

Расчет трансформатора

Общие сведения

Для работы электронных и радиотехнических устройств возникает необходимость иметь несколько источников постоянного напряжения. Эти источники называются источниками вторичного электропитания (ИВЭ). Первичным источникам питания являются сети переменного тока 127 и 220 В и частотой 50 Гц. Для питания самолетной и морской аппаратуры используются сети с частотой 400 Гц. Исключением являются маломощные устройства, например транзисторные приемники, первичным (и единственным) источником электропитания которых является батарея или аккумулятор.

Чтобы обеспечить аппаратуру нужными постоянными напряжениями необходимо сначала повысить или понизить переменное напряжение питающей сети до требуемых значений, далее при помощи выпрямителей, получить постоянные напряжения. Повышение или понижение напряжения питающей сети осуществляется трансформатором, который играет роль необходимого посредника между питающей сетью и потребителями постоянного напряжения. Очевидно, что трансформатор требуется и в тех случаях, когда нужно получить переменное напряжение, отличающееся от напряжения питающей сети (например, для питания накала электровакуумных приборов).

Трансформатор необходим также и тогда, когда первичным источником электропитания аппаратуры, требующей нескольких напряжений, является сеть постоянного тока (например, аккумуляторная или солнечная батарея). В таких случаях чаще всего применяют транзисторные (статические) преобразователи напряжения, в состав которых всегда входят трансформаторы с необходимым числом обмоток, что позволяет после выпрямления получить различные постоянные напряжения.

Таким образом, трансформатор является весьма гибким и универсальным преобразователем электрической энергии, что обеспечило его исключительно широкое распространение.

Принцип действия трансформатора основан на законе электромагнитной индукции Фарадея, в соответствии с которым напряжение, возникающее на концах витка, пропорционально скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот виток. Если тот же магнитный поток пронизывает одновременно несколько витков, то он, естественно, возбуждает в каждом витке одинаковое напряжение. Это дает нам возможность путем последовательного соединения нескольких витков получать более высокие напряжения. В этих физических явлениях заложена идея трансформации переменного тока с помощью двух (или более) групп последовательно соединенных витков, называемых обмотками.

Если приложить переменное напряжение (т. е. меняющееся по значению и направлению) к концам обмотки, которую назовем первичной, то под действием этого напряжения через обмотку будет протекать переменный ток, создавая в окружающем обмотку пространстве переменный магнитный поток. Если этот магнитный поток будет пронизывать витки другой обмотки, называемой вторичной, то в ней возникнет переменное напряжение, называемое электродвижущей силой (ЭДС) вторичной обмотки, которое будет пропорционально числу ее витков и скорости изменения магнитного потока. Отсюда следует, что для трансформации переменного напряжения необходимо иметь две обмотки и охватывающий их переменный магнитный поток, изменяющийся по значению и направлению.

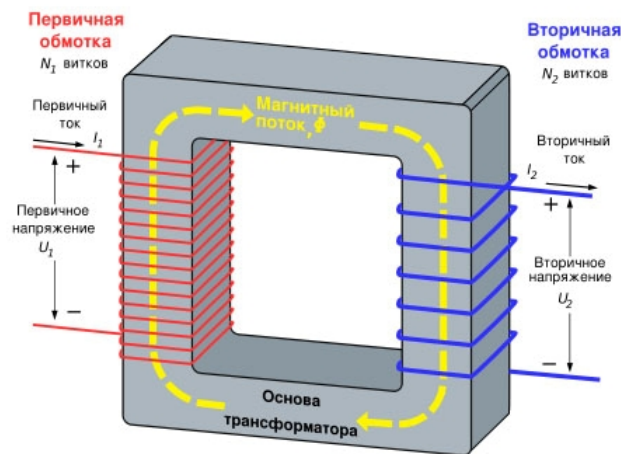


Рисунок 1. Принцип действия трансформатора.

Очевидно, что трансформатор может иметь несколько вторичных обмоток с разными напряжениями (ЭДС) и, следовательно, с разными числами витков, однако все обмотки должны быть пронизаны одним и тем же магнитным потоком.

Вернемся к процессам, происходящим в первичной обмотке трансформатора. Переменное напряжение, приложенное к первичной обмотке, создает переменный магнитный поток; этот поток, пронизывая витки первичной обмотки, индуцирует в них переменное напряжение, почти равное приложенному напряжению, но противоположное ему по направлению. Индуцированное в первичной обмотке напряжение называют ЭДС первичной обмотки.

Электродвижущая сила первичной обмотки E_1 лишь незначительно меньше приложенного напряжения U_1 и почти полностью его уравнивает. Напряжение U_1 обеспечивает также протекание так называемого, намагничивающего тока, создающего переменный магнитный поток в трансформаторе. Так как ЭДС первичной обмотки и ЭДС вторичных обмоток вызываются одним и тем же магнитным потоком, то очевидно, что эта ЭДС и вторичные ЭДС совпадают между собой по направлению.

Электродвижущая сила вторичной обмотки E_2 реального трансформатора, который отличается от идеального наличием потерь энергии, будет немного больше напряжения U_2 , измеренного на концах вторичной обмотки.

Если рассматривать идеальный трансформатор (без потерь энергии), то напряжения и ЭДС соответствующих обмоток будут равны между собой ($U=E$). Чем меньше потери энергии в трансформаторе, тем меньше отличаются напряжения от соответствующих ЭДС, поэтому в ряде случаев можно пользоваться приближенным равенством:

$$U \approx E$$

При прочих равных условиях число витков первичной обмотки всегда должно быть прямо пропорционально приложенному напряжению, а точнее – ЭДС первичной обмотки. Что касается числа витков вторичной обмотки, то выше уже отмечалось, что оно прямо пропорционально ЭДС вторичной обмотки. Таким образом, приходим к первому основному закону трансформации: ЭДС вторичной обмотки так относится к ЭДС первичной обмотки, как число витков вторичной обмотки к числу витков первичной:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

или, учитывая $U \approx E$, можно воспользоваться приближенным равенством:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

Рассмотрим вначале работу идеального трансформатора под нагрузкой. Если замкнуть вторичную обмотку на нагрузочное сопротивление, то по виткам вторичной обмотки будет проходить переменный ток. Этот ток вызовет появление нового магнитного потока, который по правилу Ленца будет направлен против основного потока и будет стремиться подавить этот основной поток, обеспечивающий трансформацию. Однако ЭДС первичной обмотки, созданная основным потоком и уравновешивающая приложенное напряжение, требует поддержания основного магнитного потока в том виде, каким он был до включения нагрузки. Для этого существует только один путь: одновременно с током нагрузки вторичной обмотки по первичной обмотке также должен протекать соответствующий ток нагрузки, зависящий от вторичного тока, а магнитные потоки, создаваемые этими токами нагрузок, должны быть противоположны по знаку и равны по значению.

Магнитные потоки компенсируют друг друга, в результате чего основной магнитный поток остается без изменения (не подавляется). Такой процесс происходит при работе трансформатора под нагрузкой. Очевидно, что первичная обмотка будет при этом пропускать два тока: ток нагрузки и ток намагничивания, создающий основной поток. Оба тока образуют первичный ток трансформатора. Так как магнитный поток пропорционален произведению тока обмотки на число ее витков (т. е. магнитодвижущей силе обмотки), то условие равенства магнитных потоков нагруженного трансформатора можно записать как:

$$I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2$$

Если пренебречь током намагничивания, который обычно составляет малую долю первичного тока, то можно сформулировать второй основной закон трансформации: ток первичной обмотки так относится к току вторичной обмотки, как число витков вторичной обмотки относится к числу витков первичной:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

Реальный трансформатор

Для того чтобы токи обмоток трансформатора обтекали каждый виток в нужном направлении, необходимо все витки изолировать друг от друга, поэтому обмотки изготавливают из проводов, покрытых снаружи изоляционным слоем эмали, шелка или хлопчатобумажной пряжи. Для уменьшения потерь энергии при трансформировании обмотки чаще всего делают из медного провода, обладающего наименьшим омическим (активным) сопротивлением. В некоторых случаях, с целью экономии дефицитной меди, для обмоток используют алюминиевый провод, сопротивление которого в 1,6 раза больше, чем медного. Естественно, что в этом случае потери энергии в обмотках трансформатора при равенстве сечений проводов возрастают во столько же раз.

Требование о том, чтобы обе обмотки трансформатора полностью охватывались одним и тем же основным магнитным потоком, может быть выполнено только в том случае, когда для магнитного потока будет создан путь с очень малым магнитным сопротивлением. Такой путь мы имеем возможность создать, применяя замкнутый магнитопровод из стали, при этом магнитный поток будет замыкаться внутри этого магнитопровода, не ответвляясь в окружающее пространство, которое представляет для потока большое магнитное сопротивление.

Теперь трансформатор представляется нам в виде стального магнитопровода, на котором располагаются обмотки из медного изолированного провода.

В реальном трансформаторе обнаруживаются некоторые отличия от идеального, на первый взгляд незначительные, но приводящие к ряду затруднений, в преодолении которых и заключается задача конструирования трансформатора.

В реальном трансформаторе медный провод первичной обмотки оказывает определенное сопротивление протекающему току, что вызывает падение напряжения в обмотке ΔU_1 . В результате ЭДС E_1 наводимая в первичной обмотке, должна уравновешивать уже не все приложенное напряжение ΔU_1 , а только ту его часть, которая остается за вычетом падения напряжения ΔU_2 в обмотке; эта особенность реального трансформатора приводит к уменьшению ЭДС первичной обмотки.

Вторичная обмотка также обладает сопротивлением, которое и в этом случае является причиной, вызывающей падение напряжения в обмотке ΔU_2 . Это падение вычитается из ЭДС E_2 , индуцированной во вторичной обмотке. На выводах вторичной обмотки трансформатора действует напряжение U_2 , меньшее, чем ЭДС вторичной обмотки.

В реальном трансформаторе не весь магнитный поток, возбуждаемый первичной обмоткой, пронизывает витки вторичной обмотки, часть магнитного потока замыкается через воздух, оставляя в стороне вторичную обмотку. Это приводит к уменьшению ЭДС вторичной обмотки, что равноценно увеличению падения напряжения. Такое же явление возникает и в том случае, когда магнитный поток вторичной обмотки охватывает не все витки первичной обмотки.

Потери энергии на перемагничивание стального магнитопровода и на создание в нем вредных вихревых токов приводят к возрастанию тока первичной обмотки на значение, необходимое для компенсации этих потерь. Поэтому потери энергии в магнитопроводе вызывают дополнительное увеличение падения напряжения в первичной обмотке.

В отличие от идеального трансформатора в реальном трансформаторе имеются потери энергии в меди, обусловленные падением напряжения в обмотках, и потери энергии в стали, складывающиеся из потерь на перемагничивание и на вихревые токи. Энергия всех этих потерь выделяется в виде теплоты, которая нагревает трансформатор; его температура будет возрастать до тех пор, пока

не установится равновесие между теплотой, выделяемой в трансформаторе, и теплотой, отдаваемой трансформатором во внешнюю среду. Температура трансформатора устанавливается не сразу, сначала она возрастает довольно быстро, а затем ее рост замедляется. Чем больше поверхность охлаждения трансформатора, тем ниже будет его установившаяся температура. Время установления температуры меняется от 1 – 2 ч для маломощных трансформаторов до 20 – 30 ч для трансформаторов большой мощности. Разность между установившейся температурой и температурой окружающей среды пропорциональна потерям энергии и называется превышением температуры трансформатора.

Если реальный трансформатор не нагружен, т. е. работает в режиме холостого хода, то ток первичной обмотки (ток холостого хода) состоит из тока намагничивания, создающего магнитный поток, и тока, компенсирующего потери энергии в стали, а ЭДС и напряжения соответствующих обмоток практически равны между собой. В режиме холостого хода трансформатор нагревается только за счет потерь в стали магнитопровода; потери в меди, вызываемые током холостого хода, очень малы. В нагруженном трансформаторе ток холостого хода суммируется с током нагрузки первичной обмотки.

Напряжения, ЭДС и токи трансформатора удобно представлять в виде векторной диаграммы, на которой все эти величины изображаются векторами определенной длины и направления. На рисунке показана упрощенная векторная диаграмма нагруженного трансформатора, у которого ЭДС вторичной обмотки E_2 в 2 раза больше ЭДС первичной обмотки E_1 , при этом в соответствии со вторым основным законом трансформации ток вторичной обмотки I_2 будет в 2 раза меньше тока первичной I_1 (без учета тока холостого хода). На диаграмме векторами ΔU_1 и ΔU_2 обозначены соответственно падения напряжения в первичной и вторичной обмотках.



Рисунок 2. Упрощенная векторная диаграмма нагруженного трансформатора.

Конструкция трансформатора

Рассмотрим вкратце некоторые вопросы конструкции маломощных трансформаторов, в том числе устройство магнитопроводов и обмоток. Магнитопровод трансформатора должен быть замкнутым стальным. На рисунке показаны наиболее распространенные типы магнитопроводов, применяемые для трансформаторов питания. Чтобы уменьшить потери на перемагничивание стали, для магнитопроводов применяют специальную электротехническую сталь (например, марок 3411 – 3414, 3421 – 3424), представляющую собой сплав железа с 0,5 – 5% кремния. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод набирают из изолированных друг от друга тонких (0,2 – 0,5 мм) пластин (рис.3, а – в) или навивают из изолированной ленты толщиной 0,05 – 0,1 мм (рис.3, г, д), при этом возрастает электрическое сопротивление магнитопровода, что снижает силу вихревых токов и, следовательно, потери.

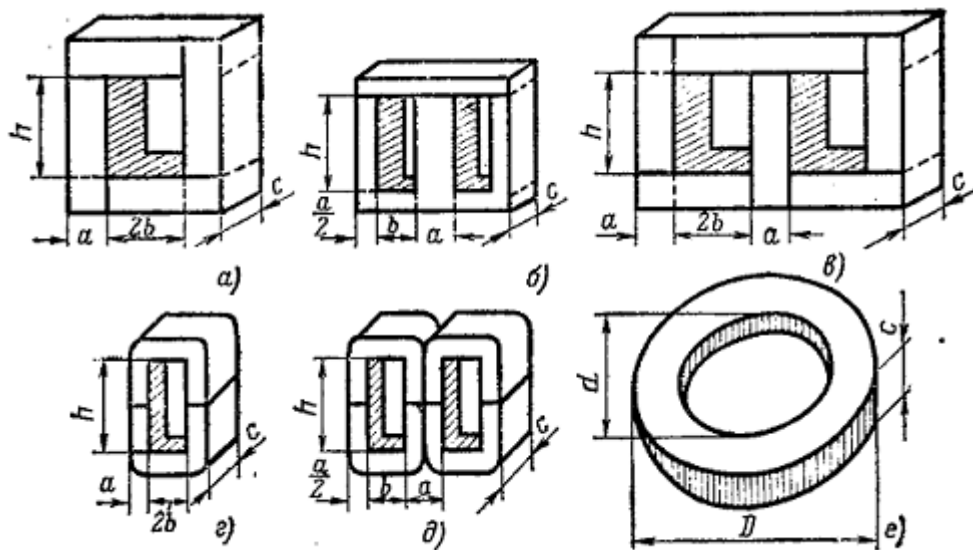


Рисунок 3. Основные типы магнитопроводов.

Для трансформаторов, работающих на повышенных частотах (до 25 кГц) в схемах транзисторных преобразователей напряжения, применяют ленточные кольцевые магнитопроводы (рис.3, е) из специальных сплавов железа с никелем, содержащих от 36 до 80% никеля и некоторые другие элементы (например, молибден, кобальт, хром, марганец). Толщина ленты у этих магнитопроводов лежит в пределах от 0,01 до 0,05 мм. Сплавы указанного типа (например, марок 50НП, 79НМ) называют пермаллоями. Следует иметь в виду, что при уменьшении толщины стали падают потери на вихревые токи, но растут потери на перемагничивание. Поэтому в зависимости от частоты преобразователя следует выбирать материал для магнитопровода такой оптимальной толщины, чтобы уменьшение потерь на вихревые токи не перекрывалось увеличением потерь на перемагничивание.

Магнитопроводы состоят из одного или нескольких стержней и ярма, замыкающего магнитный поток. Сечение ярма обычно равно или несколько больше сечения стержня; в последнем случае ярмо называют усиленным. Кольцевой магнитопровод (рисунок 3, е) можно рассматривать как магнитопровод с одним стержнем. На рисунке все стержни (кроме рисунок 3, е) расположены вертикально. На стержнях размещаются обмотки трансформатора.

На рисунке 3, а, г изображены магнитопроводы стержневого (П-образного типа) с неразветвленной магнитной цепью. Они имеют по два стержня. На рисунке 3, б, д показаны магнитопроводы броневого (Ш-образного) типа с одним стержнем и разветвленной магнитной цепью. Магнитный поток выходит из стержня и разделяется на две части, каждая из которых замыкается через верхнее,

боковое и нижнее ярма. На рисунке 3, в показан трехфазный магнитопровод, имеющий три стержня. Трехфазные трансформаторы с такими магнитопроводами применяют при достаточно больших мощностях в отличие от маломощных однофазных трансформаторов, для которых используются стержневые, броневого и кольцевые магнитопроводы.

Магнитопроводы, показанные на рисунке 3, а – в, изготовляют из штампованных пластин, которые после штамповки обычно отжигают в воздушной среде при 400 – 500 °С для улучшения магнитных свойств. Способ сборки магнитопроводов из таких пластин показан на рисунке 4. Каждый последующий слой перекрывает стыки предыдущего слоя.

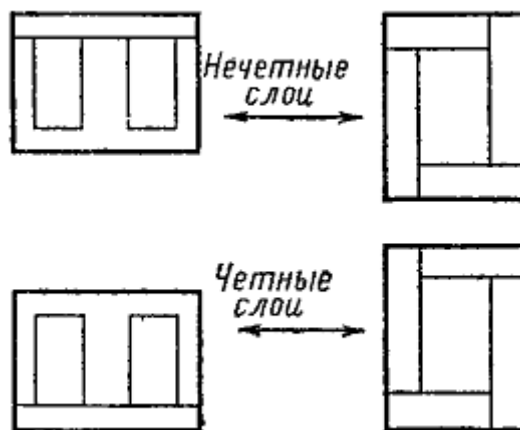


Рисунок 4. Способы сборки магнитопроводов из пластин.

Такой способ называется сборкой внахлестку или вперекрышку. Сборка впритык, когда все слои имеют одинаковый рисунок, создает в местах стыка воздушный зазор, увеличивающий магнитное сопротивление. В связи с этим в небольших магнитопроводах из пластин сборку впритык не применяют. Изоляцией между пластинами обычно служит пленка окиси, которая образуется при изготовлении электротехнической стали на заводе или при отжиге. Для изготовления ленточных разрезных магнитопроводов (рисунок 3, г, д) ленту из электротехнической стали навивают на металлическую оправку, а затем отжигают на воздухе при температуре 400 – 500 °С для улучшения ее магнитных свойств. После этого магнитопровод обволакивают склеивающим составом либо пропитывают лаком, которые скрепляют навитую ленту. Обработанный таким способом магнитопровод разрезается в местах, показанных на рисунке 3, г, д. Магнитопроводы стержневого типа (рисунок 3, г) состоят из двух, а магнитопроводы броневого типа (рисунок 3, д) из четырех П-образных одинаковых частей. В данном случае сборка этих частей производится впритык, так как места стыка хорошо шлифуются друг к другу, а затем склеиваются специальным клеем (карбонильным железом), имеющим малое магнитное сопротивление.

Кольцевые (неразрезные) магнитопроводы из тонких ленточных материалов (пермаллоев) во время навивки покрывают электроизолирующим материалом, а затем отжигают в вакууме при 1000 – 1100° С. Разрезать такие магнитопроводы нельзя, так как при этом значительно ухудшаются их магнитные свойства. Пермалловые магнитопроводы очень чувствительны к механическим деформациям и ударам, которые заметно ухудшают их магнитные свойства. Поэтому такие магнитопроводы обычно помещают в пластмассовые коробки с мягкими (резиновыми) уплотнительными прокладками. Коробки герметизируются для защиты магнитопроводов от попадания в них пропиточных материалов, используемых при изготовлении трансформатора, которые могут вызвать механические деформации магнитопровода при колебаниях окружающей температуры.

Для обмоток трансформаторов питания чаще всего применяются провода круглого или прямоугольного сечения с высокопрочной эмалевой изоляцией марки ПЭВ. Провода прямоугольного сечения (например, марки ПЭТВП) применяют только при больших токах обмоток (свыше 15 – 20 А). В некоторых случаях при высоких рабочих напряжениях применяют провода с комбинированной изоляцией: с эмалешелковой (ПЭШО, ПЭШД) и с эмалехлопчатобумажной (ПЭБО, ПЭБД). Такая изоляция повышает электрическую прочность обмоток, но уменьшает коэффициент заполнения окна магнитопровода. В таблице 1 приведены стандартные диаметры проводов марки ПЭВ-2; диаметры проводов даны без изоляции.

Таблица 1. Провод обмоточный медный марки ПЭВ-2.

Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение, мм ²	Сопротивление 100 м провода, Ом	Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение, мм ²	Сопротивление 100 м провода, Ом
0,050	0,00196	879,08	0,75	0,442	3,90
0,063	0,00312	552,24	0,80	0,503	3,43
0,071	0,00396	435,10	0,85	0,567	3,04
0,080	0,00503	342,54	0,90	0,636	2,71
0,090	0,00636	270,91	0,95	0,709	2,43
0,100	0,00785	219,49	1,00	0,785	2,19
0,112	0,00985	174,89	1,06	0,882	1,95
0,125	0,01227	140,40	1,12	0,985	1,75
0,140	0,01539	111,93	1,18	1,094	1,58
0,160	0,02011	85,69	1,25	1,227	1,40
0,180	0,02545	67,71	1,32	1,368	1,26
0,200	0,03142	54,84	1,40	1,539	1,12
0,224	0,03941	43,72	1,50	1,767	0,98
0,250	0,04909	35,10	1,60	2,011	0,86
0,280	0,06158	27,98	1,70	2,270	0,76
0,315	0,07793	22,11	1,80	2,545	0,68
0,355	0,09898	17,41	1,90	2,835	0,61
0,400	0,12566	13,71	2,00	3,142	0,55
0,450	0,15904	10,83	2,12	3,530	0,49
0,500	0,19635	8,78	2,24	3,941	0,44
0,560	0,24630	7,00	2,36	4,374	0,39
0,630	0,31172	5,53	2,50	4,909	0,35
0,710	0,39592	4,35			

Если провода прямоугольного сечения отсутствуют, можно использовать круглые провода меньшего сечения, при этом наматывают две или более обмоток из одинакового круглого провода с одинаковым числом витков, равным расчетному. Суммарное сечение проводов этих обмоток должно быть возможно ближе к расчетному; все эти одинаковые обмотки соединяют параллельно.

После намотки катушки и закрепления выводов на лепестках (или на других выводных приспособлениях) катушка обычно обматывается несколькими слоями изоляционной бумаги или хлопчатобумажной ленты для защиты от механических повреждений и для улучшения электрической изоляции.

Для придания влагостойкости и создания монолитности катушки после намотки пропитываются специальными лаками и компаундами (например, марки ЭД-6). Высоковольтные трансформаторы (с напряжением несколько тысяч вольт) помещают целиком в трансформаторное масло, которое является хорошим изолятором, предохраняющим от пробоев, и одновременно хорошим проводником теплоты, улучшающим охлаждение трансформатора.

Для защиты трансформаторов от внешних воздействий (влаги, инея, росы, тумана, пыли) принимают различные меры в зависимости от интенсивности и продолжительности этих воздействий. При наиболее тяжелых внешних условиях применяют вакуумную герметизацию, при которой катушку и магнитопровод помещают в металлический кожух и заливают компаундом. Для менее трудных условий работы производят обволакивание (капсулирование) всего трансформатора слоем компаунда толщиной 1 – 3 мм. Для уменьшения массы можно покрывать компаундом не всю поверхность трансформатора, а защищать только наиболее уязвимые места – торцы катушек, места выхода контактов, зазоры между магнитопроводом и катушкой. Остальные поверхности покрывают влагостойкой эмалью и покровным лаком.

Для аппаратуры, работающей в комнатных условиях, достаточно пропитать катушку или весь трансформатор специальным лаком, обеспечивающим защиту, достаточную для этих условий. Все способы защиты трансформаторов от внешних воздействий одновременно обеспечивают монолитность, а, следовательно, и нужную механическую прочность конструкции.

Основные определения и расчетные соотношения

Для полного расчета трансформатора необходимо выполнить сначала электрический, а затем конструктивный расчеты. Электрический расчет заключается в выборе схемы трансформатора, определении напряжений и токов обмоток, нахождения коэффициентов трансформации мощности обмоток и габаритной мощности трансформатора. После конструктивного расчета уточняются падения напряжения в обмотках и потери в магнитопроводе и в меди, которые на этапе электрического расчета определяются приближенно.

Коэффициентом трансформации трансформатора n называется отношение числа витков вторичной обмотки ω_2 к числу витков первичной обмотки ω_1 . Если трансформатор имеет несколько вторичных обмоток, то различают несколько коэффициентов трансформации: n_2, n_3, \dots , определяемых как отношение чисел витков соответствующих обмоток $\omega_2, \omega_3, \dots$ к числу витков первичной обмотки. На основании первого основного закона трансформации можно представить коэффициенты трансформации как отношения соответствующих ЭДС:

$$n_2 = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{E_2}{E_1}; \quad n_3 = \frac{\omega_3}{\omega_1} = \frac{E_3}{E_1}; \quad n_4 = \frac{\omega_4}{\omega_1} = \frac{E_4}{E_1} \dots$$

В тех случаях, когда значения ЭДС неизвестны, можно воспользоваться приближенными формулами, имея в виду, что ЭДС мало отличается от напряжения обмотки

$$n_2 \approx \frac{U_2}{U_1}; \quad n_3 \approx \frac{U_3}{U_1} \dots$$

В соответствии со вторым основным законом трансформации можно получить следующее соотношение между токами первичной и вторичной обмоток:

$$I_1 \approx I_2 n_2$$

Знак приближенного равенства поставлен потому, что в этом выражении не учитывается ток холостого хода трансформатора. Если трансформатор имеет несколько вторичных обмоток, то ток первичной обмотки состоит из суммы токов, вызванных токами каждой вторичной обмотки:

$$I_{\text{общ.}} \approx I_{1,2} + I_{1,3} + I_{1,4} + \dots = I_2 n_2 + I_3 n_3 + I_4 n_4 + \dots$$

В этом выражении также не учитывается ток холостого хода. Сопоставляя выражения представленные выражения, легко получить известное соотношение:

$$I_{\text{общ.}} E_1 \approx I_2 E_2 + I_3 E_3 + I_4 E_4 + \dots$$

Учитывая выше сказанное, можно записать:

$$I_{\text{общ.}} U_1 \approx I_2 U_2 + I_3 U_3 + I_4 U_4 + \dots$$

Последние два выражения формулируются следующим образом: мощность первичной обмотки равна сумме мощностей всех вторичных обмоток (без учета тока холостого хода). Здесь необходимо сделать важную оговорку. Когда форма тока первичной обмотки совпадает с формой тока вто-

ричной обмотки (или с формой, полученной в результате суммирования токов всех вторичных обмоток). Это условие выполняется при нагрузке вторичных обмоток на линейные цепи, например на цепи накала ламп, на нагревательные приборы, на двигатели переменного тока.

Если же формы токов первичной и вторичной обмоток не совпадают, то мощности этих обмоток, как правило, не равны между собой. Различная форма токов в обмотках может наблюдаться в тех случаях, когда в цепь вторичной (или первичной) обмотки включены нелинейные элементы, в частности приборы с односторонней проводимостью, – диоды, тиристоры, транзисторы. Поэтому у трансформаторов, работающих в некоторых (но не во всех!) схемах выпрямителей и транзисторных преобразователей, мощности первичной и вторичной обмоток отличаются друг от друга.

Трансформаторы характеризуются мощностью, которую они могут передать в нагрузку. Эта мощность измеряется в вольт-амперах, а не в ваттах по следующей причине. Как известно, мощность в ваттах определяется произведением напряжения на силу тока и на косинус угла сдвига фаз между ними: $P=U^2I^2\cos\varphi$. Если нагрузка кроме активного сопротивления содержит индуктивность или емкость, то $\cos\varphi$ будет меньше единицы и действительная мощность (в ваттах), выделяемая в нагрузке, будет меньше произведения U^2I^2 . Однако обмотка трансформатора, имеющая напряжение U^2 , будет при этом нагружена током I^2 , независимо от значения $\cos\varphi$. Иначе говоря, трансформатор может отдать в нагрузку ток I^2 при напряжении U^2 независимо от того, какова будет действительная мощность, выделяемая в нагрузке. Поэтому произведение U^2I^2 , называемое полной мощностью и измеряемое в вольт-амперах (В·А), характеризует трансформатор с точки зрения мощности, которую он может отдать в нагрузку. Габаритные размеры трансформатора зависят от так называемой габаритной мощности трансформатора, которая равна полусумме мощностей всех его обмоток:

$$P_{габ.} = \frac{1}{2}(U_1I_{1общ} + U_2I_2 + U_3I_3 + \dots)$$

Очевидно, что если трансформатор имеет две обмотки, мощности которых равны между собой, то габаритная мощность такого трансформатора будет равна мощностям первичной или вторичной обмоток:

$$P_{габ} = U_1I_1 = U_2I_2$$

Если трансформатор имеет отводы от первичной обмотки (например, для включения в сеть 127 или 220 В) или от вторичных обмоток, то для расчета габаритной мощности в (9) следует подставлять мощности всех частей обмоток, находящихся между отводами трансформатора, независимо от того, работают ли они в данном случае или нет. Конструктивный расчет трансформатора заключается в выборе магнитопровода и определении чисел витков обмоток и диаметров проводов. Основное соотношение, связывающее число витков с напряжением и другими параметрами трансформатора, имеет вид:

$$\omega = \frac{E \cdot 10^4}{4,44 f B Q_c k_c}$$

Где:

f – частота питающей сети, Гц;

B – магнитная индукция в магнитопроводе, Тл;

Q_c – полное сечение стержня магнитопровода, см²;

k_c – коэффициент заполнения магнитопровода сталью.

Индукция В представляет собой число линий магнитного потока, Φ , проходящих через один квадратный сантиметр сечения магнитопровода, единицей магнитной индукции является тесла (Тл). Значения В выбирают чаще всего в пределах от 0,8 до 1,2 Тл. Чем больше мощность трансформатора, тем меньшее значение индукции надо выбирать. Значения В в зависимости от некоторых параметров трансформатора приведены в табл. 8. Увеличение индукции В свыше рекомендуемых значений ведет к перегреву трансформатора. При f 50 Гц обычно используется электротехническая сталь толщиной 0,35 – 0,6 мм, а при f – 400 Гц 0,08 – 0,2 мм. Коэффициент k_m дан для проводов с эмалевой изоляцией; для проводов с шелковой или хлопчатобумажной изоляцией снижается в 1,2 – 1,5 раза.

Таблица 2. Рекомендуемые значения индукции, плотности тока, КПД и коэффициента заполнения окна.

Габаритная мощность $P_{\text{габ}}, \text{В} \cdot \text{А}$	Индукция В, Тл		Плотность тока J, А/мм ²		КПД η		Коэффициент заполнения окна k_m
	Частота сети f		Частота сети f		Частота сети f		
	50 Гц	500 Гц	50 Гц	500 Гц	50 Гц	500 Гц	
10	1,1	1,0	4,8	7,0	0,82	0,80	0,23
20	1,3	1,1	3,9	6,0	0,85	0,83	0,26
40	1,4	1,2	3,2	5,0	0,87	0,85	0,28
70	1,4	1,3	2,8	4,2	0,89	0,87	0,30
100	1,4	1,2	2,5	3,8	0,91	0,89	0,31
200	1,3	1,1	2,0	3,1	0,93	0,91	0,32
400	1,2	1,0	1,6	2,5	0,85	0,92	0,33
700	1,1	0,9	1,3	2,1	0,96	0,93	0,33
1000	1,1	0,8	1,2	1,8	0,96	0,93	0,34

Сечение стержня Q_c определяют как:

-для магнитопроводов стержневого и броневые типов

$$Q_c = a \cdot c$$

-для кольцевых магнитопроводов.

$$Q_c = (D - d) \frac{c}{2}$$

Коэффициент заполнения магнитопровода сталью k_c показывает, какую часть полного сечения стержня Q_c занимает магнитный материал (сталь). Имеется в виду, что остальная часть сечения приходится на изоляцию пластин или ленты. Для трансформаторов из материала толщиной не менее 0,08 мм:

$$k_c = \frac{Q_{\text{стали}}}{Q_c} = 0,85 \div 0,95$$

Для кольцевых магнитопроводов из тонкой ленты:

$$k_c = 0,74 \div 0,75$$

Из этого можно сделать некоторые важные выводы. Во-первых, число витков ω пропорционально ЭДС соответствующей обмотки E ; во-вторых, чем больше частота сети f и сечение стержня магнитопровода Q_c , тем меньше витков будут иметь обмотки. Для трансформаторов питания, работающих от сети с частотой 50 Гц, формулу можно значительно упростить:

$$\omega \approx 45 \frac{E}{Q_c}$$

Так как при расчете трансформатора обычно задают напряжение обмоток U , а не ЭДС E , то в первом приближении можно воспользоваться выражениями:

для первичной обмотки $E_1 = 0,95U_1$

для вторичных обмоток $E_2 = 1,05U_2$

Диаметр проводов обмоток (без изоляции) определяют из выражения:

$$d = 1,13 \sqrt{\frac{I}{J}}$$

Где
 d – диаметр провода без изоляции, мм
 I – ток, текущий по обмотке, А
 J – плотность тока в обмотках, измеряемая в амперах на квадратный миллиметр сечения провода (без изоляции), А/мм²

Значения допустимых плотностей тока J , зависящие от мощности трансформатора питания и других его параметров, приводятся в таблице 3.

При увеличении плотности тока свыше допустимой трансформатор будет перегреваться. Для маломощных трансформаторов, работающих от сети с частотой 50 Гц, можно воспользоваться приближенной формулой:

$$d \approx 0,7 \sqrt{I}$$

Выбор магнитопровода производится с помощью выражения:

$$Q_c Q_o = \frac{P_{с\text{аб}} \cdot 10^2}{2,22 f B J \eta s k_c k_m}$$

Где:
 Q_o – площадь окна магнитопровода, приходящаяся на обмотки одного стержня, см²;
 η – коэффициент полезного действия трансформатора;
 s – число стержней, несущих обмотки;
 k_m – коэффициент заполнения окна медью обмотки.
 Остальные обозначения известны из предыдущего текста.

Площадь окна Q_o магнитопроводов стержневого и броневого типов

$$Q_o = b \cdot h$$

Площадь окна Q_o кольцевых сердечников

$$Q_o = \frac{\pi d^2}{4}$$

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора η , представляющий собой отношение отдаваемой мощности к потребляемой, обычно довольно высока и лежит в пределах 0,85 – 0,95, чем больше мощность трансформатора, тем выше его КПД.

Число стержней s трансформатора броневое типа равно единице, стержневого типа (с двумя катушками) – двум и трехфазного – трем. Для тороидальных трансформаторов $s=1$. Магнитопроводы стержневого типа ($s = 2$) обычно применяют при мощностях более 250 – 300 В·А и частоте сети 50 Гц, а также в тех случаях, когда нужно улучшить охлаждение обмоток.

Коэффициент заполнения окна k_m показывают, какую часть площади окна магнитопровода занимает чистая медь проводов обмотки (без изоляции). Так как кроме изоляции проводов (обычно эмалированных) катушка имеет межслоевую и межобмоточную изоляцию, а намотка производится на гильзу или на каркас, то все эти виды изоляции занимают значительную часть площади окна и коэффициент заполнения окна медью получается небольшим.

$$k_m = \frac{Q_{\text{медь}}}{Q_o} = 0,25 \div 0,35$$

Обычно чем больше мощность трансформатора, тем больше k_m . Значения КПД и коэффициента заполнения окна, зависящие от некоторых параметров трансформатора, приведены в таблице 2.

Если маломощный трансформатор работает от сети с частотой 50 Гц, то равенство можно упростить следующим образом:

-для трансформаторов броневой конструкции:

$$Q_c Q_o \approx 1,15 P_{\text{габ}}$$

-для трансформаторов стержневой конструкции:

$$Q_c Q_o \approx 0,6 P_{\text{габ}}$$

Значение габаритной мощности $P_{\text{габ}}$ в формулах, указывается в вольт-амперах.

Зная произведение $Q_c Q_o$, можно выбрать стандартный магнитопровод, при этом выбранный магнитопровод должен иметь произведение $Q_c Q_o$ не меньше расчетного значения. Если имеется возможность изготовить пластины из трансформаторной стали, то размеры магнитопровода можно определить с помощью формул, в которых все линейные размеры указаны в сантиметрах (см. рис. 3):

$$a \approx 0,74 \sqrt[4]{Q_c Q_o}; \quad b = a$$

$$c = 1,5a; \quad h = 2,5a$$

Так как сечение стержня Q_c и площадь окна Q_o в конечном счете определяют габаритные размеры трансформатора, то выражение:

$$Q_c Q_o = \frac{P_{\text{габ}} \cdot 10^2}{2,22 f B J \eta s k_c k_m}$$

показывает связь этих размеров с параметрами трансформатора. Ввиду того, что рекомендуемые значения индукции B и плотности тока J лежат в сравнительно узких пределах, основное влияние на габаритные размеры оказывают габаритная мощность трансформатора $P_{\text{габ}}$ и частота питающей сети f . С увеличением $P_{\text{габ}}$ размеры трансформатора растут, а с увеличением f снижаются. Последнюю (частотную) зависимость часто используют для уменьшения массы и объема специальной аппаратуры. Так, источники вторичного электропитания самолетной аппаратуры, для которых уменьшение массы и габаритов играет весьма существенную роль, питаются от специальных самолетных генераторов, которые вырабатывают переменное напряжение с частотой 400 Гц. Такое повышение частоты (по сравнению с частотой 50 Гц) не только значительно уменьшает массу трансформаторов (в 4 – 5 раз), но также резко снижает массу и объем сглаживающих фильтров выпрямителей.

После конструктивного расчета трансформатора по приближенным формулам полезно проверить коэффициент заполнения окна медью k_m . Для трансформаторов броневой и стержневой конструкций:

$$k_m = 8 \cdot 10^{-3} \frac{d_1^2 \omega_1 + d_2^2 \omega_2 + d_3^2 \omega_3 + \dots}{Q_o}$$

Для проводов с эмалевой изоляцией значение k_m не должно превышать 0,3.

Для тороидальных трансформаторов на кольцевых магнитопроводах с внутренним диаметром d :

$$k_m = \frac{d_1^2 \omega_1 + d_2^2 \omega_2 + d_3^2 \omega_3 + \dots}{100d^2}$$

В этом случае коэффициент k_m не должен превышать 0,2.

Если рассчитанные по формулам коэффициенты заполнения превышают указанные значения, то это указывает на трудность (или невозможность) размещения обмоток в окне магнитопровода. В таком случае следует сделать перерасчет трансформатора для уменьшения числа витков или диаметра проводов обмоток; для этого можно немного увеличить индукцию B , или плотность тока J , или то и другое вместе.

Пример расчета трансформатора

В качестве примера рассмотрим расчет трансформатора со следующими характеристиками:

Параметр	Значение	Схема
Входное напряжение	230,0 Вольт	
Выходное напряжение	5,7 Вольт	
Выходной ток	1,0 Ампер	

В наличии имеется Ш – образный магнитопровод со следующими данными (рисунок 3, б):

Параметр	Значение
Ширина керна(а)	1,3 см
Ширина окна(б)	0,8 см
Толщина пакета(с)	2,8 см
Высота окна(н)	2,1 см

1) Определим напряжения и ЭДС обмоток (5% поправка на проседание напряжения):

$$E_1 = 0,95 \cdot 230V = 218,5V$$

$$E_2 = 1,05 \cdot 5,7V = 5,985V$$

2) Найдем действующие значения токов в обмотках:

$$I_{1,2} = 1A \cdot \frac{5,985V}{218,5V} = 0,0274A$$

$$I_{сумм} = I_{1,2} = 0,0274A$$

3) Найдем габаритную мощность трансформатора:

$$P_{габ} = \frac{1}{2} (230V \cdot 0,0274A + 1A \cdot 5,7V) = 6,00V \cdot A$$

4) Найдем габариты сердечника. Справочные величины см. в таблице 2:

Коэффициент заполнения сталью примем равным 0,9.

$$Q_c Q_o = \frac{6,00V \cdot A \cdot 10^2}{2,22 \cdot 50Gц \cdot 1,1Tл \cdot 4,8A / мм^2 \cdot 0,82 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 0,23} = 6,03см^4$$

5) Оценим габаритные параметры имеющегося сердечника:

$$Q_c Q_o = a \cdot b \cdot c \cdot h = 1,3см \cdot 0,8см \cdot 2,8см \cdot 2,1см = 6,11см^4$$

Видно, что он подойдет, но запаса почти нет.

6) Находим число витков обмоток:

$$\omega_1 = \frac{218,5V \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50Gц \cdot 1,1Tл \cdot 1,3см \cdot 2,8см \cdot 0,9} = 2732витка$$

$$\omega_2 = 2732витка \cdot \frac{5,985V}{218,5V} = 75витков$$

7) Находим минимальные диаметры проводов:

$$d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{0,0274A}{4,8A / мм^2}} = 0,085мм$$

$$d_2 = 1,13 \sqrt{\frac{1A}{4,8A / мм^2}} = 0,52мм$$

В качестве проводов возьмем ПЭВ-2 0,12 мм и 0,56 мм соответственно, т.к. они есть в наличии.

8)Проверяем коэффициент заполнения окна медью:

$$k_m = 8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(0,12 \text{ мм})^2 \cdot 2732 \text{ витков} + (0,56 \text{ мм})^2 \cdot 75 \text{ витков}}{2,1 \text{ см} \cdot 0,8 \text{ см}} = 0,3$$

Достаточно тесно, но должно поместиться.

Таблица 3. Намоточные данные

Параметр	Значение
Входное напряжение	230 Вольт
Выходное напряжение	5,7 Вольт
Выходной ток	1 Ампер
Число витков первичной обмотки	2732 витка
Число витков вторичной обмотки	75 витков
Диаметр первичной обмотки по меди	0,12 мм
Диаметр вторичной обмотки по меди	0,56 мм