

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

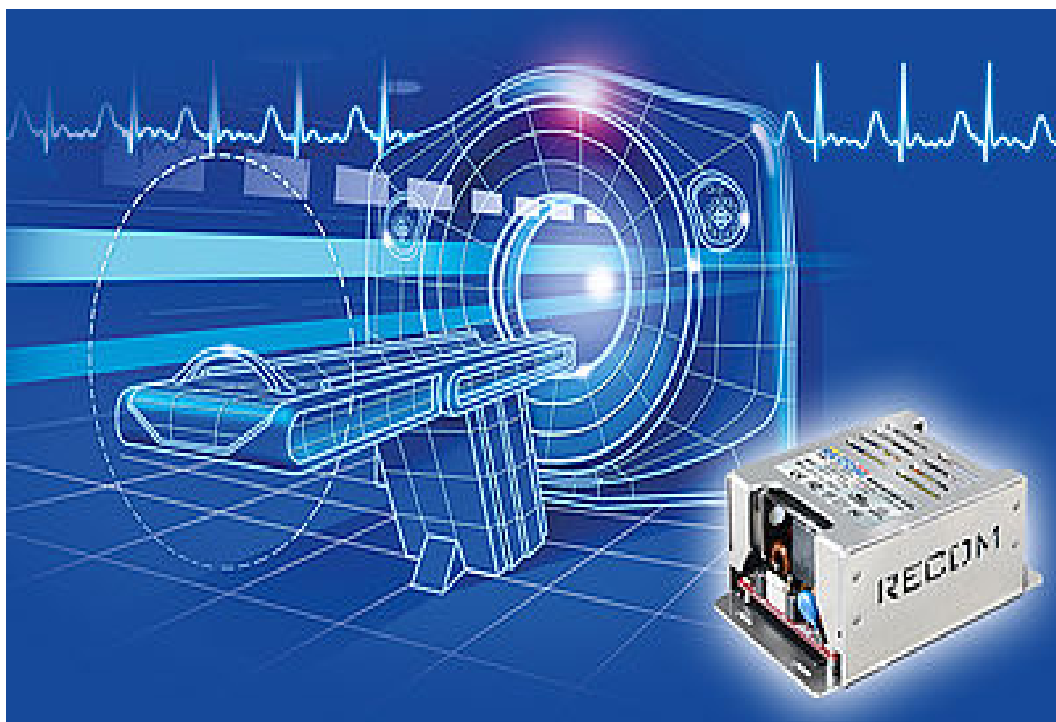
«Воронежский государственный технический университет»

Строительно-политехнический колледж

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА БЛОКОВ ПИТАНИЯ
И АНАЛОГОВЫХ СИСТЕМ:
ДИАГНОСТИКА БИОТЕХНИЧЕСКИХ БЛОКОВ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических работ для студентов специальностей
12.02.10 «Монтаж, техническое обслуживание и ремонт биотехнических
и медицинских аппаратов и систем» и 12.02.06 «Биотехнические
и медицинские аппараты и системы»
очной формы обучения



Воронеж 2023

УДК 621.38(07)
ББК 32.85я7

Составители:

И. М. Винокурова, О. В. Горожанкина, Л. О. Солощенко

Техническая диагностика блоков питания и аналоговых систем: диагностика биотехнических блоков: методические указания к выполнению практических работ для студентов специальностей 12.02.10 «Монтаж, техническое обслуживание и ремонт биотехнических и медицинских аппаратов и систем» и 12.02.06 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: И. М. Винокурова, О. В. Горожанкина, Л. О. Солощенко. — Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2023. — 50 с.

Методические указания разработаны с целью организации процессов подготовки практического обучения для оказания методической помощи студентам при изучении теоретического материала по курсу «Техническая диагностика блоков питания и аналоговых систем» с целью полного освоения материала и успешного выполнения заданий.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальностям 12.02.10 «Монтаж, техническое обслуживание и ремонт биотехнических и медицинских аппаратов и систем» и 12.02.06 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы», очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ_КПР_ТДБПиАУ_2023_2.pdf

Ил. 43. Табл. 2. Библиогр.: 19 назв.

УДК 621.38(07)
ББК 32.85я7

Рецензент — *В. А. Небольсин, д-р техн. наук, зав. кафедрой
твердотельной электроники ВГТУ*

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Источник питания является важнейшей составной частью любого электронного устройства, от надежности которого зависит работоспособность всего устройства. К источникам питания для медицинских приборов предъявляются одни из самых жестких требований по надежности и безопасности. Источники должны иметь повышенную прочность изоляции, а именно: от 4 кВ между входом и выходом, 2,5 кВ между выходами и корпусом, а также обладать высоким КПД. Из дополнительных требований можно отметить компактные размеры для установки в переносное оборудование и соответствие требованиям стандартов для медицинских применений (2xMOPP / 250 В AC).

Широко применявшиеся повсеместно в технике на протяжении многих десятков лет линейные источники питания (ЛИП) являются весьма простыми и даже примитивными устройствами (рис. 1). ЛИП состоят всего лишь из нескольких элементов: понижающего трансформатора, выпрямителя, сглаживающего фильтра на основе конденсатора и полупроводникового стабилизатора (стабилитрон с мощным транзистором или аналогичный по функции одиночный силовой полупроводниковый элемент).

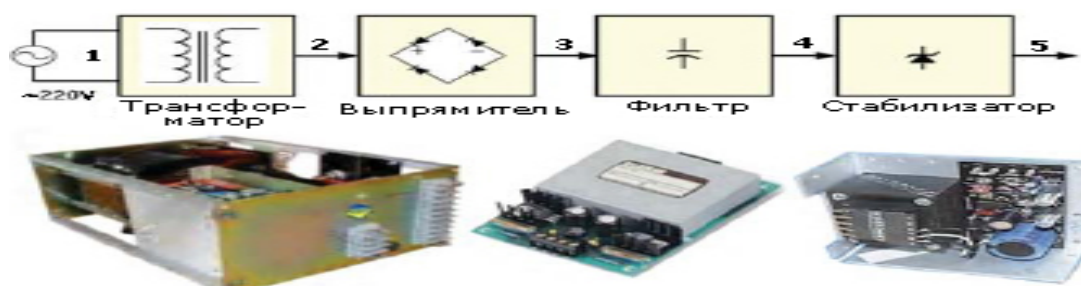


Рис. 1. Структура и внешний вид линейных источников питания

Наличие некоторого излишка напряжения позволяет осуществлять стабилизацию выходного напряжения источника, как при уменьшении, так и при увеличении входного напряжения за счет изменения доли энергии, рассеиваемой на стабилизирующем элементе. По этой причине КПД такого источника всегда намного ниже единицы.

Так как медицинскую технику стараются делать как можно более компактной, модули питания должны работать без снижения характеристик при повышенной температуре окружающей среды, например, в шкафах, где реализовать принудительное охлаждение не представляется возможным из-за требований гигиены, возможного загрязнения или минимизации акустических шумов. При этом данные источники питания также должны работать при низких температурах от -40°C , выдерживая постоянные вибрации и удары до нескольких g, что позволяет применять такие источники в портативной медицинской технике не только для поликлиник и больниц, но и для оснащения аварийно-спасательных служб и медицинской помощи на дому.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАТОРАХ

1.1. Назначение, классификация, номинальные данные трансформаторов

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Трансформаторы позволяют значительно повысить напряжение, вырабатываемое источниками переменного тока, установленными на электрических станциях, и осуществить передачу электроэнергии на дальние расстояния при высоких напряжениях (110, 220, 500, 750 и 1150 кВ). Благодаря этому сильно уменьшаются потери энергии в проводах, и обеспечивается возможность значительного уменьшения площади сечения проводов линий электропередачи.

В местах потребления электроэнергии высокое напряжение, подаваемое от высоковольтных линий электропередачи, снова понижается трансформаторами до сравнительно небольших значений (127, 220, 380 и 660 В), при которых работают электрические потребители, установленные на фабриках, заводах, в депо и жилых домах. На ЭДС переменного тока трансформаторы применяют для уменьшения напряжения, подаваемого из контактной сети к тяговым двигателям и вспомогательным цепям.

Кроме трансформаторов, применяемых в системах передачи и распределения электроэнергии, промышленностью выпускаются трансформаторы: тяговые (для ЭДС), для выпрямительных установок, лабораторные с регулированием напряжения, для питания радиоаппаратуры, медицинского оборудования и др. Все эти трансформаторы называют силовыми. Трансформаторы используют также для включения электроизмерительных приборов в цепи высокого напряжения (их называют измерительными), для электросварки и других целей. Трансформаторы бывают однофазные и трехфазные, двух- и многообмоточные.

Принцип действия трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Простейший трансформатор состоит из стального магнитопровода 2 (рис. 2) и двух расположенных на нем обмоток 1 и 3.

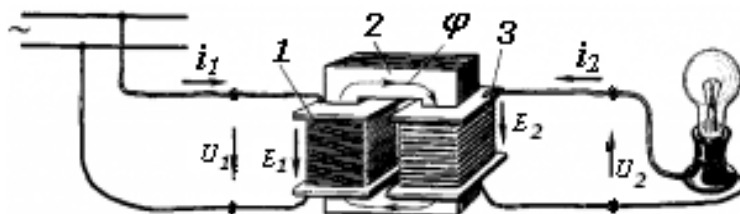


Рис. 2. Схема включения однофазного трансформатора

Обмотки выполнены из изолированного провода и электрически не связаны. К одной из обмоток подается электрическая энергия от источника переменного тока. Эту обмотку называют **первичной**. К другой обмотке, называемой **вторичной**, подключают потребители (непосредственно или через выпрямитель).

При подключении трансформатора к источнику переменного тока (электрической сети) в витках его первичной обмотки протекает переменный ток i_1 ,

образуя переменный магнитный поток Φ . Этот поток проходит по магнитопроводу трансформатора и, пронизывая витки первичной и вторичной обмоток, индуцирует в них переменные ЭДС E_1 и E_2 . Если к вторичной обмотке присоединен какой-либо приемник, то под действием ЭДС E_2 по ее цепи проходит ток i_2 .

ЭДС, индуцированная в каждом витке первичной и вторичной обмоток трансформатора, согласно закону электромагнитной индукции, зависит от магнитного потока, пронизывающего виток, и скорости его изменения. Магнитный поток каждого трансформатора является определенной величиной, зависящей от напряжения и частоты изменения переменного тока в источнике, к которому подключен трансформатор. Постоянна также и скорость изменения магнитного потока, она определяется частотой изменения переменного тока.

Следовательно, в каждом витке первичной и вторичной обмоток индуцируется одинаковая ЭДС. В результате этого *отношение действующих значений ЭДС E_1 и E_2 , индуцированных в первичной и вторичной обмотках трансформатора, будет равно отношению чисел витков N_1 и N_2 этих обмоток, т. е. $E_1/E_2 = N_1/N_2$.*

Отношение ЭДС $E_{вн}$ обмотки высшего напряжения к ЭДС $E_{нн}$ обмотки низшего напряжения (или отношение чисел их витков) называется *коэффициентом трансформации*:

$$n = E_{вн} / E_{нн} = K_{вн} / K_{нн}.$$

Коэффициент трансформации всегда больше единицы. Если пренебречь падениями напряжения в первичной и вторичной обмотках трансформатора (в трансформаторах средней и большой мощности они не превышают обычно $2 \div 5$ % номинальных значений напряжений U_1 и U_2), то можно считать, что *отношение напряжения U_1 первичной обмотки к напряжению U_2 вторичной обмотки приблизительно равно отношению чисел их витков, т. е.:*

$$U_1/U_2 \approx N_1/N_2.$$

Таким образом, подбирая требуемое соотношение между числами витков первичной и вторичной обмоток, можно увеличивать или уменьшать напряжение на приемнике, подключенном к вторичной обмотке. Если необходимо на вторичной обмотке получить напряжение большее, чем подается на первичную, то применяют повышающие трансформаторы, у которых число витков во вторичной обмотке больше, чем в первичной.

В понижающих трансформаторах, наоборот, число витков вторичной обмотки меньше, чем в первичной.

Трансформатор не может осуществить преобразование напряжения постоянного тока. При подключении его первичной обмотки к сети постоянного тока в трансформаторе создается постоянный по величине и направлению магнитный поток, который не может индуцировать ЭДС в первичной и вторичной обмотках. Поэтому не будет происходить передачи электрической энергии из первичной обмотки во вторичную.

При подключении первичной обмотки трансформатора к сети переменного тока через эту обмотку проходит некоторый ток, называемый *током холостого хода*. При включении нагрузки по вторичной обмотке трансформатора

начинает проходить ток, при этом увеличивается и ток, проходящий по первичной обмотке.

Чем больше нагрузка трансформатора, т. е. электрическая мощность и ток i_2 , отдаваемые его вторичной обмоткой подключенным к ней приемникам, тем больше электрическая мощность и ток i_1 , поступающие из сети в первичную обмотку.

Ввиду того что потери мощности в трансформаторе обычно малы, можно приближенно принять, что мощности в первичной и вторичной обмотках одинаковы. В этом случае можно считать, что токи в обмотках трансформатора приблизительно обратно пропорциональны напряжениям: $I_1/I_2 \neq U_2/U_1$ или что токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны числам витков первичной и вторичной обмоток:

$$I_1/I_2 \neq N_2/N_1.$$

Это означает, что в повышающем трансформаторе ток во вторичной обмотке меньше, чем в первичной (во столько раз, во сколько напряжение U_2 больше напряжения U_1), а в понижающем ток во вторичной обмотке больше, чем в первичной. Поэтому в трансформаторах обмотки высшего напряжения выполняются из более тонких проводов, чем обмотки низшего напряжения.

Особенностью трансформаторов тока является их работа в режиме, близком к короткому замыканию, так как их вторичная обмотка всегда замкнута на небольшое сопротивление.

Трансформаторами напряжения называются аппараты, предназначенные для преобразования переменного тока высшего напряжения в переменный ток низшего напряжения и питания параллельных катушек измерительных приборов и реле. Принцип действия и устройства трансформаторов напряжения аналогичен принципу работы силовых трансформаторов. Число витков вторичной обмотки $w_2 < w_1$, так как все измерительные трансформаторы напряжения – понижающего типа (рис. 3).

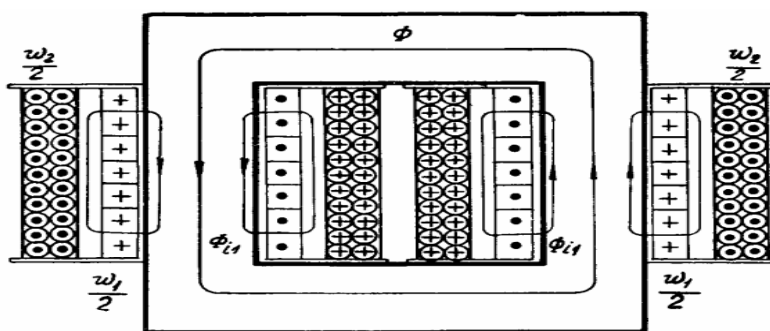


Рис. 3. Принципиальная схема трансформаторов напряжения

Особенность работы измерительного трансформатора напряжения заключается в том, что его вторичная обмотка всегда оказывается замкнутой на большое сопротивление, и трансформатор работает в режиме, близком к режиму холостого хода, так как подключаемые приборы потребляют незначительный ток.

Наибольшее распространение имеют **силовые трансформаторы напряжения**, которые выпускаются электротехнической промышленностью на мощности свыше миллиона киловольт-ампер и на напряжения до 1150÷1500 кВ.

Так как в энергетических системах имеет место многократная трансформация, мощность трансформаторов в 7÷10 раз превышает установленную мощность генераторов на электростанциях.

Силовые трансформаторы выпускаются в основном на частоту 50 Гц.

Трансформаторы малой мощности широко используются в различных электротехнических установках, системах передачи и переработки информации, навигации и других устройствах. Диапазон частот, на которых могут работать трансформаторы, — от нескольких герц до 105 Гц.

По **числу фаз** трансформаторы делятся на **однофазные, двухфазные, трехфазные и многофазные**. Силовые трансформаторы выпускаются в основном в трехфазном исполнении. Для применения в однофазных сетях выпускаются однофазные трансформаторы.

1.2. Классификация трансформаторов по числу и схемам соединения обмоток

Трансформаторы имеют две или несколько обмоток, индуктивно связанных друг с другом. Обмотки, потребляющие энергию из сети, называются **первичными**. Обмотки, отдающие электрическую энергию потребителю, называются **вторичными**.

Многофазные трансформаторы имеют обмотки (рис. 4, а), соединенные в многолучевую звезду или многоугольник. Трехфазные трансформаторы имеют соединение в трехлучевую звезду и треугольник.

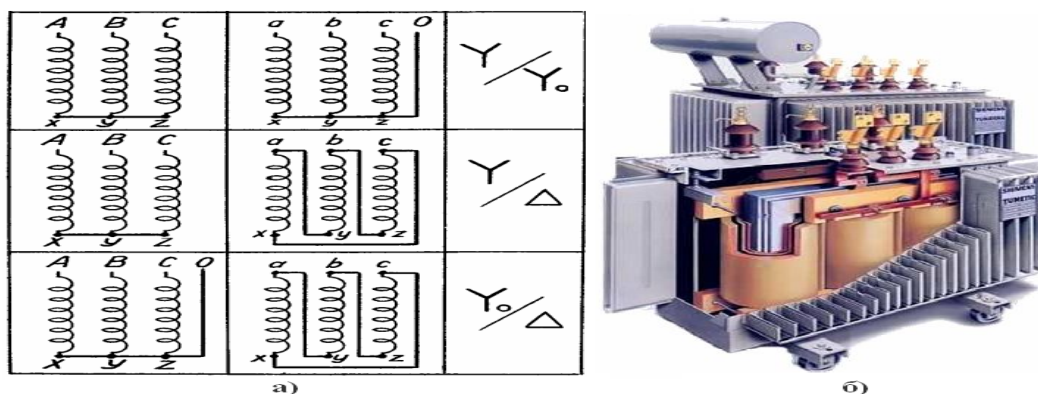


Рис. 4. а - схемы соединения обмоток силовых трансформаторов;
б - силовой масляный трансформатор ТМ-160 (250) кВА

Повышающие и понижающие трансформаторы

В зависимости от соотношения напряжений на первичной и вторичной обмотках трансформаторы делятся на **повышающие** и **понижающие**. В **повышающем трансформаторе** первичная обмотка имеет низкое напряжение, а вторичная — высокое. В **понижающем трансформаторе**, наоборот, вторичная обмотка имеет низкое напряжение, а первичная — высокое.

Трансформаторы, имеющие одну первичную и одну вторичную обмотки, называются **двухобмоточными**. Достаточно широко распространены **трехобмоточные трансформаторы**, имеющие на каждую фазу три обмотки, например, две на стороне низкого напряжения, одну — на стороне высокого напряжения или наоборот. **Многофазные трансформаторы** могут иметь несколько обмоток высокого и низкого напряжения.

По **конструкции** силовые трансформаторы **классифицируют** на два основных типа — **масляные** (рис. 4, б) и **сухие**.

В **масляных трансформаторах** магнитопровод с обмотками находится в баке, заполненном трансформаторным маслом, которое является хорошим изолятором и охлаждающим агентом.

Сухие трансформаторы охлаждаются воздухом. Они применяются в жилых и промышленных помещениях, в которых эксплуатация масляного трансформатора является нежелательной. Трансформаторное масло является горючим, и при нарушении герметичности бака масло может повредить другое оборудование (рис. 4, б). В соответствии с нормативными документами особенности конструкции трансформатора отражаются в обозначении его типа и систем охлаждения.

Тип трансформатора:

- Автотрансформатор (для однофазных О, для трехфазных Т) – А.
- Расщепленная обмотка низшего напряжения – Р.
- Защита жидкого диэлектрика с помощью азотной подушки без расширителя – З.
- Исполнение с литой изоляцией – Л.
- Трех обмоточный трансформатор – Т.
- Трансформатор с РПН – Н.
- Сухой трансформатор с естественным воздушным охлаждением (обычно вторая буква в обозначении типа), либо исполнение для собственных нужд электростанций (обычно последняя буква в обозначении типа) – С.
- Кабельный ввод – К.
- Фланцевый ввод (для комплектных ТП) – Ф.

Системы охлаждения сухих трансформаторов:

- Естественное воздушное при открытом исполнении – С.
- Естественное воздушное при защищенном исполнении – СЗ.
- Естественное воздушное при герметичном исполнении – СГ.
- Воздушное с принудительной циркуляцией воздуха – СД.

Системы охлаждения масляных трансформаторов:

- Естественная циркуляция воздуха и масла – М.
- Принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла – Д.
- Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с ненаправленным потоком масла – МЦ.
- Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с направленным потоком масла – НМЦ.
- Принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла – ДЦ.
- Принудительная циркуляция воздуха и масла с направленным потоком масла – НДЦ.

- Принудительная циркуляция воды и масла с ненаправленным потоком масла – Ц.

- Принудительная циркуляция воды и масла с направленным потоком масла – НЦ.

Системы охлаждения трансформаторов с негорючим жидким диэлектриком:

- Охлаждение жидким диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха – НД

- Охлаждение негорючим жидким диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха и с направленным потоком жидкого диэлектрика – ННД.

Автотрансформаторы. Наряду с трансформаторами широко применяются автотрансформаторы, в которых имеется электрическая связь между первичной и вторичной обмотками. При этом мощность из одной обмотки автотрансформатора в другую передается как магнитным полем, так и за счет электрической связи. Автотрансформаторы строятся на большие мощности и высокие напряжения и применяются в энергосистемах, а также используются для регулирования напряжения в установках небольшой мощности.

Номинальные данные трансформатора, на которые он рассчитан с заводской гарантией на 25 лет указываются в **паспортной табличке трансформатора**:

- номинальная полная мощность $S_{ном}$, кВ·А; - номинальное линейное напряжение $U_{л.ном}$, В или кВ; - номинальный линейный ток $I_{л.ном}$, А; - схема и группа соединения обмоток; - напряжение короткого замыкания U_k, %;	- число фаз; - режим работы; - номинальная частота f, Гц; - способ охлаждения.
--	---

В табличке приводятся также данные, необходимые для монтажа: полная масса, масса масла, масса выемной (активной) части трансформатора. Указываются тип трансформатора в соответствии с ГОСТ на марки трансформаторов и завод-изготовитель.

Ввиду общности конструкции и методов расчета к трансформаторам могут быть отнесены реакторы, дроссели насыщения и сверхпроводящие индуктивные накопители (рис. 5).

Известно, что передача электроэнергии на дальние расстояния осуществляется на высоком напряжении (220, 400, 500 кВ и более), благодаря чему значительно уменьшаются потери энергии в линии. Получить такое высокое напряжение непосредственно в генераторе невозможно, поэтому в начале линии электропередачи устанавливают повышающие трансформаторы, а в конце линии устанавливают понижающие трансформаторы.

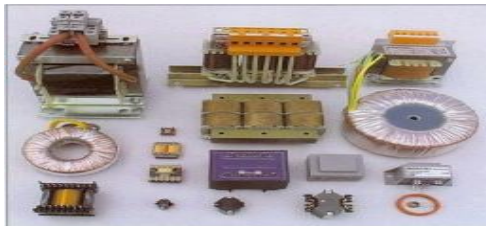


Рис. 5. Виды трансформаторного оборудования

Таким образом, переменный ток по пути от электростанции до потребителя подвергается трех-, а иногда и четырехкратному трансформированию.

В зависимости от назначения трансформаторы разделяются на **силовые** и **специальные**.

Силовые трансформаторы используются в линиях электропередачи и распределения электроэнергии.

К *специальным трансформаторам* относятся: печные, выпрямительные, сварочные, автотрансформаторы, измерительные, трансформаторы для преобразования частоты и т.д.

1.3. Принцип действия и конструкции трансформаторов

Простейший трансформатор состоит из магнитопровода и двух расположенных на нем обмоток (рис. 6). Обмотки электрически не связаны друг с другом. Одна из обмоток — *первичная*, подключена к источнику переменного тока. К другой обмотке — *вторичной* подключают потребитель.

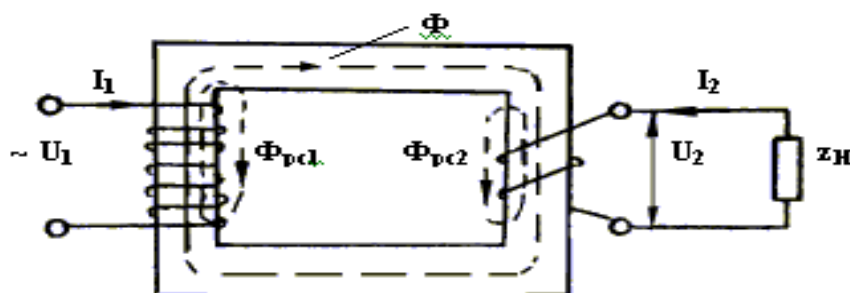


Рис. 6. Принципиальная схема трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток I_1 , который создает в магнитопроводе переменный магнито-поток Φ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток пронизывает обе обмотки, индуцируя в них ЭДС:

$$E_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad E_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Из этих формул следует, что вычисленные ЭДС E_1 и E_2 могут отличаться друг от друга числами витков в обмотках. Применяя обмотки с различным соотношением витков, можно изготовить трансформатор на любое отношение напряжений.

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения называется *коэффициентом трансформации*:

$$k = \frac{E_1}{E_2}.$$

При подключении ко вторичной обмотке нагрузки Z_H в цепи потечет ток I_2 и на выводах вторичной обмотки установится напряжение U_2 . Обмотка трансформатора, подключенная к сети с более высоким напряжением, называется *обмоткой высшего напряжения* (ВН); обмотка, присоединенная к сети меньшего напряжения, называется *обмоткой низшего напряжения* (НН).

Трансформаторы — обратимые аппараты, т.е. могут работать как повышающими, так и понижающими. Основными частями трансформатора являются его магнитопровод и обмотки. Магнитопровод выполняется из тонких лис-

тов электротехнической стали. Перед сборкой листы изолируются друг от друга лаком или окалиной. Это дает возможность в значительной мере ослабить в нем вихревые токи и уменьшить потери на перемагничивание.

1.4. Эквивалентная схема трансформатора

Одним из методических приемов, облегчающих исследование электромагнитных процессов и расчет трансформаторов, является замена реального трансформатора с магнитными связями между обмотками эквивалентной электрической схемой (рис. 7).

На этом рисунке представлена эквивалентная схема приведенного трансформатора, на которой сопротивления r и x условно вынесены из соответствующих обмоток и включены с ними последовательно. Т.к. $k = 1$, то $E_1 = E_2$. Поэтому точки A и a , а также X и x на приведенном трансформаторе имеют одинаковые потенциалы, что позволит электрически соединить эти точки, получив T — образную эквивалентную схему замещения.

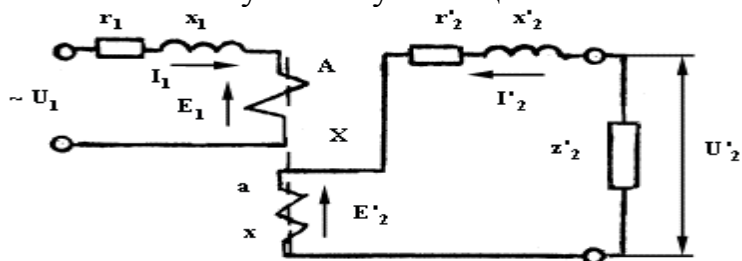


Рис. 7. Приведенный трансформатор с вынесенными сопротивлениями

Произведя математическое описание этой схемы методами Кирхгофа, можно сделать вывод о том, что она полностью соответствует уравнениям ЭДС и токов реального трансформатора. Отсюда появляется возможность электрического моделирования трансформатора на ЭВМ. Проводя исследования относительно нагрузки z_2' (единственного переменного параметра схемы), можно прогнозировать реальные характеристики трансформатора, начиная от холостого хода и кончая коротким замыканием ($z_2' = 0$).

1.5. Потери и коэффициент полезного действия

В работающем трансформаторе всегда имеются как магнитные, так и электрические потери. Магнитные потери состоят из потерь на вихревые токи и гистерезис: $P_c = P_r + P_{вх} = P_{оН}$.

Величина этих потерь зависит от напряжения U_1 и магнитной индукции B . Можно считать, что при $U_1 = \text{const}$, $p_{оН} = B_2$. Они не зависят от нагрузки, т.е. являются постоянными. Электрические потери в обмотках, наоборот, переменные, т.е.:

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} = I_1^2 r_1 + I_2'^2 r_2' = P_{кн},$$

где $p_{кн}$ — соответствует потерям при коротком замыкании трансформатора. Если известны потери короткого замыкания при номинальной нагрузке, то электрические потери можно определить по формуле: $P_{\Sigma} = \beta^2 P_{кн}$,

где β — коэффициент загрузки трансформатора. Общие потери в трансформаторе:

$$\sum P = P_{оН} + \beta^2 P_{кн}.$$

КПД представляет собой отношение активной мощности P_2 , отбираемой от трансформатора, к активной мощности P_1 , подводимой к трансформатору:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Мощность P_2 подсчитывается по формуле:

$$P_2 = m I_2 U_2 \cos \varphi_2,$$

$$P_2 = \beta S_H \cos \varphi_2,$$

где $S_H = m I_{2H} U_{2H}$ — номинальная мощность, кВт.

Мощность $P_1 = P_2 + \Sigma p$, тогда КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p}$$

$$\eta = 1 - \frac{p_{\text{он}} + \beta^2 p_{\text{кн}}}{\beta S_H \cos \varphi_2 + p_{\text{он}} + \beta^2 p_{\text{кн}}}.$$

или

Как видно из последней формулы, величина КПД зависит от загрузки трансформатора. Кроме того, КПД тем больше, чем выше $\cos \varphi_2$. Максимальный КПД соответствует такой загрузке, при которой магнитные потери равны электрическим потерям: $p_{\text{он}} = \beta'^2 p_{\text{кн}}$.

Отсюда значение коэффициента загрузки, соответствующее максимальному КПД, равно: $\beta' = \sqrt{p_{\text{он}} / p_{\text{кн}}}$. Обычно КПД имеет максимальное значение при $\beta = 0,5 - 0,6$. Тогда $\eta = 0,98 - 0,99$.

1.6. Трехфазные трансформаторы

Для трансформирования энергии в трехфазных системах используют либо группу из трех однофазных трансформаторов, у которых первичные и вторичные обмотки соединяются звездой или треугольником, либо один трехфазный трансформатор с общим магнитопроводом. Трехфазные трансформаторы могут иметь различные схемы соединения первичных и вторичных обмоток. Все начала первичных обмоток трансформатора обозначают большими буквами: А, В, С; начала вторичных обмоток — малыми буквами: а, в, с. Концы обмоток обозначаются соответственно: Х, У, Z и х, у, z. Зажим выведенной нулевой точки при соединении звездой обозначают буквой О. Наибольшее распространение имеют соединения обмоток по схеме "звезда" (Y) и "треугольник" (Δ), причем первичные и вторичные обмотки могут иметь как одинаковые, так и различные схемы. Если при соединении обмоток "звездой" нулевая точка выводится, то такое соединение называют "звезда с нулем" (Y₀). На рис. 8. приведен трехфазный трансформатор при включении обмоток Y/Y.

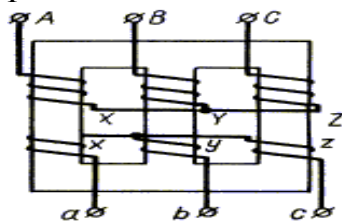


Рис. 8. Устройство трехфазного трансформатора

1.7. Параллельная работа трансформаторов

При выборе трансформаторов для электроснабжения производственного предприятия часто возникает дилемма: либо установить один мощный трансформатор, либо применить их несколько, в сумме обеспечивающих требуемую мощность.

Второй вариант будет всегда предпочтительней, т.к. режим работы предприятия в течение суток неравномерный и потребляемая мощность будет различной. Например, в ночное время нагрузка будет минимальной, т.к. потребляемая мощность складывается лишь из охранного освещения и нескольких дежурных объектов. Днем, когда работают основные потребители электроэнергии, потребляемая мощность будет максимальной. Какой-то промежуточный режим будет в вечернее время суток. Таким образом, в работе могут находиться один, два или сразу три трансформатора.

Параллельная работа нескольких трансформаторов связана с тем, что их вторичные обмотки питают общую нагрузку. Однако не все трансформаторы способны работать параллельно. Определим условия, при которых возможно включение трансформаторов на параллельную работу. Во-первых, это одинаковые первичные и вторичные напряжения на обмотках. Во-вторых, должны быть одинаковые схемы и группы соединения. Помимо этого, регламентируются напряжения короткого замыкания, указанные в паспорте трансформатора. И, конечно, порядок чередования фаз у параллельно работающих трансформаторов должен быть одинаковым. В качестве примера приведем схему параллельно включенных пяти сварочных трансформаторов, обеспечивающих работу 14 сварочных постов (рис. 9).

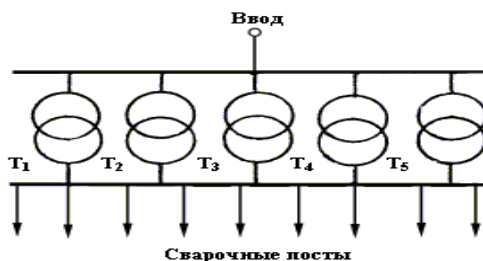


Рис. 9. Параллельная работа сварочного трансформатора

2. ТРАНСФОРМАТОРЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

2.1. Трехобмоточный трансформатор

В трехобмоточном трансформаторе имеются три электрически несвязанные друг с другом обмотки, из которых одна является первичной, а две другие - вторичными (рис. 10):

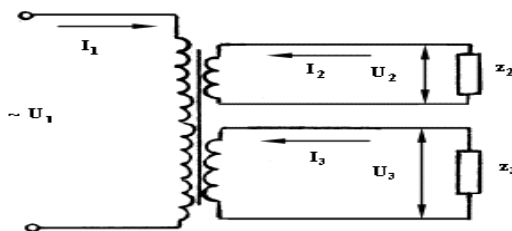


Рис. 10. Трехобмоточный трансформатор

Первичная обмотка трансформатора является намагничивающей и создает в магнитопроводе магнитный поток, который пронизывает две вторичные обмотки и наводит в них ЭДС E_2 и E_3 . Пренебрегая током холостого хода, можно записать уравнение токов трех обмоточного трансформатора:

$$I_1 = -(I_2' + I_3'),$$

т.е. первичный ток равен геометрической сумме приведенных вторичных токов. Целесообразность применения трехобмоточных трансформаторов объясняется еще и тем, что один трехобмоточный трансформатор фактически заменяет два двухобмоточных. За номинальную мощность принимается мощность первичной обмотки. По такому же принципу устроены многообмоточные трансформаторы малой мощности, применяемые в радиоустройствах, связи и в автоматике.

2.2. Автотрансформатор

В автотрансформаторе (рис. 11.) часть витков в обмотке В.Н. используется в качестве обмотки НН., т.е. в автотрансформаторе имеется всего лишь одна обмотка, часть которой (а X) принадлежит одновременно сторонам ВН и НН.

На участке AX протекает ток $i_{12} = i_2 - i_1$, или переходя к действующим значениям, учитывая, что I_1 и I_2 находятся в противофазе, можно записать

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

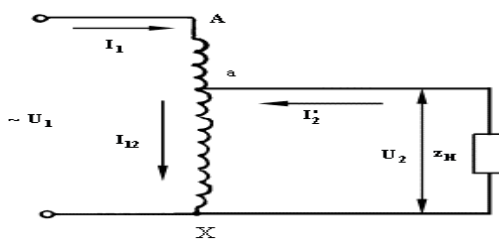


Рис. 11. Автотрансформатор

Таким образом, величина тока в общей части обмоток равна разности токов I_1 и I_2 . Если коэффициент трансформации близок к единице, то I_1 и I_2 мало отличаются друг от друга, разность между ними будет также небольшой. Это позволит выполнять часть обмотки AX проводом меньшего поперечного сечения. Мощность, передаваемая первичной обмоткой во вторичную цепь автотрансформатора, будет равна: $S = I_2 \times U_2$.

Учитывая, что $I_2 = I_1 + I_{12}$, ее можно записать в виде:

$$S = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_3 + S_M.$$

Здесь $U_2 \times I_1 = S_3$, есть мощность, поступающая во вторичную цепь электрическим путем, $U_2 \times I_{12} = S_M$ - мощность, поступающая во вторичную цепь посредством магнитного потока.

Следовательно, в автотрансформаторе посредством магнитного потока передается только часть мощности, что дает возможность уменьшить поперечное сечение магнитопровода. Магнитные потери при этом также уменьшаются.

При меньшем поперечном сечении магнитопровода уменьшается средняя длина витка обмотки, следовательно, вновь уменьшается расход обмоточной меди и снижаются электрические потери.

Таким образом, автотрансформатор имеет преимущества перед трансформаторами, заключающиеся в меньшем весе, меньших размерах более высо-

ком КПД, меньшей стоимости и. т.д. Однако эти достоинства имеют значение лишь при коэффициенте трансформации $k \leq 2$. При большем коэффициенте трансформации имеют место следующие недостатки:

- большие токи короткого замыкания в случае понижающего автотрансформатора (при замыкании точек а и X напряжение u_1 окажется на небольшой части витков автотрансформатора, обладающих малым сопротивлением короткого замыкания);

- электрическая связь стороны ВН со стороной НН;

- требующая усиления изоляции между обмотками и корпусом и возникающая опасность попадания ВН на сторону НН.

Автотрансформаторы могут быть повышенными и пониженными, однофазными и трехфазными. Автотрансформаторы применяются в высоковольтных линиях электропередач для пуска асинхронных и синхронных двигателей в лабораторной практике и при испытаниях. Регулировка напряжения осуществляется как переключателями, изменяющими вводимое число витков во вторичной цепи, так и посредством скользящего контакта, перемещающегося непосредственно по виткам обмотки.

2.3. Измерительные трансформаторы тока и напряжения

Эти трансформаторы применяются совместно с измерительными приборами для расширения их пределов измерения (рис. 12). Измерительный трансформатор напряжения представляет собой понижающий трансформатор с таким отношением витков w_1/w_2 , чтобы при $U_1 = U_{\text{сети}}$; $U_2 = 100$ В.

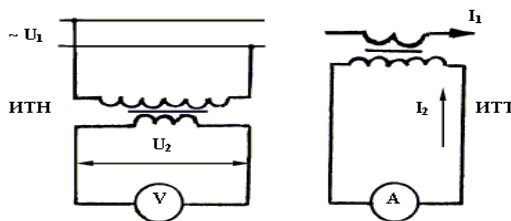


Рис. 12. Измерительные трансформаторы напряжения и тока

Во вторичную цепь включаются вольтметры, частотомеры, обмотки напряжения ваттметров, счетчиков и фазометров. Так как электрическое сопротивление этих приборов велико (порядка 1000 Ом), то трансформаторы напряжения работают в режиме, близком к холостому ходу. Такой режим связан с большими магнитными потерями, а это, в свою очередь, приводит к увеличению размеров магнитопровода и устройству специального масляного охлаждения. Измерительные трансформаторы тока (рис. 12) применяются для включения в сеть амперметров, обмоток тока ваттметров, счетчиков и фазометров.

2.4. Трансформатор для преобразования числа фаз

Для питания различных выпрямителей или для электропечей возникает необходимость в увеличении числа фазных обмоток трансформатора. Так, трехфазная система сети с помощью специального трансформатора может быть преобразована в шестифазную или двенадцатифазную. На рис. 13, а приведена схема шестифазного преобразователя.

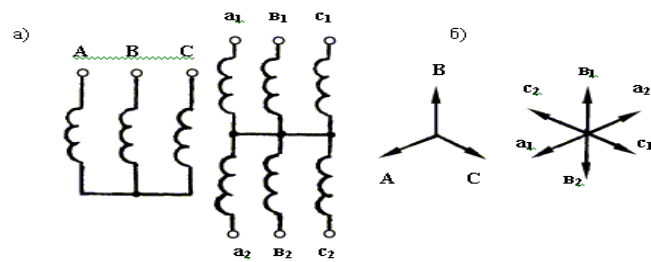


Рис. 13. Преобразователь числа фаз

Измерительные трансформаторы тока. Первичная обмотка такого преобразователя соединена "звездой", а вторичная - "двойной звездой". Векторная диаграмма вторичной обмотки преобразователя представляет собой шести-звездную звезду (рис. 13, б).

2.5. Стабилизатор напряжения

Для стабилизации напряжения в устройствах небольшой мощности (до 5 кВт) применяются электромагнитные стабилизаторы:

- 1) ферромагнитные насыщенного типа (без емкости), в которых используются явления, основанные на насыщении ферромагнитного сердечника;
- 2) феррорезонансные (с емкостью), работа которых основана на резонансе токов и напряжений.

Рассмотрим работу феррорезонансного стабилизатора. Он состоит из реактивной катушки 1, сердечник которой при заданном диапазоне напряжений U_1 работает в состоянии магнитного насыщения, конденсатора С и автотрансформатора 2 магнитопровод которого не насыщен (рис. 14). Обмотка автотрансформатора включена таким образом, чтобы напряжение на выходе стабилизатора U_2 было равно разности

$$U_2 = U_2' - U_2'',$$

где U_2'' — напряжение на выходе автотрансформатора;

U_2' — напряжение на выходах реактивной катушки.

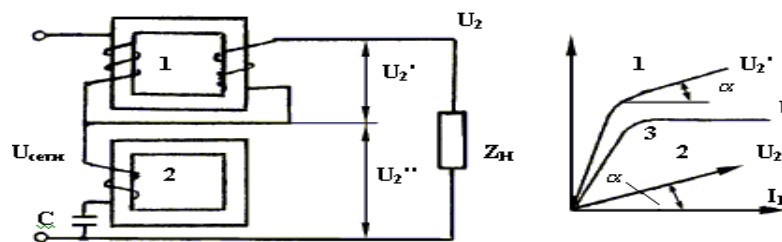


Рис. 14. Стабилизатор напряжения

Напряжение U_2' благодаря явлению феррорезонанса имеет резко нелинейную зависимость от тока I_1 (кривая 1). Напряжение на выходе автотрансформатора U_2'' в виду насыщенного состояния его магнитопровода пропорционально току I_1 (кривая 2). Если параметры автотрансформатора и реактивной катушки подобраны таким образом, что наклон кривой 1 к оси абсцисс в области магнитного насыщения равен наклону кривой 2, то разность $U_2' - U_2'' = \text{const.}$ В этом случае напряжение на выходе не зависит от тока I_1 (кривая 3) и, следовательно, от напряжения U_1 .

2.6. Магнитный усилитель

Магнитный усилитель — это статический аппарат, применяемый в схемах автоматического регулирования. Работа магнитного усилителя основана на нелинейности характеристики намагничивания магнитопровода (рис. 15).

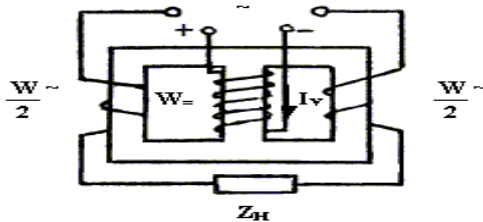


Рис. 15. Магнитный усилитель

На крайних стержнях магнитного усилителя находится рабочая обмотка, которая состоит из двух катушек соединенных последовательно. На среднем стержне размещается обмотка управления из большого количества витков. Если ток в нее не подается, а к рабочей обмотке подведено напряжение U_1 , то из-за малого количества витков $W_~$ магнитопровод не насыщается и почти все напряжение сети падает на сопротивление рабочих обмоток Z_H . На потребителе в этом случае выделяется малая мощность. Если теперь пропустим по обмотке управления ток I_y , то даже при небольшом его значении (из-за большого W_+), возникает насыщение магнитопровода. В результате сопротивление рабочей обмотки резко уменьшается, а величина тока в цепи - увеличивается. Таким образом, посредством малых сигналов в обмотке управления можно управлять значительной величиной мощности в рабочей цепи магнитного усилителя.

2.7. Трансформатор для преобразования частоты

На практике часто возникает необходимость создания источника переменного тока повышенной частоты. С помощью трансформаторов легко построить удвоитель или утроитель частоты. Утроитель частоты состоит из трех однофазных трансформаторов, работающих при сильно насыщенном сердечнике (рис. 16). Первичные обмотки соединены "звездой", а вторичные — последовательно. Как известно, намагничивающий ток имеет сложную форму кривой и помимо основной гармонической составляющей имеет третью, изменяющуюся с частотой $f_3 = 3f_1$. При соединении первичной обмотки "звездой" токи основной гармоники уравниваются, и под действием третьей гармоники магнитный поток наводит во вторичной обмотке напряжение, изменяющееся с тройной частотой.

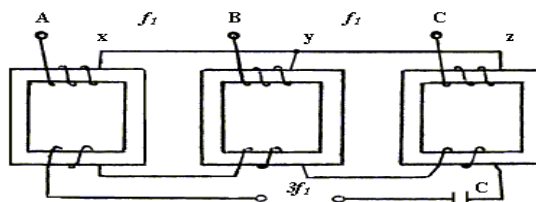


Рис. 16. Утроитель частоты

В качестве источников энергии в цепях постоянного тока могут быть гальванические элементы, электромеханические генераторы постоянного тока, термопары, элементы солнечной батареи и др.

Рассмотрим основные процессы, происходящие в гальваническом элементе, одном из распространенных источников электрической энергии постоянного тока. В простейшем случае гальванический элемент (рис. 17, а) представляет собой две пластины (из меди и цинка), помещенные в раствор электролита - серной кислоты (H_2SO_4). В водном растворе серная кислота диссоциирует на ионы: $2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{-2}$.

Вследствие химических процессов положительные ионы цинка Zn^{+2} переходят в раствор серной кислоты, оставляя на цинковой пластине избыток отрицательных свободных зарядов, т.е. цинковая пластина заряжается отрицательно. Одновременно в растворе серной кислоты тяжелые и малоподвижные положительные ионы цинка Zn^{+2} отесняют легкие и подвижные положительные ионы водорода H^+ к медной пластине, на поверхности которой происходит восстановление нейтральных атомов водорода. При этом медная пластина теряет свободные отрицательные заряды, т.е. заряжается - положительно. Между разноименно заряженными пластинами возникает однородное электрическое поле с напряженностью U_{ab} , В/м.

Если к выводам гальванического элемента подключить приемник (например, резистор), то в замкнутой электрической цепи возникнет ток. Заряд каждой из пластин уменьшится и появится направленное движение ионов в растворе электролита. Направленное противоположное движение ионов сопровождается их взаимными столкновениями, что создает внутреннее сопротивление гальванического элемента постоянному току.

Таким образом, гальванический элемент (рис. 17, а) и изображение на электрических схемах (рис. 17, б), можно представить в виде схемы замещения (17, в), состоящей: из последовательно включенных источника ЭДС E и резистивного элемента с сопротивлением R_v , равным внутреннему сопротивлению гальванического элемента (ε). Стрелка ЭДС указывает направление движения положительных зарядов внутри источника под действием электрического поля с напряженностью U_{ab} .

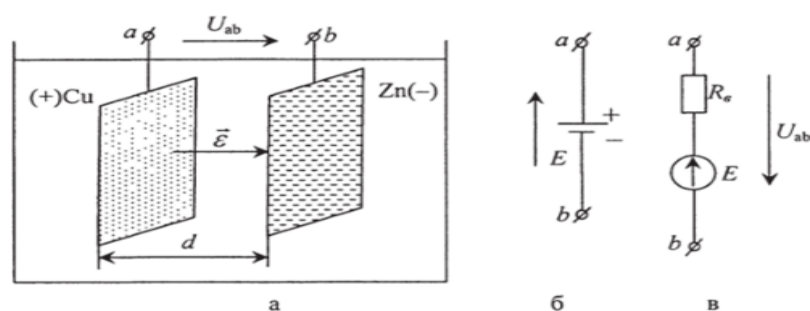


Рис. 17. Гальванический элемент (а), его электрическая схема (б) и схема замещения (в) (пояснения в тексте)

Схема замещения электрической цепи - это математическая модель реального устройства, учитывающая происходящие в нем физические процессы. Математическая модель строится из идеальных элементов, соединенных таким образом, что уравнения схемы замещения соответствуют математическому описанию реальных элементов. Схемы замещения отображают свойства электрической цепи при определенных условиях.

Одной и той же физической электрической цепи для разных условий могут соответствовать несколько различных схем замещения. В схемах замещения электрических цепей используют универсальные обозначения источников и приемников электрической энергии независимо от вида энергии, преобразуемой в электрическую (в источниках), и от вида энергии получаемой из электрической энергии (в приемниках). Следовательно, вместо многочисленных условных графических обозначений источников и приемников электрической энергии в схемах замещения применяют единые обозначения источников ЭДС и резистивных элементов (рис. 17, в).

Рассмотрим процессы в простейшей электрической цепи, состоящей из источника электрической энергии, подключенного к резистору. Заменяем источник электрической энергии схемой замещения (рис. 17, в), а резистор - резистивным элементом с постоянным сопротивлением R_B . Схема замещения рассматриваемой электрической цепи представлена на рис. 18, а, где буквами a и b обозначены выводы источника электрической энергии.

Свойства источника электрической энергии как элемента схемы замещения характеризуются *внешней характеристикой* - зависимостью напряжения между его выводами от тока I источника ($U_{ab} = J(I)$).

Если ЭДС и внутреннее сопротивление источника электрической энергии являются постоянными величинами (линейный источник), то его внешняя характеристика определяется выражением

$$U_{ab} = E_A - E_B = \varepsilon - R_B \times I, \quad (1)$$

которому соответствует прямая 1 на рис. 19, а, где E_A и E_B - потенциалы электрического поля в сечениях a и b $E = \varepsilon_0 d - \text{ЭДС}$; ε_0 - напряженность, при которой накопление зарядов на пластинах прекращается.

Уменьшение напряжения между выводами a и b источника электрической энергии (рис. 18, а) при увеличении тока объясняется увеличением падения напряжения на внутреннем сопротивлении R_B источника (увеличением напряжения на резистивном элементе с сопротивлением R_B).

Во многих случаях внутреннее сопротивление R_B источника электрической энергии мало по сравнению с сопротивлением R_H и справедливо неравенство $R_H I < E$. В этих случаях напряжение между выводами источника электрической энергии практически не зависит от тока и является постоянным ($U_{ab} \sim E = \text{const}$).



Рис. 18. Схема замещения источников электрической энергии: а - источник ЭДС; б - источник тока (пояснения в тексте)

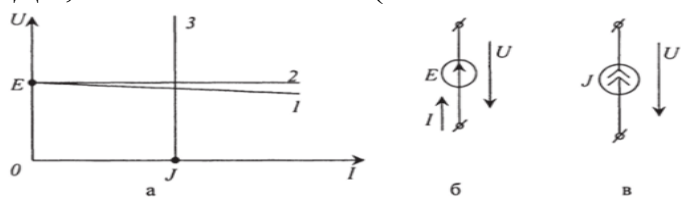


Рис. 19. Зависимость напряжения от тока (пояснения в тексте)

Источник электрической энергии с малым внутренним сопротивлением можно заменить идеализированной моделью, для которой $r = 0$. Такой идеализированный источник электрической энергии называется *идеальным источником ЭДС* с одним параметром E . Напряжение между выводами идеального источника ЭДС не зависит от тока. Внешняя характеристика идеального источника ЭДС определяется выражением:

$$U_{ab} = E_a - E_b = E = \text{const},$$

которому соответствует прямая 2 на рис. 19, а.

На рис. 19, б изображен идеальный источник ЭДС электрических цепей.

В цепях с полупроводниковыми приборами, внутреннее сопротивление R_g источника электрической энергии во много раз больше сопротивления нагрузки R_n (внешней по отношению к источнику части цепи). При выполнении условия $R_g \gg R_n$ в таких цепях ток источника электрической энергии

$$I = \frac{E}{R_g + R_n} = \frac{E}{R_g} = I_K = J,$$

т.е. равен току I_K короткого замыкания источника. Источник электрической энергии с большим внутренним сопротивлением можно заменить идеализированной моделью, у которой $R_g \rightarrow \infty$ и $U \rightarrow \infty$ и для которой справедливо равенство $E/R_g = J$. Такой идеализированный источник электрической энергии называется *идеальным источником тока* с одним параметром $J = I_K$. Ток источника тока не зависит от сопротивления R_n внешней цепи. При изменении сопротивления внешней цепи изменяется напряжение между выводами источника $U_{ab} = R_n J$.

На рис. 19, а построена прямая 3 - внешняя характеристика идеального источника тока. На рис. 19, в представлено изображение идеального источника тока на схемах электрических цепей.

От схемы замещения реального источника энергии, представленной в виде последовательного соединения источника ЭДС (E) и резистивного элемента с сопротивлением E_g (рис. 18, а), можно перейти к схеме замещения с идеальным источником тока. Для этого разделим все слагаемые выражения (1) на внутреннее сопротивление источника энергии и получим:

$$\frac{U_{ab}}{R_B} = \frac{E}{R_B} - I, \quad \text{или} \quad \frac{E}{R_B} = J = \frac{U_{ab}}{R_B} + I = I_B + I. \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует что, ток источника тока J складывается из тока I в резистивном элементе R_n (во внешнем участке цепи) и тока I_B в резистивном элементе с сопротивлением, включенном между выводами a и b источника энергии. Соответствующая эквивалентная схема замещения электрической цепи показана на рис. 18, б.

Представление реальных источников электрической энергии в виде двух схем замещения (рис. 18, а, б) является эквивалентным представлением относительно внешнего участка цепи: в обоих случаях одинаковы напряжения между выводами источника и токи во внешнем участке цепи.

Однако энергетические соотношения в двух схемах замещения реальных источников энергии не одинаковы. Не равны между собой мощности, развиваемые источником ЭДС (рис. 18, а) - E и источником тока (рис. 18, б) - J , а также мощности потерь, определяемые по закону Джоуля-Ленца:

$$R_B I^2 \neq R_B J^2.$$

3. ХАРАКТЕРНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Одним из основных направлений в диагностике электрооборудования является диагностика силовых трансформаторов. Вызвано это обстоятельство высокой стоимостью трансформатора, его значимостью в вопросах надежности электроснабжения потребителей, сложностью определения повреждений и дефектов на ранней стадии развития. Диагностика силовых трансформаторов является сложным многогранным процессом. По опыту многолетней эксплуатации трансформаторов установлены типичные виды повреждений, их признаки, возможные причины и способы выявления.

Магнитопровод. При наличии дефекта в межлистовой изоляции возможны перегревы, вызываемые вихревыми токами или токами в короткозамкнутых контурах, образованных в результате нарушения изоляции массивных деталей остова от активной стали. В случае конденсации влаги на поверхности масла она попадает на верхнее ярмо, проникает между пластинами активной стали в виде водомасляной эмульсии, разрушает межлистовую изоляцию и вызывает коррозию стали. По этим причинам ухудшается состояние масла (понижается температура вспышки, повышается кислотность) и увеличиваются потери холостого хода.

Обмотки. Наиболее характерным видом повреждений в обмотках является витковое замыкание. Причиной его может быть разрушение изоляции из-за старения вследствие ее естественного износа или из-за продолжительных перегрузок трансформатора при недостаточном охлаждении обмоток. Нарушение изоляции витков может произойти также вследствие механических повреждений при коротких замыканиях. Признаками витковых замыканий являются срабатывание газовой защиты, повышенный нагрев, различие в сопротивлениях фаз постоянному току и т. д.

На трансформаторах мощностью от 1000 кВ·А устанавливается газовое реле, срабатывание которого происходит в результате выделения внутри трансформатора газов из-за разложения масла, вызванного указанными повреждениями. О причинах срабатывания газовой защиты и о характере повреждения можно судить по результатам химического анализа скопившегося в реле газа, который позволяет выявить повреждения на ранней стадии их возникновения и в ряде случаев оперативно устранить их.

Применяемые на практике методы контроля интегрального состояния изоляции трансформаторов (сопротивление изоляции, коэффициент абсорбции, $\tan \delta$, C_2/C_{50} и др.) не позволяют обнаружить частичные повреждения изоляции в начальной стадии их развития и указать характер и степень имеющегося повреждения. Одним из наиболее перспективных направлений в исследовании повреждений работающих трансформаторов является периодический анализ содержания растворенных в масле газов, определяемых хроматографическим методом.

3.1. Хроматографический метод диагностики силовых трансформаторов

При действии аномальных нагрузок термического и электрического характера в изоляции трансформаторов возникают и развиваются повреждения в виде локальных перегревов и частичных разрядов, переходящих в дуговой раз-

ряд. Выделяющаяся при этом энергия вызывает разрушение изоляционной жидкости с образованием продуктов, называемых дефектными газами. Анализ трансформаторного масла на наличие дефектных газов и определение их концентрации позволяет обслуживающему персоналу своевременно распознать развивающийся дефект до того как он, прогрессируя, приведет к аварийному отключению оборудования, что всегда связано с экономическими потерями.

Процессы термического разложения изоляции и ее разрушения электрическими разрядами приводят к выделению газов, растворяющихся в масле. Каждому виду дефекта соответствует характерный набор газов. В таблице 1 приведен состав газов, растворенных в масле, характерный для различных дефектов трансформаторов.

Таблица 1

Состав газов, характерный для различных дефектов

Газ	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆
Электрические разряды:							
дуговые.....	<i>а</i>	<i>б</i>	<i>г</i>	<i>б</i>	<i>а</i>	<i>г</i>	<i>в</i>
искровые	<i>а</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>в</i>	<i>а</i>	-	<i>г</i>
частичные	<i>а</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>г</i>	<i>в (д)</i>	-	-
Местный нагрев:							
до 300 °С	<i>г</i>	<i>в</i>	<i>а</i>	<i>в</i>	-	<i>б</i>	<i>г</i>
св. 300 °С до							
1000 °С	<i>г</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>а</i>	<i>г</i>	<i>г</i>	<i>б</i>
св. 1000 °С.....	<i>в</i>	<i>б</i>	<i>г</i>	<i>а</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>в</i>

Обозначения: *а* – основной газ для данного дефекта; *б, в* – характерный газ соответственно при высоком содержании или малом содержании; *г* – нехарактерный газ; *д* – газ при высокой плотности, выделяемой энергией.

Кроме указанных газов в масле может содержаться кислород (воздух), наличие которого свидетельствует о нарушении герметичности трансформаторов. Растворенная вода, особенно в комбинации с полярными продуктами старения масла и кислотами, существенно влияет на диэлектрические характеристики жидких и твердых изоляционных материалов. Непрерывный контроль влагосодержания масла на протяжении длительного периода времени и принятие соответствующих мер при внезапном росте или недопустимо высоком влагосодержании поможет продлить жизнь маслonaполненного оборудования, сохранить его высокие технические характеристики и эксплуатационную надежность.

В настоящее время выпускается большой спектр хроматографических установок, позволяющих проводить анализ содержания воды и растворенных газов. Основной недостаток большинства из этих установок — невозможность получать информацию в режиме «on-line» — в режиме реального времени, поскольку между отбором пробы масла и получением результатов анализа проходит довольно длительное время.

Отечественные установки, содержащие хроматограф, пробоотборники, программное обеспечение результатов анализа и различное вспомогательное оборудование, разработаны во ВНИИЭ (НПФ «Электра»). Эти установки позволяют обнаруживать вредные компоненты при следующей нижней концентрации: вода — 2,0 г/т, воздух — 0,03 %, водород — 0,0005 %, метан, этан, этилен — 0,0001 %, ацетилен — 0,00005 %, оксид и диоксид углерода — 0,002 %.

Принцип действия существующих установок непрерывной диагностики основан на измерении объема всех растворенных в масле газов или на определении его объемного сопротивления.

За рубежом получили распространение установки непрерывного действия HYDRAN фирмы «Syprotec Corp» (США) различных модификаций, которые также подключаются непосредственно к трансформатору. Они измеряют суммарную концентрацию горючих газов и пересчитывают ее в водородный эквивалент. Математическое обеспечение установок позволяет анализировать поступающие данные и прогнозировать развитие дефектов, которые могут привести к аварии трансформатора.

Для контроля состояния герметичных трансформаторов и вводов, в ВЭИ были разработаны микропроцессорные датчики давления и температуры, устанавливаемые с помощью штуцеров непосредственно на баке или вводах. Они измеряют температуру и давление масла в месте установки и соединяются с системой диагностики. Снижение давления ниже нормы свидетельствует о наличии течи масла, а повышение давления и (или) температуры — о внутреннем повреждении в трансформаторе или вводах. Скорость изменения контролируемых параметров свидетельствует о степени серьезности повреждения. На рис. 20 приведена хроматограмма анализа контрольной смеси газов — аналога состава выделяющихся из трансформаторного масла газов.

Регулярный контроль газов на месте установки трансформатора можно осуществлять с помощью прибора TFGA-P200 (рис. 21, а), применение которого позволяет снизить эксплуатационные расходы и уменьшить количество анализов в лаборатории.

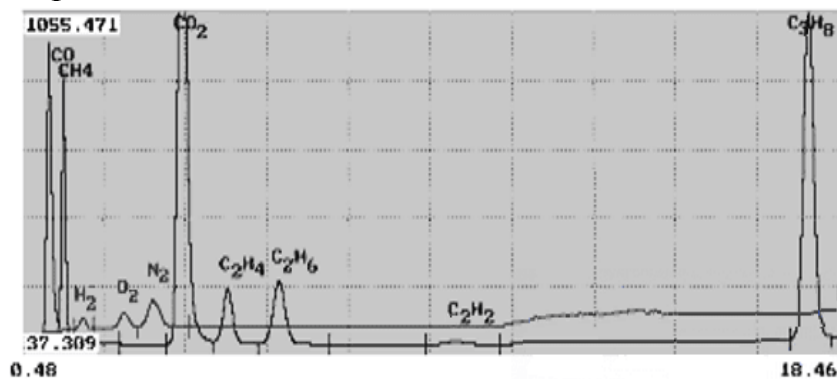


Рис. 20. Хроматограмма анализа контрольной смеси газов

Прибор TFGA-P200 — это высокоскоростной газовый микрохроматограф, оптимизированный для измерения семи наиболее важных дефектных газов: водорода, метана, оксида углерода, диоксида углерода, этилена, этана и ацетилена. Особенности прибора являются: собственный внутренний источник газа носителя (гелий), а также внутренние заряжаемые батареи, что обеспечивает автономную работу в течение не менее 15 часов. Применение в составе прибора специальных шприцев для экстракции газов позволяет выполнить анализ пробы масла в полевых условиях в течение нескольких минут. Продолжительность измерения концентрации всех семи газов в отдельности с момента введения пробы в анализатор составляет менее 120 секунд. Проба газа, отобранная из газового реле или из специального зонда, экстрагирующего газ из масла, может быть проанализирована за несколько минут.



Рис. 21. Приборы измерения: а - прибор TFGA-P200; б - прибор КАЛИСТО

Микропроцессорный электронный прибор КАЛИСТО (рис. 21, б) фирмы Morgan Schaffer осуществляет непрерывный контроль растворенного водорода и воды в масле работающего трансформатора. Прибор предназначен для раннего обнаружения развивающихся повреждений трансформатора и обоснованного планирования мероприятий по обслуживанию оборудования на базе данных контроля.

КАЛИСТО позволяет измерять от 0 до 50000 *ppm* растворенного водорода в масле и от 0 до 100 % относительной влажности растворенной воды. Результат измерения может быть представлен в % относительной влажности приведенной к 25 °C, в *ppm* абсолютной влажности, в % относительной влажности при реальной температуре трансформатора. Погрешность измерения составляет 0,5 % от концентрации CO и 0,1 % от концентрации всех остальных газов. Чувствительность составляет 5 *ppm* в масле по водороду, 2 *ppm* в масле по воде. Измерительная схема построена на основе детектора по теплопроводности и масло заполненного емкостного сенсора относительной влажности. Прибор имеет размер памяти: 1500 записей. Для передача информации используется порт RS-232 и программное обеспечение в формате Windows.

В ВЭИ создана установка для непрерывного контроля изоляционных свойств масла путем измерения его объемного сопротивления ρ_v . Испытательная ячейка подключается к заземленному маслопроводу трансформатора и периодически передает данные о величине ρ_v в систему контроля параметров. По величине ρ_v , на которую влияют продукты старения масла, можно судить о величине его $tg \delta$. В совокупности с другими датчиками, эта установка может входить в состав диагностической системы трансформатора.

Передача информации в ПК. Оценка состояния силовых трансформаторов на основе тепловизионного анализа достаточно оправдана, однако, как отмечалось выше, желательнее ее проводить в сочетании с другими методами диагностики трансформаторов. Поэтому все последующие этапы диагностирования силовых трансформаторов необходимо осуществлять с помощью специальных программных комплексов.

Полученные на предыдущем этапе термограммы записываются непосредственно в тепловизоре на магнитный диск. С помощью специальной программы осуществляется чтение данных из внутреннего формата тепловизора, преобразование и сохранение их в среде Windows. Это дает возможность стандартными средствами передавать результаты тепловизионного контроля в персональный

компьютер для обработки их программным комплексом оценки технического состояния трансформатора.

Предварительная обработка результатов. На этом этапе имеется возможность визуального анализа термограмм каждого вида. При этом цветовая палитра автоматически обрабатывается с выводом на экран компьютера максимальной и минимальной температур для всего изображения или отдельного его фрагмента в режиме увеличения (рис. 22).

Результатом данного этапа является автоматическое нахождение для каждого выделенного оператором элемента активной части силовых трансформаторов наиболее нагретой точки. Обычно в качестве элементов выделяют: верхнее ярмо, нижнее ярмо, обмотки фаз А, В и С. Более удобной для предварительного анализа является формируемая таблица, содержащая диспетчерский номер трансформатора, его тип, дату обследования, названия элементов и их максимальные температуры на каждом виде.

Анализу не подлежат все участки активной части, закрываемые навесным оборудованием. На термограммах эти области автоматически зачерняются.

Основной принцип диагностики данного этапа – сравнительный анализ аномально нагретой области с аналогичной поверхностью, имеющей нормальный нагрев.

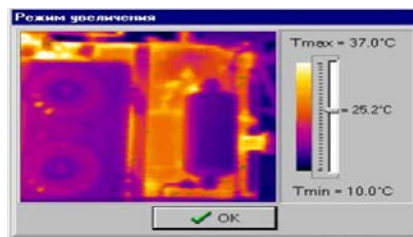


Рис. 22. Визуальный анализ полученных термограмм

Контроль системы охлаждения силовых трансформаторов. Система охлаждения трансформатора является важным функциональным узлом, значительно влияющим на работу всего трансформатора. В настоящее время выработаны два подхода, позволяющие оценить работу системы охлаждения, которые применимы к системам охлаждения любых видов и доказали свою эффективность на практике:

1 — оценка средней температуры однотипного оборудования, работающего при одной нагрузке, в одинаковых условиях окружающей среды. Опыт показывает, что разница средних по баку температур более чем на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ между одинаковыми трансформаторами, которые работают при одной нагрузке и в одинаковых условиях, может быть признаком нарушения нормальной работы системы охлаждения.

2 — Контроль температуры патрубков входа и выхода масла из системы охлаждения, и сравнение с данными типовых заводских испытаний. Анализ результатов типовых тепловых испытаний и многочисленный опыт тепловизионных обследований позволяет установить среднюю разницу температур входа-выхода масла, характерную для каждого вида системы охлаждения. Отклонение от этого значения более чем на $1 - 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ уже служит признаком неисправной работы охладителя.

Диагностика измерительных трансформаторов. При тепловизионном контроле трансформаторов напряжения и трансформаторов тока измеряются температуры нагрева поверхности фарфоровых покрышек в одинаковых зонах трех фаз. Значения температуры не должны отличаться между собой более чем на 0,3 °С.

Для трансформаторов тока (конденсаторов связи) можно использовать метод косвенного измерения тангенса угла диэлектрических потерь изоляции. Для них уравнение теплового баланса однозначно связывает величину диэлектрических потерь и превышение температуры изоляционной поверхности над температурой окружающей среды. Уравнение для расчета тангенса угла диэлектрических потерь исследуемого оборудования записывается в виде:

$$\operatorname{tg} \delta x = \operatorname{tg} \delta z (T_x - T_0) / (T_z - T_0), \quad (3)$$

где $\operatorname{tg} \delta x$ — искомые диэлектрические потери обследуемого ТТ, находящегося под напряжением;

$\operatorname{tg} \delta z$ — известные диэлектрические потери ТТ того же типа, находящегося в резерве;

T_0 — температура окружающей среды;

T_z — температура поверхности резервного ТТ, измеренная тепловизором;

T_x — температура поверхности обследуемого ТТ, измеренная тепловизором.

Трансформаторы напряжения

Дефекты трансформаторов напряжения, выявляемые тепловизионным методом:

- витковые замыкания в обмотках;
- повышенные потери в стали магнитопроводов;
- ухудшение изоляционных характеристик масла.

При анализе результатов съемки и принятии решения необходимо учитывать год изготовления ТН и пофазно нагрузку во вторичных цепях. Трансформаторы напряжения (серии НКФ) работают в режиме насыщения, поэтому при съемке наблюдается нагрев фарфоровой покрышки по всей высоте. У двухкаскадных ТН при отсутствии дефекта, в большинстве случаев, более нагретым является нижний элемент, что связано с нагрузкой во вторичных цепях. Кроме того, трансформаторы напряжения, установленные на фазе "В", могут быть более нагреты по сравнению с ТН соседних фаз в связи с тем, что именно она, как правило, является более нагруженной. Если "горячее" ТН фаз "А" или "С", то надо уже задуматься о возможном наличии дефекта. Для этого надо проверить комплектацию фаз, сравнить год их выпуска с соседними ТН, проверить величину нагрузки во вторичных цепях. Если это не позволило выявить причину нагрева, то необходимо провести дополнительные испытания:

- хроматографический анализ масла;
- проверка коэффициента трансформации;
- измерение потерь или тока Х.Х.

Превышение температуры нагрева между ТН пофазно более чем на 0,3 градуса не может служить основанием для его браковки. На рис. 23, а представлена термограмма трансформатора напряжения, фарфоровая покрышка которого перегревалась на 0,53 °С. После традиционных испытаний и хроматографического анализа трансформаторного масла было установлено, что в нем

шел необратимый процесс разложения бумажно-масляной изоляции обмоток и он подлежал демонтажу и замене.

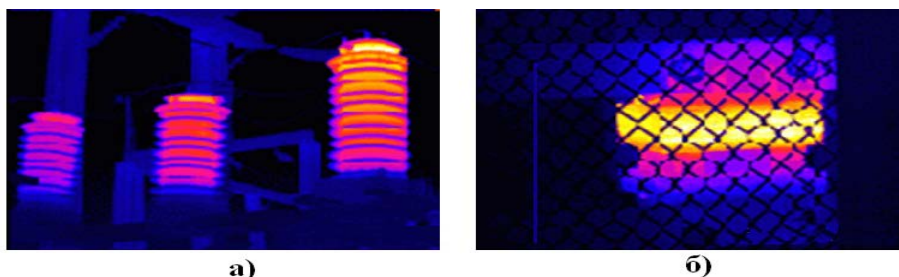


Рис. 23. Процессы нагрева: а - повышенный нагрев под крышкой правого ТН ТФЗМ–110; б - нагрев магнитопровода ТТ-10 кВ в ячейке

Трансформаторы тока. Трансформаторы тока, выпускаемые промышленностью, по конструкции внутренней изоляции можно разделить на три группы:

- трансформаторы тока со звеньевой изоляцией обмоток (серия ТФЗМ);
- трансформаторы тока с U-образной первичной обмоткой (серия ТФУМ, ТФКН);
- трансформаторы тока с рымовидной обмоткой (серия ТФРМ).

Трансформаторы серии ТФЗМ (на классы напряжений 35 - 220 и 500 кВ) могут иметь внутренние устройства переключения коэффициента трансформации. В эксплуатации имеют место случаи ухудшения состояния внутренних переключающих устройств. Это, как правило, связано с ослаблением болтовых соединений и повышением переходного сопротивления. Выявление дефектов изоляции при контроле ТТ-35 кВ и выше основано на наличии связи между степенью развития дефекта (увеличения диэлектрических потерь) и нагревом поверхности аппарата (рис. 23, б).

Контролируемым параметром является величина tg угла диэлектрических потерь изоляции. Применение тепловизора позволяет измерить эту величину косвенным способом. При проведении тепловизионного обследования ТТ, так же оценивается состояние внешних и внутренних контактных соединений (например, переключающего устройства, расположенного под крышкой ТТ, нагрев которого связан, как правило, с ослаблением болтовых соединений).

Причины повышенного нагрева:

- увеличение $tg\delta$ бумажно-масляной изоляции;
- увеличение $tg\delta$ изоляционного масла;
- снижение пробивного напряжения масла;
- ослабление болтовых соединений переключающего устройства;
- остаточное намагничивание магнитопровода ТТ при прохождении по нему тока КЗ.

Программное обеспечение тепловизионной диагностики трансформаторов. В процессе тепловизионной диагностики трансформаторов широко используется программное обеспечение. Программное обеспечение позволяет в оперативном режиме отслеживать техническое состояние всего парка эксплуатируемых предприятием трансформаторов, систематизировать оборудование по его техническому состоянию:

- нормально работающее;
- контрольная группа;
- забракованное;

- более 25 лет эксплуатации.

Программное обеспечение также позволяет:

- автоматизированным путем создавать базу данных о техническом состоянии оборудования;
- автоматизированным путем обработать результаты измерения, сравнить с нормативными значениями;
- оценить состояние оборудования по измеренным параметрам;
- создать автоматизированную базу данных нормативно-технических документов по вопросам диагностики.

Программное обеспечение дает возможность эксплуатационному персоналу провести диагностику каждой единицы оборудования:

- выявить начало возникновения повреждения;
- показать динамику развития процесса;
- комплексно рассмотреть результаты всех измерений с учетом влияния внешних факторов;
- определить характер возможного дефекта;
- прогнозировать возможное развитие событий;
- выработать рекомендации по дальнейшей работе с этим оборудованием.

3.2. Контроль изоляции трансформаторов, вводов и измерительных трансформаторов при рабочем напряжении по характеристикам частичных разрядов

Измерение частичных разрядов (ЧР) используется для контроля состояния высоковольтной изоляции трансформаторов, вводов, ТН и ТТ при рабочем напряжении в реальных эксплуатационных условиях подстанции. Системы диагностики на основании измерения ЧР позволяют обнаруживать дефекты изоляции на самой ранней стадии их развития, определять тип, место расположения дефекта и степень его опасности. Рассмотрим систему диагностики высоковольтной изоляции на примере системы СКИ-2 — компьютерной системы сбора и обработки информации, поступающей от электрических, акустических и электромагнитных датчиков ЧР, размещенных на контролируемом объекте. Длина соединительных кабелей (датчик - компьютер) — до 100 м. В минимальном комплекте поставки количество подключаемых датчиков электрического и электромагнитного каналов — до 12 (параллельная регистрация), акустических датчиков — до 7 (мультиплексор). Система работает в реальном масштабе времени и обеспечивает оперативный вывод получаемой информации на экран компьютера, накопление информации и запись ее на жесткие диски. Она может подключаться к компьютерной сети. Система обеспечивает периодический контроль или непрерывный мониторинг (для ответственных или предаварийных объектов) оборудования. Наличие трех каналов регистрации сигналов ЧР (электрического, электромагнитного и акустического) обеспечивает надежное обнаружение дефектов изоляции независимо от их локализации и типа.

Датчики электрических сигналов ЧР — это высокочастотные трансформаторы тока, надеваемые на провода заземления контролируемых объектов (заземление ПИНов вводов, баков, экранов и т.д.). Они имеют расширенный диапазон частот: 1 – 50 МГц и сменный помехозащитный фильтр. Высокая чувствительность этих датчиков позволяет работать с емкостью связи от нескольких пикофарад. При этом минимальный регистрируемый заряд ЧР — менее 1 пКл. Датчики электрических сигналов ЧР имеют дополнительный вход для подклю-

чения датчиков электромагнитных сигналов ЧР любого диапазона частот вплоть до СВЧ (несколько $ГГц$). Наличие трансформатора тока на входе датчика обеспечивает возможность одновременно с электрическими датчиками подключать любые контрольные приборы и датчики других измерительных схем и, параллельно с регистрацией ЧР, проводить измерения tga диэлектрических потерь и токов комплексной проводимости изоляции объекта под рабочим напряжением. Пьезоэлектрические акустические датчики П-113 с полосой частот 20 – 200 $кГц$ имеют основные резонансные частоты 110 и 200 $кГц$. Можно использовать акустические датчики практически любых типов в диапазоне частот 10 – 300 $кГц$. Электромагнитные датчики — это отдельные блоки, подключаемые к дополнительному входу датчиков электрических сигналов ЧР. Входной частотный диапазон определяется типом блока (от 400 до 2200 $МГц$), выходная полоса частот — до 50 $МГц$. При работе с узконаправленными антеннами (СВЧ зонд) эти датчики позволяют проводить дистанционный контроль высоковольтных вводов, изоляторов и т.д. В состав системы входят калибровочные генераторы электрического и акустического сигналов, обеспечивающие контроль работоспособности и градуировку датчиков.

В отличие от стандартных измерителей сигналов ЧР, работающих с одинокими выборками, СКИ-2 обеспечивает статистическое накопление данных в течение заданного интервала времени синхронно с сетевым напряжением. Система способна работать в режиме непрерывного, полностью автоматического мониторинга с периодической записью получаемой информации на диск или передачей ее в линию связи.

В качестве примера стационарного промышленного прибора диагностики изоляции трансформаторов на основе измерения уровня частичных разрядов рассмотрим **многоканальный синхронный регистратор-анализатор R2000/N** (рис. 24, а). Прибор R2000/N в максимальной степени предназначен для эффективного использования в условиях эксплуатации. Эти особенности прибора позволяют эффективно отстраиваться от помех, которые всегда присутствуют в высоковольтном оборудовании (корона, синхронные помехи, наводки ЧР с фазы на фазу и т.д.). Достоинствами прибора R2000/N являются возможность одновременного использования высокочастотных (сотни мегагерц) и низкочастотных (сотни килогерц) датчиков ЧР, использование синхронной регистрации по всем каналам, применение методов цифровой фильтрации и разделения импульсов, "разборка импульсов" на основании физических признаков ЧР и матриц взаимного влияния сигналов между различными фазами и элементами контролируемого оборудования. Прибор имеет 4 (8) входных каналов регистрации. Частота опроса каждого канала при регистрации сигналов составляет 100 $МГц$.



Рис. 24. Приборы контроля: а - синхронный регистратор-анализатор частичных разрядов R2000/N; б - прибор Ганимед

Прибор контроля состояния контактов и соединений РПН масляных трансформаторов Ганимед (рис. 24, б). Прибор предназначен для проведения диагностики технического состояния и настройки устройств регулирования напряжения трансформаторов (РПН), позволяет проводить регистрацию и анализ стандартных характеристик РПН, указываемых в нормативных документах. К таким характеристикам относятся временная диаграмма работы контактора и круговая диаграмма работы избирателя РПН. Дополнительно, прибор позволяет при помощи встроенного миллиомметра измерять и анализировать переходное сопротивление контактов, а также анализировать состояние механического привода РПН на основе анализа графика потребляемой электродвигателем мощности, зарегистрированной за один цикл коммутации.

Для удобства пользователей в приборе Ганимед реализована возможность практического применения новых методов контроля состояния РПН, разработанных различными фирмами в последние годы. Одним из таких методов является анализ вибрационных колебаний корпуса РПН в процессе одной коммутации, позволяющий оценивать динамические процессы в конструкции. Общий диагноз состояния РПН хорошо дополняет анализ частичных разрядов, зарегистрированных при помощи акустического датчика, устанавливаемого на корпусе при помощи магнита. Сравнение интенсивности разрядов в разных положениях РПН позволяет выявить дефекты изоляции и контактных элементов.

3.3. Диагностика опрессовки активных элементов и механических деформаций обмоток трансформаторов

Вибрационный метод оценки состояния опрессовки активных элементов трансформаторов. Методы ранней диагностики состояния высоковольтных масляных трансформаторов в рабочих режимах оценкой состояния опрессовки активных элементов «безразборным» способом позволяют повысить надежность эксплуатации и снизить затраты на проведение ремонтных работ. Реальное техническое состояние опрессовки обмотки и магнитопровода может быть определено по замерам вибрации в определенных точках на наружной поверхности масляного бака трансформатора.

Техническое состояние опрессовки обмотки и магнитопровода определяется по замерам вибрации в 12 точках на баке трансформатора. Программа достаточно корректно моделирует физические процессы в трехфазном трансформаторе, учитывает влияние насыщения активной стали на распределение гармоник тока и магнитного потока при изменении нагрузки. Программа содержит математические модели распределения вибраций в «распрессованной» обмотке и «ослабленной» стали магнитопровода. Обработка результатов измерений и математическое моделирование позволяют сделать заключение о состоянии активных материалов трансформатора.

В процессе диагностирования масляного трансформатора с помощью экспертной системы «Веста» выполняется один замер на холостом ходу, другой в режиме, близком к режиму полной нагрузки, не менее 50 – 80 % от номинала, чем ближе к 100 %, тем выше достоверность. Замеры выполняют переносным спектроанализатором “Корсар +”, который входит в состав экспертной системы. Результаты измерений «сбрасываются» по кабелю в компьютер, где обрабатываются и хранятся в памяти.

На основе анализа спектров вибросигналов, учета мощности целых и дробных гармоник в диапазоне от 10 до 1000 Гц, программа в автоматическом режиме позволяет:

- контролировать качество опрессовки обмоток по всем фазам трансформатора со сторон ВН и НН, обнаруживать «дефектную фазу» и даже место с ослаблением опрессовки обмоток, определить относительную степень ослабления;
- определять состояние прессовки сердечника трансформатора, на ранней стадии выявлять места в сердечнике, «склонные» к ослаблению прессовки пакета, в которых в дальнейшем может возникнуть «пожар стали»;
- выявлять общее состояние элементов конструкции трансформатора контролируя магнитный поток по путям рассеяния обмоток;
- своевременно выявлять все тенденции ухудшения любого из параметров, выбирать из всего эксплуатируемого на предприятии оборудования то, состояние которого нестабильно и ухудшается.

Все контролируемые параметры приводятся в диагнозах в виде обобщенных расчетных «коэффициентов состояния». Это позволяет применять данную методику без корректировки практически для всех типов применяемых трансформаторов.

Если значение какого-либо коэффициента (коэффициент общего состояния трансформатора, коэффициенты прессовки обмотки, опрессовки активной стали, крепления элементов конструкции) не меньше, чем 0,9, то это зона хорошего состояния. Если он меньше 0,9, но больше, чем 0,8, то данный параметр соответствует критериям удовлетворительного состояния. Если его значение ниже этого предела – это зона аварийного состояния. Необходимо срочно принимать меры по улучшению состояния трансформатора.

Диагноз по состоянию элементов трансформатора представляется программой в двух модификациях — в графическом виде и в виде справки. Графический диагноз может быть просмотрен на экране для одной фазы, для меди или активной стали. Программа рассчитывает комплексный коэффициент качества эксплуатации каждого трансформатора, учитывающий особенности его эксплуатации. На основании анализа трех и более замеров вибрации, выполненных на трансформаторе, по изменению «коэффициента состояния» программа дает рекомендации по рациональным срокам и объемам проведения ремонтных работ активных элементов трансформатора.

3.4. Диагностика механических деформаций обмоток трансформаторов методом низковольтных импульсов

Недостаточная электродинамическая стойкость обмоток трансформатора при протекании токов короткого замыкания, приводящая к механическим деформациям обмоток, является одной из основных причин аварийного выхода трансформатора из строя. Продление жизни трансформатора в значительной степени зависит от стабильности механических характеристик его обмоток. Однако даже в правильно спроектированном трансформаторе заложены предпосылки его будущих проблем применительно к электродинамической стойкости при КЗ. Причиной этих предпосылок является технология изготовления обмоток, из-за чего обмотки нового трансформатора с самого начала имеют некоторые дефекты плотности намотки. Обмотки трансформаторов стараются делать магнито симметричными, что позволяет минимизировать электродинамические силы, действующие в обмотках и на опоры: прессующие кольца, ярмо-

вые балки. В новом трансформаторе эта несимметрия невелика и не представляет опасности для трансформатора. Однако, чем старше трансформатор, тем больше электродинамических воздействий при КЗ, толчках нагрузки он получает, тем больше меняются физико-химические свойства изоляции, тем больше меняются ее механические свойства. В результате этих воздействий происходит снижение запрессовки обмоток, увеличение начальной магнитной несимметрии, которая всегда стремится в сторону увеличения. При снижении усилия запрессовки обмоток, при увеличении их магнитной несимметрии растут электродинамические силы, что приводит к еще большему снижению запрессовки и увеличению несимметрии. И так до тех пор, пока электродинамические силы не возрастут настолько, что разрушат трансформатор.

В настоящее время для диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов наиболее широко применяются два метода: метод измерения сопротивления короткого замыкания и более чувствительный метод — метод низковольтных импульсов (НВИ) или близкий к нему по сути метод частотного анализа. Суть метода НВИ В настоящее время для диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов наиболее широко применяются два метода: метод измерения сопротивления короткого замыкания и более чувствительный метод — метод низковольтных импульсов (НВИ) или близкий к нему по сути метод частотного анализа. Суть метода НВИ состоит в том, что от специального генератора на обмотки (или в нейтраль) расширенного трансформатора подается прямоугольный зондирующий импульс низкого напряжения (100 – 500 В) и одновременно осциллографируются реакции обмоток на воздействие этого импульса - напряжения на измерительных сопротивлениях, подключенных к другим обмоткам. Сначала при первичном дефектографировании на трансформаторе снимаются нормограммы, которые в дальнейшем будут сравниваться с дефектограммами - осциллограммами, полученными при последующих измерениях. Сравнение по определенной методике нормограмм и дефектограмм позволяет оценить состояние обмоток трансформатора. Если диагностика для данного трансформатора проводится впервые, то оценка состояния обмоток производится сравнением осциллограмм разных фаз. Более высокая чувствительность метода низковольтных импульсов по сравнению с другими обусловлена тем, что даже относительно небольшие смещения элементов обмоток (витков, катушек) приводят к значительным локальным изменениям соответствующих емкостей. Изменение емкости приводит к изменению собственной частоты колебаний соответствующего контура, что и проявляется в осциллограмме. В этом преимущество метода НВИ перед методом измерения комплексного сопротивления обмотки Z_k , который обладает высокой чувствительностью, в основном, только к тем деформациям, которые приводят к изменению главного канала рассеяния трансформатора.

Установка включает в себя:

- портативный персональный компьютер с программным обеспечением для проведения диагностики;
- платы аналого-цифрового преобразователя и устройства связи с объектом, устанавливаемые в компьютер;
- генератор прямоугольных импульсов, предназначенный для формирования зондирующих импульсов с амплитудой до 500 В, длительностью 1 мкс, фронтом и спадом 50 нс.

Программное обеспечение включает в себя:

— программу сбора данных — тестирование измерительной схемы, управление процедурой сбора, фильтрация от помех, запись в базу данных;
— программу обработки и анализа результатов диагностики — сравнение нормограммы и дефектограммы и их спектров, статистическая обработка, анализ и оценка результатов диагностики.

Время проведения диагностики одного трансформатора — около 1 часа.

4. ВЫПРЯМИТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ

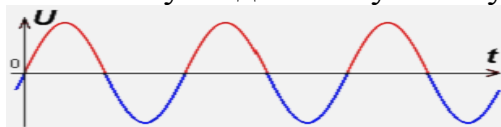
Выпрямители используются в блоках питания радиоэлектронных устройств и компьютеров для преобразования переменного напряжения в постоянное. Выпрямитель *электрического* тока — электронная схема, предназначенная для преобразования переменного электрического тока в постоянный (однополярный) электрический ток. Схема любого выпрямителя содержит 3 основных элемента:

— силовой трансформатор — устройство для понижения или повышения напряжения питающей сети и гальванической развязки сети с аппаратурой;
— выпрямительный элемент (вентиль), имеющий одностороннюю проводимость — для преобразования переменного напряжения в пульсирующее;
— фильтр — для сглаживания пульсирующего напряжения.

В полупроводниковой аппаратуре выпрямители исполняются на полупроводниковых диодах. В более старой и высоковольтной аппаратуре выпрямители исполняются на электровакуумных приборах — кенотронах.

Раньше широко использовались — селеновые выпрямители.

Переменный электрический ток — это гармонический сигнал, меняющий свою амплитуду и полярность по синусоидальному закону:



В переменном электрическом токе можно условно выделить положительные и отрицательные полупериоды. Все то, что больше нулевого значения относится к положительным полупериодам (положительная полуволна — красным цветом), а все, что меньше (ниже) нулевого значения — к отрицательным полупериодам (отрицательная полуволна — синим цветом).

Выпрямитель, в зависимости от его конструкции «отсекает», или «переворачивает» одну из полуволн переменного тока, делая направление тока односторонним.

Схемы построения выпрямителей сетевого напряжения можно поделить на однофазные и трехфазные, однополупериодные и двухполупериодные.

Выпрямители могут быть классифицированы по ряду признаков:

— по схеме выпрямления — однополупериодные, двухполупериодные, мостовые, с удвоением (умножением) напряжения, многофазные и др;
— по типу выпрямительного элемента — ламповые (кенотронные), полупроводниковые, газотронные и др.;

— по величине выпрямленного напряжения — низкого напряжения и высокого;

— по назначению — для питания анодных цепей, цепей экранирующих сеток, цепей управляющих сеток, коллекторных цепей транзисторов, для зарядки аккумуляторов и др.

4.1. Основные характеристики выпрямителей

К основным характеристикам выпрямителей относят следующие приведенные ниже параметры.

Номинальное напряжение постоянного тока – среднее значение выпрямленного напряжения, заданное техническими требованиями. Обычно указывается напряжение до фильтра U_0 и напряжение после фильтра (или отдельных его звеньев – U), определяется значением напряжения, необходимым для питаемых выпрямителем устройств.

Номинальный выпрямленный ток I_0 – среднее значение выпрямленного тока, т.е. его постоянная составляющая, заданная техническими требованиями. Определяется результирующим током всех цепей питаемых выпрямителем.

Напряжение сети $U_{\text{сети}}$ – напряжение сети переменного тока, питающей выпрямитель. Стандартное значение этого напряжения для бытовой сети – 220 вольт с допускаемыми отклонениями не более 10 %.

Пульсация – переменная составляющая напряжения или тока на выходе выпрямителя. Это качественный показатель выпрямителя.

Частота пульсаций – частота наиболее резко выраженной гармонической составляющей напряжения или тока на выходе выпрямителя. Для самой простой-однополупериодной схемы выпрямителя частота пульсаций равна частоте питающей сети. Двухполупериодные, мостовые схемы и схемы удвоения напряжения дают пульсации, частота которых равна удвоенной частоте питающей сети. Многофазные схемы выпрямления имеют частоту пульсаций, зависящую от схемы выпрямителя и числа фаз.

Коэффициент пульсаций – отношение амплитуды наиболее резко выраженной гармонической составляющей напряжения или тока на выходе выпрямителя к среднему значению напряжения или тока. Различают коэффициент пульсаций на входе фильтра (p_0 , %) и коэффициент пульсаций на выходе фильтра (p , %). Допускаемые значения коэффициента пульсаций на выходе фильтра определяются характером нагрузки.

Коэффициент фильтрации (коэффициент сглаживания) – отношение коэффициента пульсаций на входе фильтра к коэффициенту пульсаций на выходе фильтра $k_c = p_0/p$. Для многозвенных фильтров коэффициент фильтрации равен произведению коэффициентов фильтрации отдельных звеньев.

Колебания (нестабильность) напряжения на выходе выпрямителя – изменение напряжения постоянного тока относительно номинального. При отсутствии стабилизаторов напряжения определяются отклонениями напряжения сети.

4.2. Основные схемы выпрямителей

Выпрямители, применяемые для однофазной бытовой сети выполняются по 4 основным схемам: однополупериодной, двухполупериодной с нулевой точкой (или просто-двухполупериодной), двухполупериодной мостовой (или просто –мостовой, реже называется как “схема Греча”), и схема удвоения (умножения) напряжения (схема Латура). Для многофазных промышленных сетей применяются две разновидности схем: однополупериодная многофазная и схема Ларионова.

Чаще всего используются трехфазные схемы выпрямителей.

Основные показатели, характеризующие схемы выпрямителей делят на три группы:

— относящиеся ко всему выпрямителю в целом: U_0 — напряжение постоянного тока до фильтра, I_0 — среднее значение выпрямленного тока, p_0 — коэффициент пульсаций на входе фильтра;

— определяющие выбор выпрямительного элемента (вентиль): $U_{обр}$ — обратное напряжение (напряжение на выпрямительном элементе (вентиле) в непроводящую часть периода), $I_{макс}$ — максимальный ток проходящий через выпрямительный элемент (вентиль) в проводящую часть периода;

— определяющие выбор трансформатора: U_2 — действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора, I_2 — действующее значение тока во вторичной обмотке трансформатора, $P_{тр}$ — расчетная мощность трансформатора.

Однополупериодный выпрямитель

Простейшая схема **однополупериодного** выпрямителя состоит только из одного выпрямляющего ток элемента (диода). На выходе — пульсирующий постоянный ток. На промышленных частотах (50—60 Гц) не имеет широкого применения, так как для питания аппаратуры требуются сглаживающие фильтры с большими величинами ёмкости и индуктивности, что приводит к увеличению габаритно-весовых характеристик выпрямителя. Однако схема однополупериодного выпрямления нашла очень широкое распространение в импульсных блоках питания с частотой переменного напряжения свыше 10 кГц, широко применяющихся в современной бытовой и промышленной аппаратуре. Объясняется это тем, что при более высоких частотах пульсаций выпрямленного напряжения, для получения требуемых характеристик (заданного или допустимого коэффициента пульсаций), необходимы сглаживающие элементы с меньшими значениями ёмкости (индуктивности). Вес и размеры источников питания уменьшаются с повышением частоты входного переменного напряжения.

Однополупериодный выпрямитель или четвертьмост является простейшим выпрямителем и включает в себя один вентиль (диод или тиристор).

Напряжение со вторичной обмотки трансформатора проходит через вентиль на нагрузку только в положительные полупериоды переменного напряжения. В отрицательные полупериоды вентиль закрыт, всё падение напряжения происходит на вентиле, а напряжение на нагрузке U_n равно нулю. Среднее значение переменного тока по отношению к подведенному действующему составит:

$$U_s = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,45U_2$$

Эта величина вдвое меньше, чем в полномостовом. Важно отметить, что среднее квадратичное значение напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя будет в $\sqrt{2}$ меньше подведенного действующего, а потребляемая нагрузкой мощность в 2 раза меньше (для синусоидальной формы сигнала).

Однофазные выпрямители

На рис. 25 изображена схема и временная диаграмма выпрямления переменного тока однофазным однополупериодным выпрямителем.



Рис. 25. Схема и осциллограммы напряжения однофазного выпрямителя

Из рис. 25 видно, что диод отсекает отрицательную полуволну. Если мы перевернем диод, поменяв его выводы – анод и катод местами, то на выходе окажется, что отсечена не отрицательная, а положительная полуволна рис. 26.

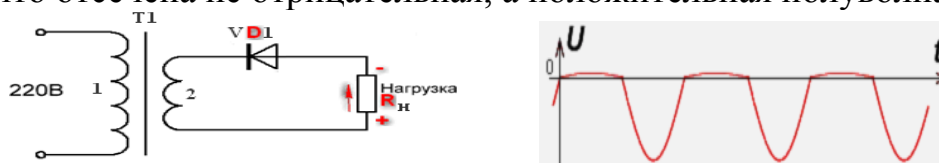


Рис. 26. Схема и осциллограммы напряжения однофазного выпрямителя с поменянными выводами

Среднее значение напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя соответствует значению:

$$U_{cp} = U_{max}/\pi = 0,318 U_{max}$$

где π — константа равная 3,14.

Однополупериодные выпрямители используются в качестве выпрямителей сетевого напряжения в схемах, потребляющих слабый ток, а также в качестве выпрямителей импульсных источников питания. Они абсолютно не годятся в качестве выпрямителей сетевого напряжения синусоидальной формы для устройств, потребляющих большой ток.

Наиболее распространенными являются однофазные двухполупериодные выпрямители. Существуют две схемы таких выпрямителей – мостовая схема и балансная.

Рассмотрим мостовую схему однофазного двухполупериодного выпрямителя и его работу (рис. 27).

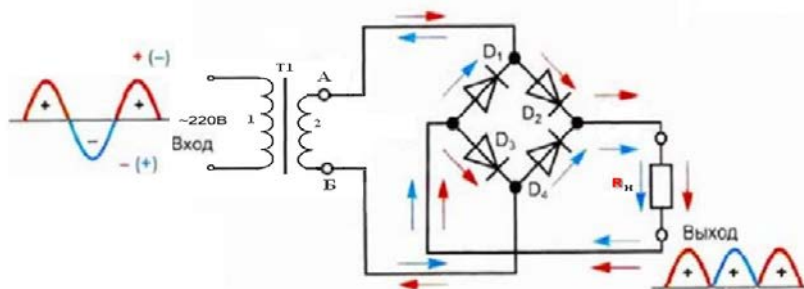


Рис. 27. Мостовая схема и осциллограммы напряжения однофазного двухполупериодного выпрямителя

Если ток вторичной обмотки трансформатора течет по направлению от точки «А» к точке «В», то далее от точки «В» ток течет через диод VD3 (диод VD1 его не пропускает), нагрузку R_n , диод VD2 и возвращается в обмотку трансформатора через точку «А».

Когда направление тока вторичной обмотки трансформатора меняется на противоположное, то вышедший из точки «А», ток течет через диод VD4, нагрузку R_n , диод VD1 и возвращается в обмотку трансформатора через точку «В».

Таким образом, практически отсутствует промежуток времени, когда напряжение на выходе выпрямителя равно нулю.

Схема проста и не требует большого количества элементов. Это и сказывается на качестве выпрямленного напряжения. При низких частотах переменного напряжения (например, как в электросети — 50 Гц) выпрямленное напряжение получается сильно пульсирующим (рис. 31). А это очень плохо.

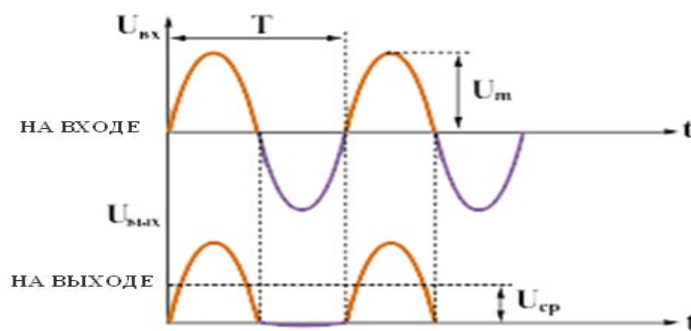


Рис. 28. Осциллограммы напряжения

Примером использования однополупериодного выпрямителя может служить простой зарядник от сотового телефона. Так как зарядник сам по себе маломощный, то в нём применяется однополупериодная схема, причём как во входном сетевом выпрямителе 220V (50Гц), так и в выходном, где требуется выпрямить переменное напряжение высокой частоты со вторичной обмотки импульсного трансформатора.

Рассмотрим балансную схему однофазного двухполупериодного выпрямителя. По своей сути это два однополупериодных выпрямителя, подключенных параллельно в противофазе, при этом начало второй обмотки соединено с концом первой вторичной обмотки. Если в мостовой схеме во время действия обоих полупериодов сетевого напряжения используется одна вторичная обмотка трансформатора, то в балансной схеме две вторичных обмотки (2 и 3) используются поочередно.

Среднее значение напряжения на выходе двухполупериодного выпрямителя соответствует значению:

$$U_{\text{ср}} = 2 \times U_{\text{max}} / \pi = 0,636 U_{\text{max}},$$

где π — константа равная 3,14.

Представляет интерес сочетание мостовой и балансной схемы выпрямления, в результате которого, получается двухполярный мостовой выпрямитель, у которого один провод является общим для двух выходных напряжений (для первого выходного напряжения, он отрицательный, а для второго — положительный).

Двухполупериодный выпрямитель с нулевой точкой

Принципиальная схема и осциллограммы напряжения в различных точках выпрямителя приведены на рис. 29.

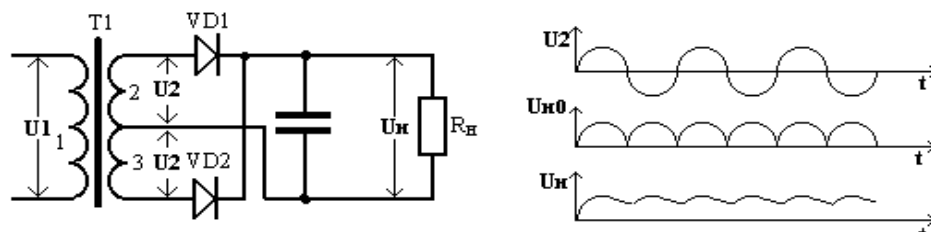


Рис. 29. Схема и осциллограммы напряжения в различных точках двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой: U_2 — напряжение на одной половине вторичной обмотки трансформатора; U_n — напряжение на нагрузке; U_{n0} — напряжение на нагрузке при отсутствии конденсатора

В этом выпрямителе используются два вентиля, имеющие общую нагрузку и две одинаковые вторичные обмотки трансформатора (или одну со средней точкой).

Практически схема представляет собой два однополупериодных выпрямителя, имеющих два разных источника и общую нагрузку. В одном полупериоде переменного напряжения ток в нагрузку проходит с одной половины вторичной обмотки через один вентиль, в другом полупериоде — с другой половины обмотки, через другой вентиль.

Преимущество: эта схема выпрямителя имеет в 2 раза меньше пульсации по сравнению с однополупериодной схемой выпрямления. Емкость конденсатора при одинаковом с однополупериодной схемой коэффициенте пульсаций может быть в 2 раза меньше.

Недостатки: более сложная конструкция трансформатора и нерациональное использование в трансформаторе меди и стали.

Мостовая схема выпрямителя

Диодный мост — электрическая схема, предназначенная для преобразования («выпрямления») переменного тока в пульсирующий.

На вход (**Input**) схемы подаётся переменное напряжение (обычно, но не обязательно синусоидальное). В каждый из полупериодов ток проходит только через 2 диода, 2 других — заперты (рис. 30).

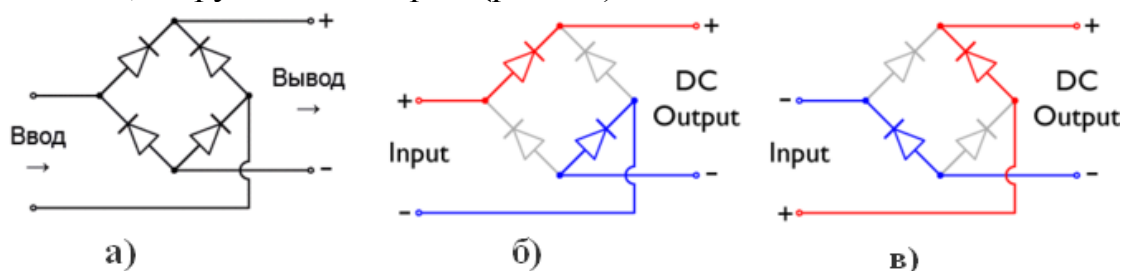


Рис. 30. Выпрямление полувольт: а — анимация принципа работы; б — положительная; в — отрицательная

В результате, на выходе (DC Output) получается напряжение, пульсирующее с частотой, вдвое большей частоты питающего напряжения:

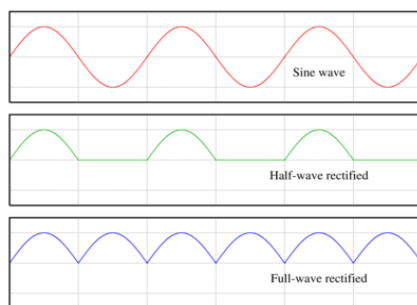


Рис. 31. Красным цветом — исходное синусоидальное напряжение, зелёным — однополупериодное выпрямление (для сравнения), синим — рассматриваемое двухполупериодное

Преимущества. Двухполупериодное выпрямление с помощью моста (по сравнению с однополупериодным) позволяет:

- получить на выходе напряжение с повышенной частотой пульсаций, которое проще сгладить фильтром на конденсаторе.
- избежать постоянного тока подмагничивания в питающем мост трансформаторе.

— увеличить его КПД, что позволяет сделать его магнитопровод меньшего сечения.

Недостатки. Происходит двойное падение напряжения по сравнению с однополупериодным выпрямлением (прямое напряжение диода $\times 2 \approx 1$ В), это иногда нежелательно в низковольтных схемах. Частично этот недостаток может быть преодолен за счет использования диодов Шоттки с малым падением напряжения.

При перегорании одного из диодов схема превращается в однополупериодную, что может быть не замечено вовремя, и в устройстве появится скрытый дефект.

Принципиальная схема и осциллограммы напряжения в различных точках выпрямителя приведены на рис. 32.

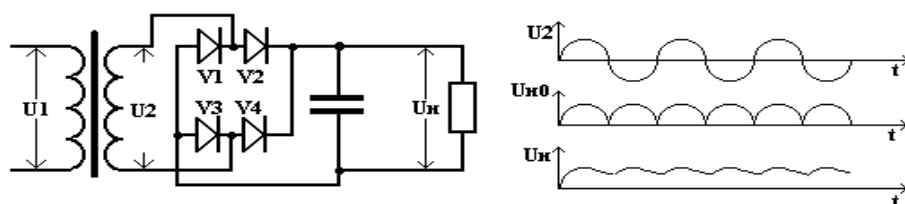


Рис. 32. Схема и осциллограммы напряжения в различных точках мостового выпрямителя: U_2 — напряжение вторичной обмотки трансформатора; U_n — напряжение на нагрузке; $U_{н0}$ — напряжение на нагрузке при отсутствии конденсатора

Основная особенность данной схемы — использование одной обмотки трансформатора при выпрямлении обоих полупериодов переменного напряжения.

При выпрямлении положительного полупериода переменного напряжения ток проходит по следующей цепи: Верхний вывод вторичной обмотки — вентиль $V2$ — верхний вывод нагрузки — нагрузка — нижний вывод нагрузки — вентиль $V3$ — нижний вывод вторичной обмотки — обмотка.

При выпрямлении отрицательного полупериода переменного напряжения ток проходит по следующей цепи: нижний вывод вторичной обмотки — вентиль $V4$ — верхний вывод нагрузки — нагрузка — нижний вывод нагрузки — вентиль $V1$ — верхний вывод вторичной обмотки — обмотка.

Как мы видим, в обоих случаях направление тока через нагрузку (выделено курсивом) одинаково.

Преимущества: по сравнению с однополупериодной схемой мостовая схема имеет в 2 раза меньший уровень пульсаций, более высокий КПД, более рациональное использование трансформатора и уменьшение его расчетной мощности. По сравнению с двухполупериодной схемой мостовая имеет более простую конструкцию трансформатора при таком же уровне пульсаций. Обратное напряжение вентиляей может быть значительно ниже, чем в первых двух схемах.

Недостатки: увеличение числа вентиляей и необходимость шунтирования вентиляей для выравнивания обратного напряжения на каждом из них.

Эта схема выпрямителя наиболее часто применяется в самых различных устройствах. На основе этой схемы, при наличии среднего вывода с вторичной обмотки трансформатора можно получить еще два варианта схем выпрямления (рис. 33).

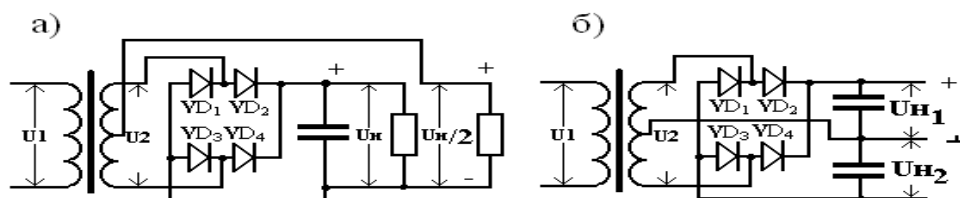


Рис. 33. Варианты схем выпрямления: а — отвод от середины вторичной обмотки; б — двуполярное напряжение амплитудой меньше амплитудой

На левой схеме отвод от середины вторичной обмотки позволяет получить еще одно напряжение, меньше основного в 2 раза. Таким образом, основное напряжение получается с мостовой схемы выпрямления, дополнительное — с двухполупериодной.

На правой схеме получается двуполярное напряжение амплитудой в 2 раза меньше чем получаемое в основной схеме. Оба напряжения получаются с помощью двухполупериодных схем выпрямления.

Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой

В схеме двухполупериодного выпрямителя со средней точкой вывода вторичной обмотки трансформатора, приведённой на рис. 33, диоды D_1 и D_2 работают поочередно. В данный момент времени ток протекает через тот диод, у которого анод положителен относительно катода. Ток через нагрузку протекает в течение обоих полупериодов, но в одном направлении (на рис. 33,а, сверху вниз). Так же как в однополупериодной схеме, выходное напряжение является пульсирующим с амплитудой U_{2m} , но с частотой, вдвое большей частоты сети; это увеличивает постоянную составляющую в два раза по сравнению с однополупериодной схемой. Изменится в двухполупериодной схеме и величина максимального напряжения: $U_{обр} = 2U_{2m}$.

На практике широкое распространение получила мостовая схема выпрямителя (рис. 34), в которой используется силовой трансформатор с обмоткой без средней точки и четыре диода. Переменное напряжение подводится к одной диагонали моста (диагональ АВ), а выпрямленное напряжение снимается с другой (диагональ БГ).

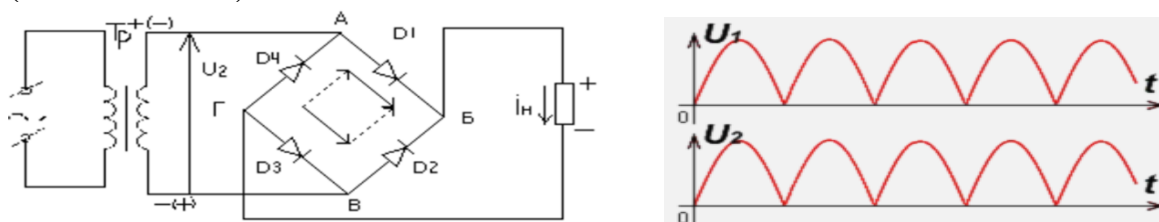


Рис. 34. Схема и осциллограммы напряжения двухполупериодного мостового выпрямителя

В мостовой схеме ток протекает в течение одного полупериода, когда потенциал точки А выше потенциала точки В, через последовательно соединённые диод D_1 , нагрузку R_n и диод D_3 , а в течении другого — через диод D_2 , нагрузку R_n и диод D_4 , т.к. в это время потенциал точки В выше потенциала точки А. Временные диаграммы мостовой схемы совпадают с диаграммами двухполупериодной схемы, лишь обратное напряжение на диодах будет вдвое меньше. В мостовой схеме выпрямителя $U_{обр} = U_{2m}$.

Добавим в схему конденсатор фильтра рис. 35.

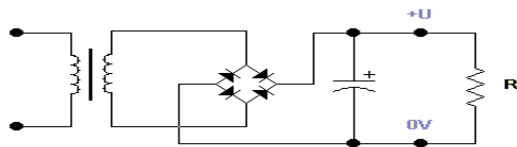


Рис. 35. Мостовая схема с конденсатором

Приведённая схема позволяет получить однополярное напряжение с одной обмотки трансформатора.

На рис. 36. приведена типовая схема двухполупериодного выпрямителя со средней точкой.

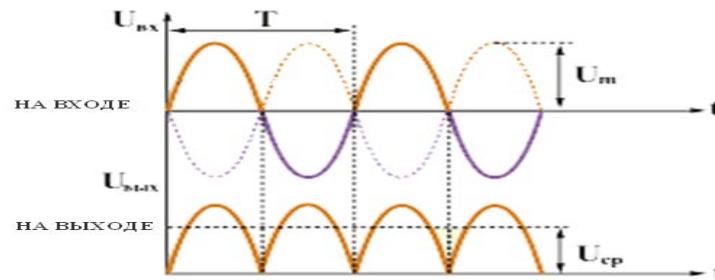


Рис. 36. Осциллограммы напряжения двухполупериодного выпрямителя со средней точкой

Схема удвоения напряжения

Принципиальная схема и осциллограммы напряжения в различных точках выпрямителя приведены на рис. 37.

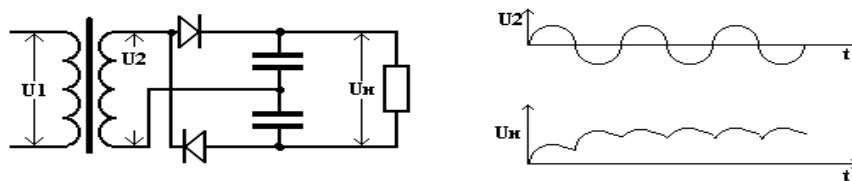


Рис. 37. Схема и осциллограммы напряжения в различных точках выпрямителя удвоения: U_2 — напряжение вторичной обмотки трансформатора; U_n — напряжение на нагрузке

Отличительной особенностью данной схемы является то, что в одном полупериоде переменного напряжения от вторичной обмотки трансформатора “заряжается” один конденсатор, а во втором полупериоде от той же обмотки — другой. Поскольку конденсаторы включены последовательно, то результирующее напряжение на обоих конденсаторах (на нагрузке) в два раза выше, чем можно получить от той же вторичной обмотки в схеме с однополупериодным выпрямителем.

Преимущества: вторичную обмотку трансформатора можно рассчитывать на значительно меньшее напряжение.

Недостатки: значительные токи через вентили выпрямителя, уровень пульсаций значительно выше, чем в схемах двухполупериодных выпрямителей.

Эта же схема может использоваться еще в двух вариантах (рис. 38):

а — схема предназначена для получения двух напряжений питания одной полярности, правая м для получения двуполярного напряжения с общей точкой;

б — схема характеристики выпрямителя соответствующая характеристикам однополупериодного выпрямителя.

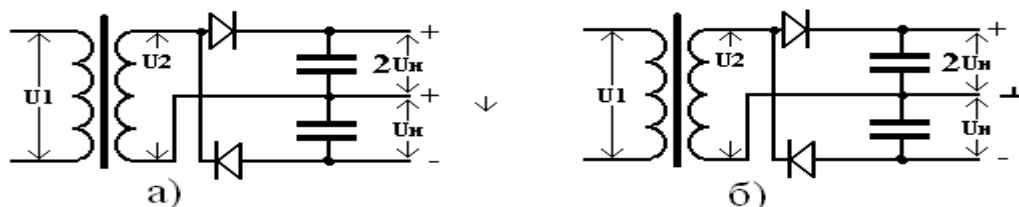
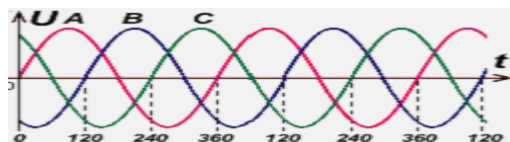


Рис. 38. Схема и осциллограммы напряжения в различных точках выпрямителя удвоения: а — получение двух напряжений питания одной полярности; б — получения дуполярного напряжения с общей точкой

Трёхфазные выпрямители

Устройства, которые используются для получения постоянного тока из переменного трёхфазного тока, называются трёхфазными выпрямителями. Трёхфазные выпрямители в бытовой технике, конечно, не используются. Единственный прибор, который может использоваться в быту это сварочный аппарат. В качестве трёхфазных выпрямителей используются наработки двух известных электротехников Миткевича (на трёх диодах) и Ларионова (на шести диодах). Самая простая схема Миткевича называется «три четверти моста параллельно», что означает три силовых диода включенных параллельно через вторичные обмотки трёхфазного трансформатора. Трёхфазные выпрямители обладают лучшей характеристикой выпрямления переменного тока — меньшим коэффициентом пульсаций выходного напряжения по сравнению с однофазными выпрямителями.

Связано это с тем, что в трёхфазном электрическом токе синусоиды разных фаз «перекрывают» друг друга. После выпрямления такого напряжения, сложения амплитуд различных фаз не происходит, а выделяется максимальная амплитуда из значений всех трех фаз входного напряжения.



В трёхфазных цепях переменного тока промышленной частоты (50 Гц) в основном используют две схемы выпрямителей: трёхфазный выпрямитель с нейтральной точкой и трёхфазный мостовой выпрямитель. Трёхфазные выпрямители используют как выпрямители средней и большой мощности (средние значения выпрямленного тока достигают сотни ампер).

Коэффициент пульсаций на нагрузке очень мал, что позволяет использовать конденсаторы фильтра небольшой ёмкости и малых габаритов.

Более сложной является схема Ларионова, которая называется «три полумоста параллельно», что это такое хорошо видно из рис. 40.

Менее известны трёхфазные выпрямители по схемам «три параллельных моста» (на двенадцати диодах), «три последовательных моста» (на двенадцати диодах) и др., которые по многим параметрам превосходят и схему Миткевича и схему Ларионова. При этом требуются диоды со средним током через один диод почти вдвое меньшим, чем в схеме Ларионова.

Выпрямитель Миткевича является четвертьмостовым параллельным, выпрямитель Ларионова является не полномостовым, как его часто считают, а полумостовым параллельным («три параллельных полумоста»). В зависимости от схемы включения трёхфазного трансформатора или трёхфазного генератора (звезда, треугольник) схема Ларионова имеет две разновидности: «звезда»

Ларионов» и «треугольник-Ларионов», которые имеют разные напряжения, токи, внутренние сопротивления.

По схемам можно заметить, что схема Миткевича является неполной схемой Ларионова, а схема Ларионова является неполной схемой «три параллельных моста». Из-за принципа обратимости электрических машин по этим же схемам строятся и преобразователи (инверторы).

Трёхфазный выпрямитель «три четверть моста параллельно» (Миткевича В.Ф.)

Схема трёхфазного ртутного выпрямителя по схеме Миткевича приведена на рис. 39. Схема Миткевича В.Ф. «Частично трёхполупериодный с нулевым выводом». Отрицательные полупериоды в выпрямителе Миткевича не используются. Из-за этого выпрямитель Миткевича имеет очень низкий коэффициент использования габаритной мощности трансформатора и применяется при малых мощностях. Частота пульсаций равна $3f$, где f — частота сети. Относительная амплитуда пульсаций равна $0,5/0,83 = 0,6$ (60 %).

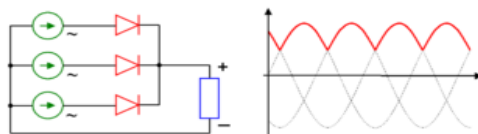


Рис. 39. Схема и осциллограммы напряжения трёхфазного выпрямителя

На холостом ходу и близких к нему режимах ЭДС в ветви с наибольшей на данном отрезке периода ЭДС смещает в сторону запирающая (закрывает) диоды в ветви с меньшей на данном отрезке периода ЭДС. Относительное эквивалентное активное сопротивление при этом равно сопротивлению одной ветви $3r$. При увеличении нагрузки (уменьшении R_n) появляются и увеличиваются отрезки периода, на которых обе ветви работают на одну нагрузку параллельно. Относительное эквивалентное внутреннее активное сопротивление на этих отрезках равно $3r/2$. В режиме короткого замыкания эти отрезки максимальны, но полезная мощность в этом режиме равна нулю.

Трёхфазные выпрямители электрического тока (схема Ларионова)

В состав трехфазного выпрямителя с нейтральной точкой (рис. 40, а) входят трехфазный трансформатор с соединением обмоток звездой, три диода, включенные в каждую фазу вторичной обмотки трансформатора, и нагрузочный резистор.

Диоды выпрямителя работают поочередно, каждый в течение трети периода. Ток нагрузки равен сумме токов каждого диода и имеет всегда одно и то же направление. Как видно из временной диаграммы (рис. 40, б), пульсации выпрямленного напряжения значительно ниже, чем у однофазных выпрямителей. На рис. 40 представлена схема трехфазного однополупериодного выпрямителя и его выходное напряжение (красным цветом), образованное на «вершинах» трехфазного напряжения.

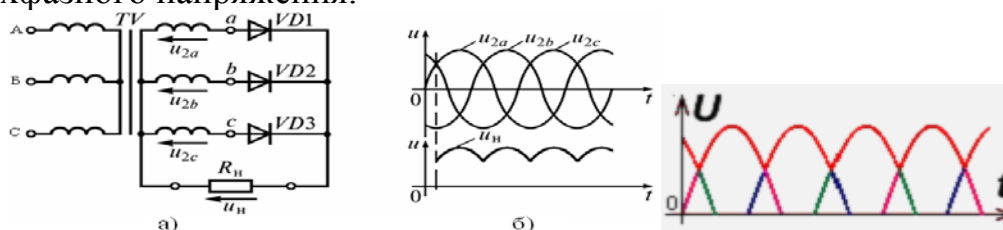


Рис. 40. Схема и осциллограммы напряжения трехфазного однополупериодного выпрямителя

Среднее значение напряжения $U_{нф}=1,17 U_{2ф}$, где $U_{2ф}$ – действующее значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора.

К достоинствам выпрямителя с нейтральной точкой следует отнести его высокую надежность и минимальное количество диодов.

Схема трехфазного мостового выпрямителя (рис. 41, а) содержит шесть диодов, включенных по мостовой схеме в фазы вторичной обмотки трехфазного трансформатора.

За счет «перекрывания» фаз напряжения, выходное напряжение трехфазного однополупериодного выпрямителя имеет меньшую глубину пульсации. Вторичные обмотки трансформатора могут быть использованы только по схеме подключения «звезда», с «нулевым» выводом от трансформатора.

На следующем рис. 41 представлена схема трехфазного двухполупериодного мостового выпрямителя (схема Ларионова) и его выходное напряжение (красным цветом).

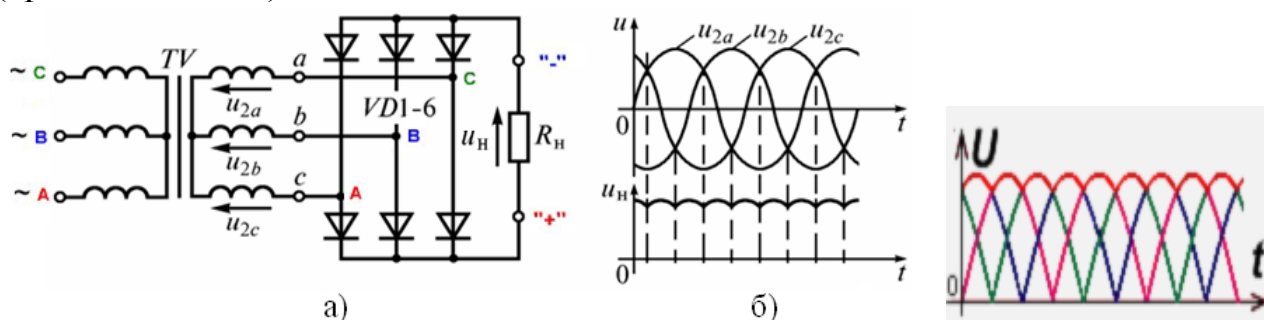


Рис. 41. Схема и осциллограммы напряжения трехфазного двухполупериодного мостового выпрямителя Ларионова

Общая точка первой группы диодов VD1, VD3, VD5 представляет собой положительный полюс на сопротивлении нагрузки, а второй группы VD2, VD4, VD6 – отрицательный полюс. В выпрямителе возникает ток через нагрузочное сопротивление и два соответствующих диода в каждый момент времени, когда к диодам приложено наибольшее напряжение. Причем в любой интервал времени токи всегда имеют одно и то же направление (рис. 41, б). Коэффициент пульсации трехфазного мостового выпрямителя на порядок ниже, чем однофазного двухполупериодного выпрямителя. Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{н\text{ ср}} \cong 2,34 U_2$$

Управляемые выпрямители

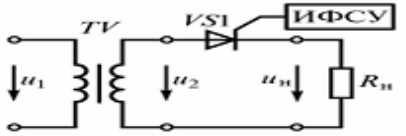
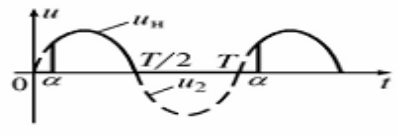
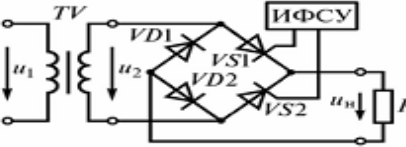
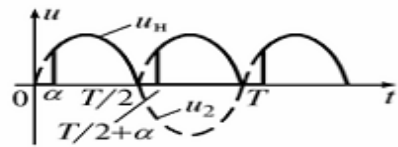
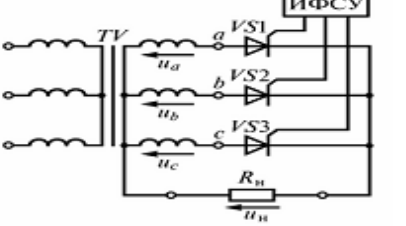
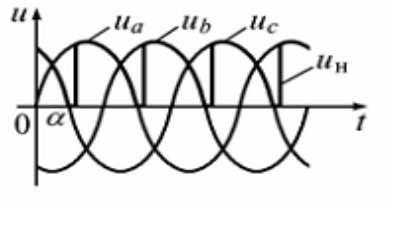
Управляемые выпрямители, наряду с преобразованием переменного тока в постоянный, дают возможность плавно регулировать в достаточно широких пределах среднее значение выпрямленного напряжения.

Основным элементом управляемого выпрямителя является тиристор, который включается при подаче импульса на его управляющий электрод со схемы управления. Момент включения (отпирания) тиристора зависит от сдвига фаз между анодным напряжением и напряжением включающего импульса. Угол сдвига фаз называется углом регулирования α . Такой способ управления называется фазовым.

Управляющие импульсы формируются электронной импульсно-фазовой системой управления (ИФСУ). Регулирование угла сдвига фаз может осуществляться как вручную, так и автоматически.

Обычно управляемые выпрямители строят по тем же схемам, что и неуправляемые. Наиболее распространенные схемы регулируемых выпрямителей и их временные диаграммы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Схема управляемого выпрямителя	Форма выходного напряжения
 однофазная однополупериодная	
 однофазная мостовая	
 трехфазная с нейтральной точкой	

За счет использования положительной и перевернутой отрицательной полуволны трехфазного напряжения, выходное напряжение (выделено красным цветом), образованное на вершинах синусоид, имеет самую маленькую глубину пульсаций выходного напряжения по сравнению со всеми остальными схемами выпрямления. Вторичные обмотки трансформатора могут быть использованы как по схеме подключения «звезда», без «нулевого» вывода от трансформатора, так и «треугольник».

Выпрямитель «три параллельных моста» имеет большую надёжность, чем выпрямитель «звезда-Ларионов». При обрыве (выгорании) 5/6 диодов выпрямитель «звезда-Ларионов» становится полностью неработоспособным, а выпрямитель «три параллельных моста», в случае оставшихся диодов в противоположных плечах одного моста, ещё даёт около 1/6 от полной мощности, чего может хватить, чтобы «дотянуть» до ремонта. В выпрямителе «три параллельных полных моста» средний ток через один диод почти вдвое меньше, чем в выпрямителе «звезда-Ларионов», а такие диоды дешевле и доступнее.

Недостатки: При очень малых токах нагрузки эквивалентное внутреннее активное сопротивление почти равно активному сопротивлению одной обмотки, то есть больше, чем в выпрямителе «треугольник-Ларионов».

Устранение недостатка. При очень малых токах нагрузки схему «три параллельных моста» можно переключать на схему «треугольник-Ларионов» переключателем с тремя замыкающими контактными группами.

1. Из-за четырёхпроводной трёхфазной сети выпрямитель «три параллельных моста» может работать только вблизи трансформатора, выпрямитель Ларионова — на удалении от трансформатора.

Устранение недостатка. Проводка шестипроводной линии электропередачи.

По свойствам этот выпрямитель ближе к источникам тока и может почти во всех устройствах заменить выпрямители «звезда-Ларионов» и «треугольник-Ларионов», (электропривод тепловозов, тепловозов, атомовозов, прокатных станов, буровых вышек, блоки питания мощных электролизёров, мощных

радиопередатчиков, мощных радиолокаторов, мощных лазеров, электротранспорта постоянного тока, генераторы бортовой сети автотракторной и др. техники и в других устройствах), при этом уменьшается нагрев обмоток и бережется около 4 % электроэнергии (топлива)).

Частота пульсаций равна $6f$, где f — частота сети.

Относительная амплитуда пульсаций равна $0,13/0,95 = 0,14$ (14 %).

Узел выпрямителя собирается по различным технологиям — часть деталей крепится механическим способом, мелкие диоды впаиваются в схему, крупногабаритные обычно запрессовываются. Поэтому потребоваться ремонт выпрямителя может, не только при выходе из строя полупроводниковых элементов, но и при некорректной их установке на «подкове» теплоотводящей пластины.

Перед тем, как прозвонить схему или отдельный полупроводник, следует визуально осмотреть конструкцию. Даже в отсутствие тестера, омметра, вольтметра можно использовать лампочку и специальную схему подключения АКБ, чтобы понять, неисправен диод или работает корректно.

Методика диагностики выглядит следующим образом:

- с генератора снимается задняя крышка для обеспечения доступа к диодам;
- на пластину подается проводом «—» от АКБ, она прижимается к корпусу на генераторе, один провод лампы касается к диоду в месте присоединения статорной обмотки, второй — к «+» аккумулятора, при пробое лампочка загорится (рис. 42, а);

- тестер выставляется в режим омметра на 1 кОм, если поменять местами щупы мультиметра, показания должны измениться с 0 на 400 – 800 Ом в разных направлениях (42, б).

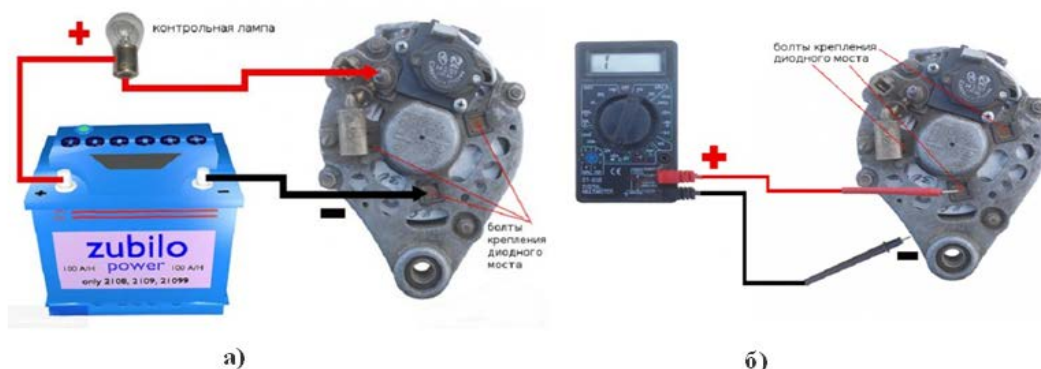


Рис. 42. Диагностика выпрямителя: а — лампой; б — мультиметром

В большинстве случаев горит диодный мост при проникновении влаги.

4.3. Внешняя характеристика выпрямителей

В маломощных схемах дроссель может быть заменен резистором. Это дает возможность уменьшить массу, габариты и стоимость фильтра, однако сглаживание при этом ухудшается.

Зависимость $U_H = J(I_H)$ (рис. 43) называется внешней характеристикой выпрямителей. Они определяют границы изменений нагрузочного тока, при котором выпрямленное напряжение не опускается ниже допустимой величины. Внешняя характеристика описывается уравнением

$$U_H = U_{H0} - (\Delta U_H + \Delta U_{тр} + I_H R_\phi),$$

где U_{H0} — среднее значение выпрямленного напряжения при холостом ходе ($I_H = 0$);

ΔU_H — среднее значение U на вентильях одного плеча;

$\Delta U_{тр}$ — среднее значение падения во вторичной обмотке трансформатора;

R_ϕ — активное сопротивление элементов сглаживающего фильтра, включенных последовательно с нагрузкой.

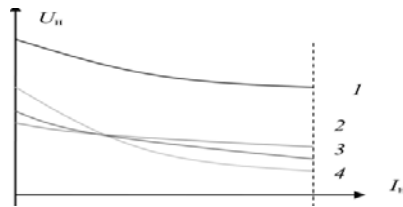


Рис. 43. Внешние характеристики выпрямителей

С ростом I_n растут все составляющие падений напряжения, что приводит к понижению выпрямленного U_H .

С ростом I_n (кривая 2) незначительно понижается U_H , так как ΔU_H и ΔU_{Tr} невелики, а $I_n R_\phi = 0$.

При наличии ёмкостного фильтра напряжение холостого хода определяется амплитудным значением напряжения фазы трансформатора, а снижение U_H происходит более резко (кривая 1).

При наличии ЯС-фильтра (кривая 4) ещё более резко снижается U_H , так как R_ϕ достаточно велико.

При включении LC-фильтра (кривая 3) снижение U_H значительно меньше, так как активное сопротивление провода обмотки дросселя обычно мало.

Пример 1. В схему однополупериодного выпрямителя включен индуктивный сглаживающий фильтр. Определить индуктивность, если выпрямленный ток 75 мА, выпрямленное напряжение 120 В, частота сети 400 Гц, коэффициент сглаживания 15.

Решение. Найдем сопротивление нагрузки $R_n = U_0 / I_0 = 1\,600\ \text{Ом}$.

Индуктивное сопротивление $X_L = q R_n = 24\,000\ \text{Ом}$.

Теперь найдем индуктивность $L = X_L / 2\pi f = 9,6\ \text{Гн}$.

Пример 2. Найти емкость ЯС-фильтра, если $R = 2\ \text{кОм}$, фильтр подключен к выходу однополупериодного выпрямителя с частотой 100 Гц, а коэффициент сглаживания должен быть не менее 10.

Решение: $C = q / 2\pi f R_n = 16\ \text{мкФ}$.

Пример 3. Определить коэффициент сглаживания q для схемы двухполупериодного выпрямителя с индуктивным сглаживающим фильтром, если известно, что амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_{2m} = 300\ \text{В}$, выпрямленный ток, проходящий через нагрузку $I_0 = 200\ \text{мА}$, частота сети $f = 50\ \text{Гц}$, индуктивность катушки $L = 10\ \text{Гн}$.

Решение. Выпрямленное напряжение на нагрузке:

$$U_0 = 2U_{2m} / \pi = 2 \cdot 300 / 3,14 = 191\ \text{В}.$$

Сопротивление нагрузки $R_n = U_0 / I_0 = 191 / (200 \cdot 10^{-3}) = 966\ \text{Ом}$.

Коэффициент сглаживания $q = X_L / R_n = 2\pi f L / R_n = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 / 966 = 6,6$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев В. Г. Электроника и микропроцессорная техника: учеб. для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. — 3-е изд. перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 2004. — 790 с.
2. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов / И. П. Степаненко. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. — 488 с.
3. Хоровиц П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл: пер. с англ. — 6-е изд. — М.: Мир, 2003. — 704 с.
4. Довгун В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 2. / В. П. Довгун. — Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. — 252 с.
5. Сажнёв А. М., Рогулина Л. Г. Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных систем: учеб. пособие / Новосибирск, 2011. — 220 с.
6. Дурнаков А. А. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций. Принципы построения выпрямителей, фильтров, стабилизаторов : учеб.-метод. пособие / А. А. Дурнаков. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 108 с.
7. Игуменов Д. В., Громов И. С. Эксплуатационные параметры и особенности применения ПТ. — Минск 1981.
9. Electric Carc [Электронный ресурс]. — URL: <http://electric.info> (дата обращения 13.10.2023)
10. URL: <http://www.radioforall.ru>
11. Малышенко Ю. В., Стыцюра Л. Ф., Саяпин Ю. Л. Техническая диагностика: учебное пособие / под общ. ред. Ю. В. Малышенко. — Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2010. — 302 с.
12. Турулин И. И. Преобразование аналоговых измерительных сигналов: учеб. пособие / И. И. Турулин, В. Г. Галалу. — Таганрог: Изд-во Таганрог. ин-та имени А. П. Чехова, 2015. — 132 с.
13. Киселев Ю. В. Основы теории технической диагностики. — Самара: СГАУ, 2004. — 138 с.
14. Кашкаров А. П. Импульсные источники питания. Схемотехника и ремонт / Издательство: ДМК Пресс Серия: Все об электронике: 2016. — 186 с.
15. Ногин В. Н. Аналоговые электронные устройства / В. Н. Ногин. — 2015.
16. Винокурова И. М., Горожанкина О. В., Солощенко Л. О. Техническая диагностика блоков питания и аналоговых систем: диагностика биотехнических блоков: основы технической диагностики: методические указания / И. М. Винокурова, О.В. Горожанкина, Л.О. Солощенко. — Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2023. — 48 с.
17. Гальперин М. В. Электронная техника. ПО / М. В. Гальперин. — Инфра — М, 2017.
18. Артамонов Б. И., Бокуняев А. А. Источники электропитания Радиоустройств / Б. И. Артамонов, А. А. Бокуняев. — ДМК Пресс, 2015.
19. Киселев Ю. В. Основы теории технической диагностики / Ю. В. Киселев. — Самара: СГАУ, 2004. — 138 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Основные сведения о трансформаторах.....	4
1.1. Назначение, классификация, номинальные данные трансформаторов.....	4
1.2. Классификация трансформаторов по числу и схемам соединения обмоток.....	7
1.3. Принцип действия и конструкция трансформаторов	10
1.4. Эквивалентная схема трансформатора.....	11
1.5. Потери и коэффициент полезного действия.....	11
1.6. Трехфазные трансформаторы.....	12
1.7. Параллельная работа трансформаторов.....	13
2. Трансформаторы специального назначения.....	13
2.1. Трехобмоточный трансформатор.....	13
2.2. Автотрансформатор.....	14
2.3. Измерительные трансформаторы тока и напряжения.....	15
2.4. Трансформатор для преобразования числа фаз.....	15
2.5. Стабилизатор напряжения.....	16
2.6. Магнитный усилитель.....	17
2.7. Трансформатор для преобразования частоты.....	17
3. Характерные повреждения силовых трансформаторов.....	21
3.1. Хроматографический метод диагностики силовых трансформаторов.....	21
3.2. Контроль изоляции трансформаторов, вводов и измерительных трансформаторов при рабочем напряжении по характеристикам частичных разрядов.....	28
3.3. Диагностика опрессовки активных элементов и механических деформаций обмоток трансформаторов.....	30
3.4. Диагностика механических деформаций обмоток трансформаторов методом низковольтных импульсов.....	31
4. Выпрямители переменного напряжения.....	33
4.1. Основные характеристики выпрямителей.....	34
4.2. Основные схемы выпрямителей.....	34
4.3. Внешние характеристики выпрямителей.....	46
Библиографический список.....	48

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА БЛОКОВ ПИТАНИЯ
И АНАЛОГОВЫХ СИСТЕМ:
ДИАГНОСТИКА БИОТЕХНИЧЕСКИХ БЛОКОВ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических работ для студентов специальностей
12.02.10 «Монтаж, техническое обслуживание и ремонт биотехнических
и медицинских аппаратов и систем» и 12.02.06 «Биотехнические
и медицинские аппараты и системы»
очной формы обучения

Составители:

**Винокурова Ирина Михайловна
Горожанкина Ольга Владимировна
Солощенко Людмила Олеговна**

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 12.12.2023.
Уч.-изд. л. 2,7.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84