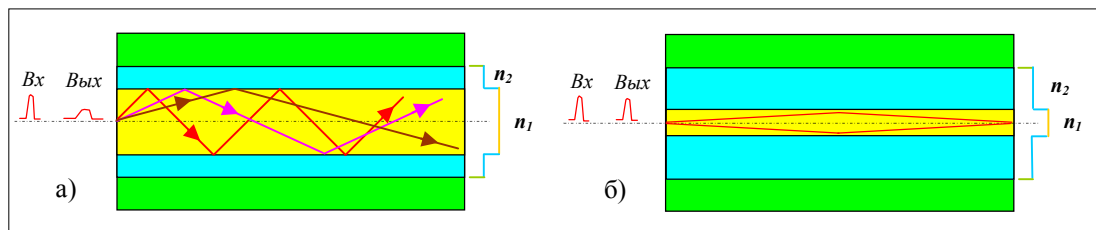


Рис.3.3.6 Распространение световых мод: а) в многомодовом *ОВ*, б) в одномодовом *ОВ* (показаны световые сигналы на входе и выходе *ОВ*, а также ступенчатые профили показателей преломления,  $n_2 < n_1$ )

\*Понятие *световой моды* (буквально – мера, способ, правило) относится к *квазиоптике* - оптике широких волновых пучков, т.е. таких пучков, диаметр которых значительно превышает длину волны  $D \gg \lambda$ . **Моды** представляют собой результат *интерференции*, т.е. временного и пространственного наложения световых волн, различающихся в общем случае частотами, амплитудами и (или) фазами. В результате, в одних точках вдоль оси

световода происходит *интерференционное сложение* амплитуд колебаний (*конструктивная интерференция*), а в других, наоборот, их *интерференционное гашение* (*деструктивная интерференция*), вследствие чего интенсивность световых лучей изменяется пространственно. Моды - это выделенные совокупности лучей и формируемые ими интерференционные структуры с постоянством распределения интенсивности света в поперечном сечении световода вдоль его оси. Для монохроматического света в *многомодовом ОВ* моды разделяются *по углам сдвига фаз* между ними: *нижние моды* имеют более высокие углы падения и меньшее число внутренних отражений. Фазы сдвига зависят от углов отражения лучей и длины их путей в световоде: при меньшем (более остром) угле падения происходит большее число отражений, путь луча удлиняется, время его прохождения увеличивается и поэтому увеличивается сдвиг фаз между разными модами, что приводит к *межмодовой дисперсии* (проявляется как *расширение* и *уменьшение* амплитуды выходного сигнала), отсутствующей в *одномодовом ОВ* (рис.3.3.6). В одномодовом *ОВ* все моды распространяются под скользящими углами к оси световода, сливаясь в одну *фундаментальную*, или *основную* моду (моду самого низкого уровня).

Чтобы световой луч распространялся вдоль световода в режиме *ВПО*, он должен входить в торец волокна под углом падения  $\varphi_0$  (относительно плоскости торца), не превышающим *критический угол ввода*  $\psi_{0к}$ :  $\psi_0 \leq \psi_{0к} = 90^\circ - \psi_{1к}$ , где  $\psi_{1к}$  - *критический угол падения* луча на границе раздела сердцевинки и оболочки. Таким образом, входной луч должен попадать в воображаемый *конус* с удвоенным критическим углом ввода  $2\psi_{0к}$  при его вершине (рис.3.3.7). Угол ввода волокна  $\psi_{0к}$  называют *угловой апертурой*, а его синус - *числовой апертурой* оптоволоконка:  $NA = \sin \psi_{0к} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$  [3.35]. Числовая апертура зависит только от показателей преломления  $n_1$ ,  $n_2$  (всегда должно выполняться условие  $n_1 > n_2$ ). Апертура характеризует *светособирающую* способность *ОВ*: чем она больше, тем с большей площади источника излучения можно собрать волновую энергию, но тем больше и ее рассеяние в волокне. Волокно с меньшей апертурой требует лучше сфокусированного источника оптического излучения (в качестве такового используют *лазеры* и *лазерные светодиоды*).

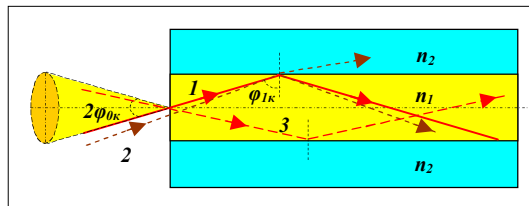


Рис.3.3.7 Схема ввода светового луча в торец *ОВ* для реализации процесса *ВПО* ( $\varphi_{0к}$  – критический угол ввода,  $\varphi_{1к}$  – критический угол падения, 1 – критический луч ввода, 2- закритический луч с преломлением в оболочке, 3 – нормальный луч без преломления в оболочке)

В одномодовом *ОВ* показатели преломления  $n_1$  и  $n_2$  различаются всего на 0,5-1% (например,  $n_1=1,465$ ,  $n_2=1,460$ ), их числовая апертура равна  $NA \approx 0,122$ , а угловая не превышает  $7^\circ$ . Чем меньше апертура, тем сложнее ввести световой луч в волокно. Числовая апертура характеризует все компоненты *оптического канала* – *оптоволоконка*, *источника* и *приемника излучения*. Все апертуры соединяемых компонентов должны быть согласованы друг с другом, в частности, источник излучения должен иметь апертуру, не превышающую апертуру *ОВ*.

Конструкция *ОВ* влияет на выбор длины волны передаваемого светового сигнала, определяя его *затухание* и *дисперсию*. В общем случае *затухание* – это *ослабление светового потока в оптоволоконке*, приводящее к тому, что амплитуда принятого сигнала на выходе волокна меньше амплитуды переданного сигнала. Природа затухания может быть различной\*. **Коэффициент затухания  $A$**  для заданной длины волны определяют как *отношение вводимой в волокно оптической мощности к мощности принятого из волокна оптического сигнала*. Он измеряется в **децибелах\*\***.

\*Потери световой мощности подразделяют на *потери ввода*, *поглощения*, *рассеивания*, *изгиба*, *соединения* и *вывода*. **Потери ввода** связаны с несогласованностью апертур источника света и волокна. **Потери поглощения**

разделяют на *внутренние*, связанные с молекулярным резонансом в материале и с превращением света в тепловую энергию, и *внешние*, определяемые наличием в материале микропримесей (в первую очередь непрозрачных для света гидроксильных групп *ОН*). **Потери рассеяния** вызываются *дефектами сердцевинки* и наличием в ней посторонних *примесей*, которые влияют на прохождение светового луча по правильной траектории (приводят к его отклонению, уменьшению угла преломления с выходом части луча в оболочку и частичному отражению луча в обратную сторону). **Потери изгиба** связаны с изгибами волокна, влияющими на изменение угла преломления луча и вызывающие его рассеивание в оболочку, т.е. нарушающие процесс *ВПО* (различают *микроизгибы* – микроскопические изменения геометрии сердечника, созданные в процессе производства волокна, и *макроизгибы* – большие изгибы, превышающие минимально допустимый радиус внешнего изгиба волокна  $R_u$ ). **Потери соединения** вызываются дефектами, связанными с соединениями источника и приемника света с *ОВ*, а также соединениями отдельных участков *ОВ* друг с другом. **Потери вывода** аналогичны потерям ввода.

**\*\* Децибел (дБ, dB) – логарифмическая единица измерения отношения двух значений какой-либо физической величины или затухания (усиления) этой величины. Затухание  $A$  (усиление  $S$ ) устройства или канала связи – это десятичный логарифм отношений значений мощности  $P_1$  на входе ( $P_2$  на выходе) к значению мощности  $P_2$  на выходе ( $P_1$  на входе):  $10\lg P_1/P_2$  ( $10\lg P_2/P_1$ ) [3.36]. Примеры конкретных отношений величин и их децибелы приведены ниже в таблице.**

Таблица перевода отношений в децибелы

Процессы	Отношения мощностей и их децибелы						
Затухание	1:1000	1:100	1:10	1:2	1:1,048	1:1,025	1:1
	-30 дБ	-20 дБ	-10 дБ	-3 дБ	-0,2 дБ	-0,1 дБ	0 дБ
Усиление	1000:1	100:1	10:1	2:1	1,048:1	1,025:1	1:1
	+30 дБ	+20 дБ	+10 дБ	+3 дБ	+0,2 дБ	+0,1 дБ	0 дБ

Если при затухании  $20 \text{ дБ/км}$  (характерно для первых *ОВ* 70-х годов) световой сигнал на выходе километрового отрезка волокна ослаблялся в 100 раз, то для лучших современных одномодовых *ОВ* с затуханием, близким к теоретическому пределу и не превышающим  $0,2 \text{ дБ/км}$ , ослабление сигнала происходит не более, чем на 4,6%.

Коэффициент затухания  $A$  нелинейно зависит от параметров *ОВ* и длины волны света (рис.3.3.8). Обычное кварцевое *ОВ* прозрачно в ближней *ИК*- области оптического излучения с длиной волны до  $\lambda \approx 2 \text{ мкм}$  (существуют *инфракрасные ОВ*, сделанные из специальных легированных стекол, которые прозрачны для *среднего ИК-излучения* с длиной волны  $\lambda \approx 2\text{-}10 \text{ мкм}$ ).

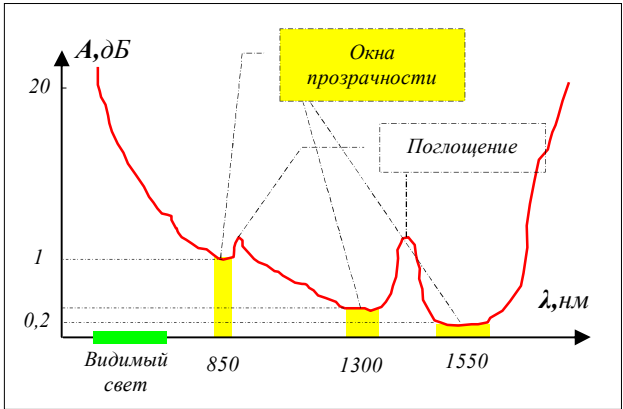


Рис.3.3.8 Зависимость коэффициента затухания  $A$  от длины волны  $\lambda$  для обычного кварцевого *ОВ* в ближней *ИК*-области оптического излучения

График имеет несколько участков - *окна прозрачности*, где затухание минимально: окна 820-880, 1285-1330 и 1525-1575 нм. Из-за большого затухания *видимый свет* диапазона 0,4-0,7 мкм в передаче светового сигнала по обычному кварцевому *ОВ* не используется



(имеются специальные *ОВ* для работы и в видимой части спектра). Наиболее эффективна для передачи светового сигнала длина волны из второго и третьего окон прозрачности.

Под *дисперсией* в общем случае понимают «растягивание» светового сигнала во время его передачи по *ОВ*, что ограничивает скорость передачи данных и снижает полосу пропускания канала\*.

\*Различают два основных типа дисперсии: *модовую* и *хроматическую*. Первая связана с различным временем прохождения разных мод и характерна для многомодового *ОВ* (см.рис.3.3.6,а). Вторая определяется зависимостью скорости распространения светового луча от длины волны источника излучения: любой реальный источник, в отличие от идеального, излучает свет в некоторой полосе частот, и составляющие светового сигнала, имеющие близкие, но разные длины волн, достигают конца *ОВ* с различными задержками, искажая, подобно модовой дисперсии, исходный сигнал на выходе *ОВ*. Хроматическая дисперсия выражается в *пс/нм·км* и физически может быть представлена как разность времени прохождения сигналами двух длин волн *ОВ* длиной 1 км.

Если введенный в волокно свет линейно поляризован, то в идеальных условиях распространения (однородная структура и круглое сечение волокна по всей его длине, ввод излучения в волокно строго под углом *ПВО*), он сохраняет свое состояние поляризации по мере распространения в волокне. В реальном же *ОВ* из-за неидеальности геометрических размеров его сердцевины и различных механических и иных факторов (например, перегибов волокна и его поперечных или продольных напряжений, вибраций, изменения температуры) появляется некоторая асимметрия показателя преломления в ортогональных направлениях вдоль оси волокна. В одномодовом *ОВ* основная мода линейно поляризованного света передается в виде двух ортогонально ориентированных волновых составляющих (ортогональных мод  $E_x$  и  $E_y$ ), разность скоростей распространения которых, вызванная указанными факторами, приводит к искажению выходного сигнала и к его частичной деполяризации. Это явление называют *поляризационно-модовой дисперсией (ПМД)*. Она носит статистический характер и не превышает, как правило, 0,5 *пс/км*. *ПМД* невозможно компенсировать, и ее величина может быть понижена только за счет увеличения качества *ОВ*.

Обычное *ОВ*, применяемое в связи, не позволяет сохранять состояние поляризации. Для этой цели используют специальные, «*поляризационные*» типы *ОВ*. Одномодовое *ОВ*, в котором поляризация основной моды не искажается из-за случайных дефектов и флуктуаций показателя преломления сердцевины, называют *ОВ, сохраняющим (не искажающим, поддерживающим) поляризацию* [3.38]. Если сделать разность скоростей ортогональных мод  $E_x$  и  $E_y$  и соответственно разность их фаз такой, чтобы она превышала возможные фазовые флуктуационные изменения, то распространение света по волокну перестанет зависеть от этих изменений, т.е. его линейная поляризация полностью сохранится. Получить большую разность фаз, достаточную для всей длины волокна, можно в *ОВ с эллиптическим сердечником или эллиптически напрягаемой оболочкой*. Однако для измерения тока такие *ОВ* непригодны, так как в этом случае нужны *ОВ с циркулярным состоянием поляризации*. Например, один из возможных типов таких *ОВ* – «*крученное*» *ОВ* – получают за счет быстрого вращения кварцевой заготовки в процессе вытяжки волокна и «замораживания» при этом его спиралевидной структуры.

Еще один из путей повышения поляризационной стабильности *ОВ* – применение *микроструктурированного оптического волокна (МОВ)* или «*дырчатого*» *ОВ*, содержащего вокруг кварцевой сердцевины множество *воздушных цилиндрических микроканалов* диаметром 1-2 *мкм* с  $n_2=1$ , сильно влияющих на оптические и поляризационные свойства волокна [3.39]. В частности, эти каналы компенсируют (за счет изменения своей формы) температурные и механические воздействия на волокно, влияющие на поляризацию сигнала. Различные «*крученные*» и «*дырчатые*» *ОВ* используют в *ОТТ* и *ОПТ* для сохранения поляризации светового сигнала в процессе его передачи по волокну.

Кварцевое *ОВ*, как среда передачи светового сигнала, обладает низкими потерями энергии (менее 0,2 *Дб/км* для  $\lambda=1,55$  *мкм*), широкополосностью (6-10 *кГц*), малыми габаритами

( $D < 150-250$  мкм), высокой прочностью (волокно выдерживает в силу своей однородности и бездефектности предельное напряжение до 7 кг), малым весом (порядка 30 г/км), гибкостью ( $R_u \geq 2$  мм), невосприимчивостью к электромагнитным помехам (высокой помехозащищенностью), малыми переходными помехами (при плотной укладке волокна в кабели), отсутствием искрения (взрыво- и пожаробезопасностью), полной электробезопасностью, защитой от несанкционированного доступа, стойкостью к коррозии, радиации и высоким температурам [3.37]. Эти качества *ОВ* определяют основные преимущества оптических *ТТ* и *ПТ* по сравнению с их электромагнитными аналогами.

### 3.3.3 Конструкция и характеристики оптических *ТТ* и *ПТ*

Типичная схема *ОТТ* или *ОПТ* содержит чувствительный элемент в виде нескольких витков *ОВ*, помещенных в жесткую защитную оболочку из немагнитного материала, – токовую головку для *ОТТ* или измерительную петлю для *ОПТ*, и электронно-оптический блок (*ЭОБ*), соединяемый с чувствительным элементом непосредственно (для *ОПТ*) или через оптический кросс (для *ОТТ*) (рис.3.3.9) [3.40-3.42].

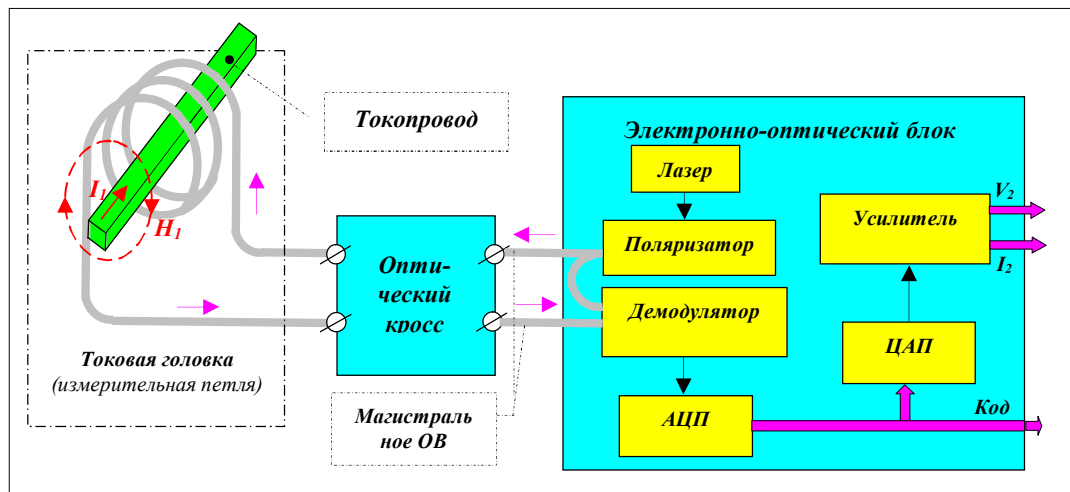


Рис.3.3.9 Упрощенная структурная схема оптического *ТТ* или *ПТ*  
(интерфейсы:  $V_2$  – потенциальный выход (напряжение),  $I_2$  – токовый выход, Код – выход АЦП)

*ЭОБ* генерирует с помощью встроенного лазера и поляризатора (линейного и кругового) на своем оптическом выходе монохроматический циркулярно поляризованный световой сигнал, направляемый по поддерживающему поляризацию *ОВ* на вход чувствительного элемента. В чувствительном элементе плоскость поляризации сигнала подвергается под воздействием магнитного поля  $H_1$  тока  $I_1$  соответствующему повороту на угол Фарадея, и с выхода чувствительного элемента световой сигнал поступает на оптический

вход ЭОБ, где на демодуляторе (фотодиоде с фазовым детектором) из него формируется электрический измерительный сигнал. Далее этот сигнал через *аналого-цифровой преобразователь (АЦП)* поступает в виде *цифрового кода* определенной разрядности на дискретный интерфейсный выход ЭОБ и через *цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП)* на усилитель, где формируются нормированные аналоговые выходные сигналы в виде напряжения или тока для выдачи на аналоговый интерфейс ЭОБ. Таким образом, измерительная информация может быть получена на выходе ЭОБ для дальнейшего использования в аналоговом или дискретном виде

В том случае, когда чувствительный элемент по технологическим требованиям, например, на высоковольтных подстанциях, должен быть дистанционно значительно удален от ЭОБ (до 1 км), для подключения чувствительного элемента дополнительно используется *магистральное ОВ*, сохраняющее поляризацию, и *кроссовый блок* (кабельный бокс), подключающий его к ОВ чувствительного элемента. Состав оборудования и функции, выполняемые ЭОБ, зависят от изготовителя и карты заказа изделия. В частности, ЭОБ, содержащий встроенные часы, микропроцессор и память, способен преобразовывать в реальном времени текущие цифровые коды АЦП в именованные *цифровые результаты измерений* основной и производных гармоник измеряемого тока, накапливать их в памяти за различные интервалы времени и выдавать результаты измерений через цифровой интерфейс в *цифровую вычислительную сеть* объекта или субъекта учета. Тем самым, ОТТ или ОПТ, в отличие от их электромагнитных аналогов, легко можно включать в те или иные *цифровые системы* (например, *цифровые подстанции* в соответствии со стандартом [3.39]), минуя промежуточное использование измерительных приборов (амперметров, ваттметров, электрических счетчиков и других приборов с токовыми цепями).

Конструкция токовых головок для ОТТ зависит от конструкции высоковольтных шин на объекте учета, с которыми эти головки должны сопрягаться. На рис.3.3.10 приведены три варианта токовых головок одного из ведущего мирового изготовителя ОТТ и ОПТ (канадской компании *NxtPhase Corporation*) для шин различного вида.

В ОТТ токовые головки устанавливаются на вершине *изоляционных колонн*, которые выполняют одновременно функции *опоры* шины с головкой, *защиты ОВ* от воздействий внешней среды (ОВ проходит внутри колонны от головки к кроссовому блоку, размещаемому, как правило, в основании колонны) и дополнительной электрической *изоляции* кроссового блока и персонала, работающего с ОВ у основания колонны. Для обеспечения опорной функции колонна изготавливается в виде спиралевидного цилиндра необходимой высоты, а для обеспечения его защитной и изоляционной функций используют композитный материал (стеклопластик) с высокими изоляционными и антикоррозийными свойствами. Колонну заключают в защитную оболочку, например, из силиконовой резины, что обеспечивает не только устойчивость колонны к повреждениям при перевозке, но и ее вандалоустойчивость, гидрофобность и стойкость к загрязнению. Колонны устанавливают на местные опорные конструкции в открытых распределительных устройствах (ОРУ) подстанций.

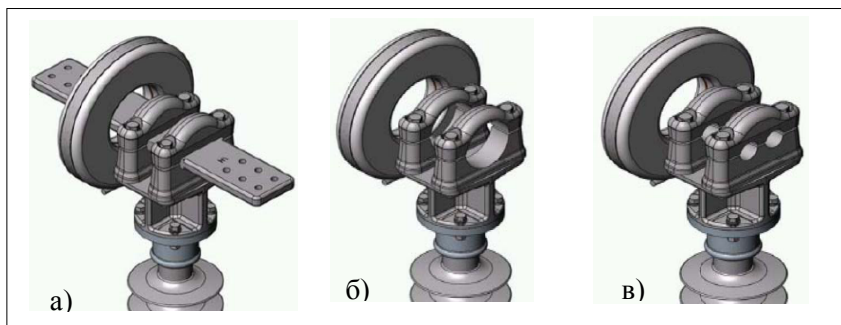


Рис.3.3.10 Конструкция токовых головок *ОТТ* производства фирмы *NxtPhase*:

а) для плоской шины, б) для одиночной круглой шины, в) для спаренных круглых шин

В *ОПТ* вместо стандартной токовой головки используется *измерительная петля* (волоконно-оптический датчик тока *ВОДТ*), форма и размер которой индивидуально подбирается под ту токоведущую шину, в которой необходимо измерить ток (рис.3.3.11). *ОПТ* с такой изменяемой петлей называют *трансформируемым*. Для защиты оптоволоконна в петле от механических и других внешних воздействий, оно помещается в гибкую защитную оболочку, а затем в неметаллический трубопровод с ограниченным радиусом изгиба. В отличие от *ОТТ*, применяемых на высоковольтных подстанциях для измерений переменного тока промышленной частоты, *ОПТ* используют, как правило, при измерении больших переменных или постоянных токов в различных технологических процессах на энергоемких производствах, например, в электрометаллургической или электрохимической промышленности. На рис.3.3.11 приведены варианты *ВОДТ* для *ОПТ* типа *NXCT-F3* (а,б) компании *NxtPhase*, типа *LKCO-60* (в) производства компании *DynAmp* (США) и типа *FOCS* компании *ABB* (Швеция).

Общие технические и метрологические характеристики *ОТТ* и *ОПТ* нормируются тем же межгосударственным стандартом, что и для электромагнитных *ТТ* [3.7]. Специфические характеристики *ОТТ* и *ОПТ*, включая требования к их конструкции, тестированию, точности измерения гармоник (для систем измерения, защиты и контроля качества электроэнергии), аналоговому и цифровому интерфейсу, нормируются стандартом *МЭК* [3.44].

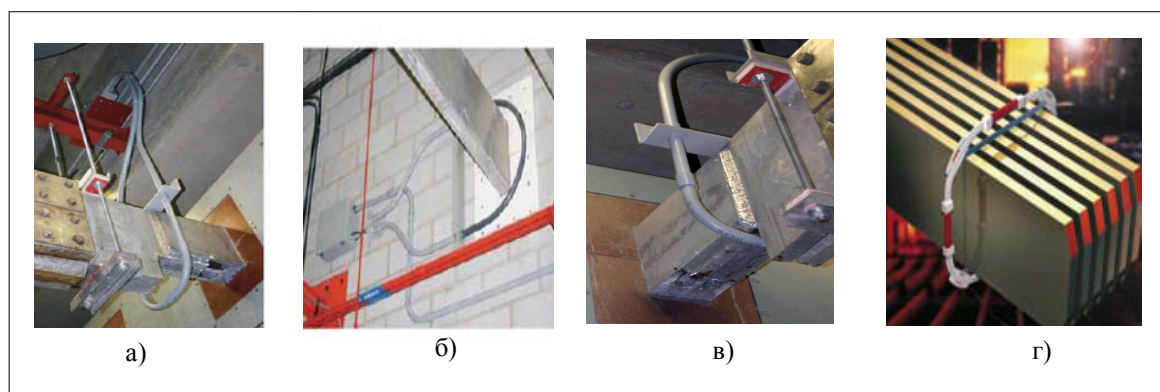


Рис.3.3.11 Конструкция и монтаж *ВОДТ* для *ОПТ* типа *NXCT-F3* (а,б) компании *NxtPhase*, типа *LKCO-60* (в) компании *DynAmp* и *FOCS* (г) компании *ABB* на мощных технологических шинопроводах

Рассмотрим кратко характеристики серийных *ОТТ* и *ОПТ* на примере отдельных изделий ведущих мировых производителей [3.40-3.42,3.45-3.47]:

- *ОТТ* типа *NXCT* компании *NxtPhase* рассчитан на измерение тока промышленной частоты силой до  $I_{max} \leq 4000 \text{ A}$  с классом точности не хуже  $0,2S$  для номинальных напряжений 69, 115, 138, 230, 345, 400, 500 или 765 кВ (в зависимости от величины напряжения высота-вес изоляционной колонны изменяется от 1,55м - 49кг до 5,28м - 95кг); односекундный ток термической стойкости равен 63 кА, а ток динамической стойкости - 170 кА; условия эксплуатации: изоляционная колонна  $\{-50^{\circ}\text{C}...55^{\circ}\text{C}\}$ , ЭОБ  $\{-5^{\circ}\text{C}...40^{\circ}\text{C}\}$ ; комплект электроники

- два шасси  $428 \times 457 \times 177$  мм; питание ЭОБ от источника постоянного тока напряжением 70-170 В мощностью  $P_{ном} = 135 \text{ Вт}$ ; интерфейс:  $V_2 = 4 \text{ В}$  (измерение), 200 мВ (защита),  $I_2 = 1 \text{ А}$  с полосой пропускания от 10 Гц до 6 кГц (возможность измерений до 100 гармоник);

- ОПТ типа NXCT-F3 компании NxtPhase рассчитан на измерение с классом точности не хуже 0,2S (в диапазоне от 1 до 120% номинального тока с учетом температуры, вибрации, процессов сборки) переменного  $I_{1max} \leq 100 \text{ кА}$  или постоянного  $I_{1max} \leq 600 \text{ кА}$  тока напряжением 6-42 кВ без разрыва токоведущей шины и в условиях ограниченного пространства; условия эксплуатации: ВОДТ  $\{-50^\circ\text{C} \dots 60^\circ\text{C}\}$ , ЭОБ  $\{-5^\circ\text{C} \dots 40^\circ\text{C}\}$ ; размеры-вес : ЭОБ  $482 \times 457 \times 233 \text{ мм}$  - 44 кг, ВОДТ- менее 5 кг; питание ЭОБ 110-130 В постоянного тока; интерфейс:  $V_2 = 10 \text{ В}$  и  $I_2 = 1 \text{ А}$  с полосой пропускания до 6 кГц (возможность измерений до 100 гармоник);

- ОПТ типа LKCO-60 компании DynAmp рассчитан на измерение постоянных токов  $I_{1max} \leq 60 \text{ кА}$  с точностью не хуже 0,1%; ЭОБ запитывается от источника переменного тока частотой  $f = 47\text{-}62 \text{ Гц}$  напряжением 95-265 В и имеет унифицированные выходные сигналы: токовый  $I_2$  со значением 3 мА на 1 кА, потенциальный  $V_2$  со значением 1 мВ на 1 кА, а также  $V_2 = 0 \dots 10 \text{ В}$  на всю шкалу измеряемого тока  $I_1$ ; дополнительно ОПТ может быть оснащен частотным интерфейсом (10 кГц на полную шкалу), унифицированным токовым интерфейсом 4-20 мА и цифровым интерфейсом; условия эксплуатации: ВОДТ  $\{-40^\circ\text{C} \dots 80^\circ\text{C}\}$ , ЭОБ  $\{-10^\circ\text{C} \dots 40^\circ\text{C}\}$ .

- ОПТ типа FOCS компании ABB рассчитан на измерение постоянных токов  $I_{1max} \leq 500 \text{ кА}$  в двух направлениях с точностью не хуже 0,1% (в диапазоне от 1 до 120% номинального тока); полоса пропускания - 4 кГц; интерфейс: потенциальный  $V_2 = 0 \dots 1 \text{ В}$ , унифицированный токовый сигнал 0(4)-20 мА, цифровой канал PowerLINK, цифровая шина PROFIBUS; условия эксплуатации: ВОДТ  $\{-40^\circ\text{C} \dots 85^\circ\text{C}\}$ , ЭОБ  $\{-20^\circ\text{C} \dots 55^\circ\text{C}\}$ .

В ВОДТ LKCO-60 и FOCS используется не проходная схема измерения угла Фарадея поляризованного светового сигнала (см. рис.3.3.9), а реверсивная схема, при которой световой сигнал отражается от зеркала, расположенного в конце измерительной петли и возвращается обратно в ЭОБ по тому же пути, по которому он вводился в ОБ [3.42]. Изготовители имеют запатентованные системы полной компенсации погрешностей для такой реверсивной схемы измерения. Следует отметить, что аппаратные, алгоритмические и программные решения в конкретных ОТТ и ОПТ всех производителей являются, как правило, коммерческой тайной, что обусловлено высокими затратами на разработку этой новейшей техники, большой конкуренцией на мировых рынках высоких технологий и высокой стоимостью самих изделий.

Основные преимущества оптических ТТ и ПТ по сравнению с аналогичными электромагнитными аналогами заключаются в следующем:

- возможность масштабного преобразования и измерения как переменного (до 100 кА) так и постоянного или импульсного (до 600 кА) тока различных уровней напряжений (до 800 кВ);

- оптико-электронное малоинерционное преобразование световых сигналов с отсутствием явлений гистерезиса (магнитных потерь), магнитного насыщения и остаточного намагничивания, характерных для электромагнитных аналогов и ограничивающих их динамический диапазон и точность измерений;

- большой динамический диапазон ( $0,1\text{-}200\% I_{ном}$ ) и высокая точность (0,1- 0,2%) для измерений и защиты токовых цепей, достигаемые за счет использования поляризованных световых сигналов и их цифровой обработки; при этом одно и то же изделие, в отличие от электромагнитных аналогов, может использоваться при 10-кратно различающихся первичных номинальных токах за счет электронной перенастройки коэффициентов трансформации;



- широкая полоса пропускания сигналов (не менее  $6\text{ кГц}$ ), позволяющая производить полный анализ не только количества, но и качества электроэнергии в части гармоник (до 100 гармоник) и переходных процессов (для защиты);
- возможность интеграции в измерительные и информационные системы с использованием различных интерфейсов – аналоговых (по напряжению, по току, по унифицированному токовому сигналу), дискретных (по частоте, коду) и цифровых (с передачей цифровых результатов измерений) – и исключением влияния вторичной нагрузки на процессы измерения, которое характерно для электромагнитных изделий;
- полная эколого-, пожаро-, взрыво- и электробезопасность за счет отсутствия вредных веществ и электропроводящих материалов в ВОДТ, а также за счет использования маломощных световых сигналов, исключающих возможности искрения и возгорания в нештатных ситуациях (например, при обрыве *ОВ*);
- высокая помехоустойчивость к электромагнитным помехам, позволяющая монтировать изделия в сложной электромагнитной обстановке без ее предварительного анализа и коррекции;
- долговечность, долговременная стабильность и высокая повторяемость метрологических параметров изделий; низкая восприимчивость к вибрациям и изменениям температуры, влияющих обычно на метрологические характеристики;
- малые весогабаритные параметры, упрощающие и облегчающие монтаж, а также позволяющие устанавливать изделия в ограниченном пространстве, в любом положении, с установкой на опору или путем подвешивания к жесткой шине;
- простота и надежность конструкции *ВОДТ*, высокая надежность и самодиагностика электронно-оптических блоков (*ЭОБ*) минимизируют требования к техническому обслуживанию и проверке изделий.

Все эти преимущества являются следствием применения в рассматриваемых изделиях маломощных поляризованных световых сигналов, распространяющихся в *ОВ*, помещенном в магнитное поле измеряемого тока, бесконтактного воздействия этого поля на данные сигналы через эффект Фарадея и электронной цифровой обработки результатов измерений.

## Литература

- 3.1 РМГ 29-99. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – Минск, Госстандарт, 2002.
- 3.2 СТБ П 8021-2003 (РМГ 29-99). Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Метрология. Основные термины и определения. - Минск, Госстандарт, 2003.
- 3.3 ГОСТ 18685-73 (2004). Межгосударственный стандарт. Трансформаторы тока и напряжения. Термины и определения. – М., Издательство стандартов, 1974.
- 3.4 ГОСТ 16110-82. Трансформаторы силовые. Термины и определения. – М., Издательство стандартов, 1982.
- 3.5 ГОСТ 18311-80. Межгосударственный стандарт. Изделия электротехнические. Термины и определения основных понятий. – М., Издательство стандартов, 1980.
- 3.6 Физика/Большой энциклопедический словарь. – М.: Большая российская энциклопедия, 1999.
- 3.7 ГОСТ 7746-2001. Межгосударственный стандарт. Трансформаторы тока. Общие технические условия. – Минск, Госстандарт, 2003.
- 3.8 ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М., Издательство стандартов, 1971.

3.9 ГОСТ 27744-88. Изоляторы. Термины и определения. – М., Издательство стандартов, 1988.

3.10 ГОСТ 18311-80. Межгосударственный стандарт. Изделия электротехнические. Термины и определения основных понятий. – М., Издательство стандартов, 1989.

3.11 Аничкин А.Н., Раскулов Р.Ф.,Эткинд Л.Л. Применение встроенных трансформаторов тока для учета электрической энергии. – Электро, №6, 2005.

3.12 Демидов А.И. Встроенные трансформаторы тока производства компании ЭПРО Галлспох гмбх, Австрия. – Сборник докладов 11-ой научно-практической конференции-выставки «Метрология электрических измерений в электроэнергетике», 31 марта-4 апреля 2008г.,М., Диалог-Электро.

3.13 Аничкин А.,Смирнов А. Применение встроенных трансформаторов тока в современных условиях. – Энергетика и ТЭК, №3, 2009.

3.14 ГОСТ 1516.1-76. Межгосударственный стандарт. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. - М., Издательство стандартов, 1997.

3.15 ГОСТ 403-73. Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Допустимые температуры нагрева частей аппаратов. - М., Издательство стандартов, 2003.

3.16 ГОСТ 8024-90 Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний. - М., Издательство стандартов, 1991.

3.17 Гуртовцев А.Л., Бордаев В.В., Чижонков В.И. Измерительные трансформаторы тока на 0,4 кВ. Испытания, выбор, применение. – Новости ЭлектроТехники, №1,2, 2004.

3.18 Гуртовцев А.Л. Измерительные трансформаторы тока 0,4-10 кВ. Возможности улучшения характеристик. – Новости ЭлектроТехники, №1, 2008.

3.19 ГОСТ 19693-74. Материалы магнитные. Термины и определения. - М., Издательство стандартов, 1986.

3.20 ГОСТ 21427.1-83. Сталь электротехническая тонколистовая. Технические условия. – М., Издательство стандартов , 1992.

3.21 ГОСТ 10994-74. Сплавы прецизионные. Марки. – М., Издательство стандартов, 2004.

3.22 ГОСТ Р 52002-2003. Электротехника. Термины и определения основных понятий. - М., Издательство стандартов, 2003.

3.23 Трансформаторы тока/В.В.Афанасьев, Н.М.Адоньев, Л.В.Жалалис и др. – Л., Энергия, 1980.

3.24 Электрические измерения: Учебник для вузов/ Л.И.Байда, Н.С. Добротворский, Е.М. Душин и др.- Л., Энергия, 1980.

3.25 Попов В.С. Электротехнические измерения: Учебник для техникумов. – М., Энергия, 1968.

3.26 Арутюнов В.О. Электрические измерительные приборы и измерения. –М.-Л., Госэнергоиздат, 1958.

3.27 Вострокнутов Н.Г. Электрические счетчики и их эксплуатация. - М.-Л., Госэнергоиздат, 1950.

3.28 Гуртовцев А.Л. Измерительные трансформаторы тока. Проблема нижней границы вторичной нагрузки. – Новости ЭлектроТехники, №2, 2008.

3.29 Раскулов Р.Ф. Влияние вторичной нагрузки на погрешности трансформаторов тока. – Электрические станции, №7,2003.

3.30 Сопьяник В.Х. Погрешности измерительных трансформаторов тока: исследования, особенности, рекомендации. – Новости ЭлектроТехники, №6,2004.

- 3.31 Раскулов Р.Ф. Погрешности трансформаторов тока. Влияние токов короткого замыкания. – Новости ЭлектроТехники, № 2, 2005.
- 3.32 Метрологическая готовность измерительных трансформаторов тока к эксплуатации в составе АСКУЭ/ Титов Н.Н., Прохвятилов В.Ю., Мураховский О.Д. и др. – Электрические сети и системы, №2,2008.
- 3.33 Элементарный учебник физики под ред. акад. Г.С. Ландсберга, т.3. – М.: Наука, 1952.
- 3.34 Яворский В.М., Пинский А.А. Основы физики, т.2 – М.: Наука, 1972.
- 3.35 Волоконно-оптические датчики. – М., ВИНТИ, Экспресс-информация «ПЭА», Реф.83, №22,1986.
- 3.36 ГОСТ 24204-80. Единица децибел для измерений уровней, затуханий и усиления в технике проводной связи. –М.,Госстандарт, 1980.
- 3.37 Т.Оокоси. Оптоэлектроника и оптическая связь/Пер. с япон. – М., Мир,1988.
- 3.38 С.Гонда, Д.Сэко. Оптоэлектроника в вопросах и ответах/Пер. с япон. –Л.. Энергоатомиздат, 1989.
- 3.39 Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы/ Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Потапов В.Т. и др. – Спецвыпуск «Фотон-экспресс», №6, 2005, [www.fotonexpress.ru](http://www.fotonexpress.ru).
- 3.40 Измерительные комбинированные оптические преобразователи тока и напряжения NXVCT-121/145/245/362/420/550/800. - Справочник покупателя, Изд.1.,2007.
- 4.41 Оптические измерительные преобразователи. – [www.tektologic.ru](http://www.tektologic.ru)
- 3.42 Власов М., Сердцев А. Высоковольтные оптические преобразователи для систем измерения и анализа качества электрической энергии. – Энергорынок, №10, 2006.
- 3.43 IEC 61850. Системы и сети связи на подстанциях (цифровой стандарт связи для подстанций). – [www.61850.com](http://www.61850.com).
- 3.44 IEC 60044-8. Трансформаторы измерительные. Часть 8. Электронные трансформаторы тока. – IEC, 2002.
- 3.45 LKCO-60 –оптоволоконная система измерения больших токов. – [www.toxsoft.ru](http://www.toxsoft.ru).
- 3.46 Бонерт К.,Гугенбах П. Прорыв в области измерения сильных постоянных токов. – АББ Ревю, №1, 2005.
- 3.47 Некрашевич Е., Старостин Н. Волоконно-оптические датчики тока. – Электронные компоненты, №11,2006.