

А. В. Трамбицкий

Расчет трансформаторов

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 62
ББК 30.6
А11

A11 **А. В. Трамбицкий**
Расчет трансформаторов / А. В. Трамбицкий – М.: Книга по Требованию, 2024. – 382 с.

ISBN 978-5-458-25063-4

В книге излагается систематический метод расчета трансформаторов разных типов. Основное назначение книги - служить учебным пособием для энергетических вузов; поэтому в книге даются не только методы расчета, но приводятся примеры комбинирования и расположения всех расчетов. Одновременно книга является справочным пособием по расчету трансформаторов для начинающих расчетчиков и всех электриков, которым приходится иметь дело с ремонтом и переделкой трансформаторов. Пользуясь прилагаемым формулляром и примерами, читающий изучает отдельные места книги по мере продвижения расчета. К книге приложены относящиеся к примерам чертежи и справочные таблицы.

ISBN 978-5-458-25063-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригиналe, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

	Стр.
§ 70. Кривые холостого хода	183
§ 71. Джоулевы потери в обмотках	184
§ 72. Добавочные потери в обмотках при нагрузке	185
§ 73. Прочие добавочные потери при нагрузке	188
§ 74. Общие потери и их зависимость от нагрузки	189
§ 75. К. п. д. трансформатора	189
<i>С. Напряжение короткого замыкания и изменение напряжения</i>	
§ 76. Активные сопротивления обмоток	190
§ 77. Напряжение короткого замыкания и треугольник короткого замыкания	191
§ 78. Процентное изменение напряжения	192
Глава X. Тепловые расчеты трансформаторов	
§ 79. Источники тепла в трансформаторах; охлаждающая среда	193
§ 80. Путь теплового потока; общая картина распределения перепадов температур в трансформаторах	193
§ 81. Допустимые по нормам температуры и превышения температуры	196
§ 82. Процессы передачи тепла в трансформаторах	197
§ 83. Естественная и принудительная циркуляция охлаждающей среды	205
§ 84. Удельная тепловая нагрузка поверхности охлаждения	205
§ 85. Охладительные каналы и охладительные листы	208
§ 86. Распространение тепла в сердечнике и перепад температуры на его поверхности	210
§ 87. Перепад температуры на поверхности обмоток	215
§ 88. Внутренний перепад температуры в сердечнике	217
§ 89. Внутренний перепад температуры в обмотках	219
§ 90. Перепад температуры от масла к стенке охладителя	223
§ 91. Перепад температуры от стенки охладителя к окружающему воздуху	223
§ 92. Кривые нагревания и охлаждения	224
§ 93. Постоянные нагревания трансформатора	226
§ 94. Основные следствия уравнения нагревания трансформатора	227
§ 95. Зависимость превышения температуры трансформатора от его нагрузки	230
§ 96. Повышение температуры обмоток при коротких замыканиях	231
Глава XI. Тепловые расчеты баков и охладительных систем	
§ 97. Определение размеров баков и кожухов	233
§ 98. Баки гладкие	235
§ 99. Баки в листы	236
§ 100. Баки трубчатые	239
§ 101. Баки радиаторные и отдельно стоящие радиаторные охладители	241
§ 102. Действие добавочного обдувания	242
§ 103. Расчет внутреннего водяного охлаждения	245
§ 104. Расчет охладителей с принудительной циркуляцией масла	247
Глава XII. Механические расчеты деталей трансформаторов	
§ 105. Механические силы, действующие при коротких замыканиях	250
§ 106. Действие механических сил на обмотки трансформаторов	253
§ 107. Механические расчеты других деталей трансформаторов; детали баков	259
§ 108. Подсчет веса трансформатора, его частей и масла	261

Часть третья

ФОРМУЛЯР И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

§ 109. Формуляр по расчету стержневого трансформатора с круглыми концентрическими обмотками	263
§ 110. Пример 1. Расчет трехфазного трансформатора 50 kVA, 10 000/400 V, 50 Hz с естественным масляным охлаждением	274

	Стр.
§ 111. Пример 2. Расчет трехфазного трансформатора 50 kVA, 500/230 V 50 Hz с естественным воздушным охлаждением	293
§ 112. Пример 3. Расчет однфазного трехобмоточного трансформатора 5000/3000/3000 kVA, $\frac{110}{\sqrt{3}} / \frac{33}{\sqrt{3}} / 6,6$ kV, 50 Hz с естественным масляным охлаждением	
§ 113. Пример 4. Расчет однофазного трансформатора 0,5 kVA, 500/230 V, 50 Hz с естественным воздушным охлаждением	314
Указатель литературы	329

Приложения

Таблица I. Основные данные силовых трехфазных трансформаторов с естественным масляным охлаждением для частоты 50 Hz в исполнении МТЗ.

Таблица II. Основные данные мощных трансформаторов для частоты 50 Hz в исполнении МТЗ.

Таблица III. Физические постоянные некоторых материалов (проводники).

Таблица IV. Физические постоянные некоторых материалов (изоляторы).

Таблица V. ОСТы электротехнические и некоторые другие, относящиеся к трансформаторам.

Чертеж I. Общий вид трехфазного трансформатора 50 kVA, 10 000/400 V, 50 Hz с естественным масляным охлаждением.

Чертеж II. Общий вид трехфазного трансформатора 50 kVA, 500/230 V, 50 Hz с естественным воздушным охлаждением.

Чертеж III. Общий вид однофазного трехобмоточного трансформатора 5000/3000/3000 kVA, $\frac{110}{\sqrt{3}} / \frac{33}{\sqrt{3}} / 6,6$ kV, 50 Hz с естественным масляным охлаждением.

Чертеж IV. Детали к чертежу III.

ОСТ 2524. Трансформаторы силовые масляные.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Среди существующей технической литературы, как русской, так и иностранной, до сих пор не было учебного пособия, посвященного специально расчету трансформаторов. В большинстве как классических, так и новых книг эта тема затрагивается или в конце изложения теории трансформаторов [Л. 2, 11, 11а], или даже вкрапливается среди общего материала, охватывающего как машины, так и трансформаторы [Л. 21].

Учащиеся, впервые приступающие к расчету, имея даже достаточное количество сведений, но не обладая опытом по расчету, не умеют пользоваться этими сведениями, так как не знают, с чего начать и как расположить расчеты, чтобы избежать чрезмерного количества изменений и переделок. В проходимых же теоретических дисциплинах подобные указания не даются, да и не могут даваться.

Для некоторой ориентировки учащихся автором, руководящим в течение ряда лет проектированием трансформаторов в Электротехническом институте им. В. И. Ленина и в Индустриальном институте им. М. И. Калинина, еще в 1931 г. была выпущена брошюра „Расчет трансформаторов стержневого типа“, принесшая свою долю пользы.

Брошюра, как и данная книга, основывается на методе расчета трансформаторов, впервые предложенном автором еще в 1926 г. [Л. 33]. Основная его мысль очень проста. Поскольку индуктивность e_s трансформатора является заданной прямо или косвенно (требование параллельной работы), эта величина должна быть положена в основу расчетов, так как она находится в тесной связи с рядом других величин, определяющих весь трансформатор. Этим методом автор пользуется сам, работая в области трансформаторостроения 15 лет; этот же метод принят с тех пор и в ряде других руководств [Л. 10, 12, 17]. Второй основой для расчетов является обеспечение для обмоток достаточной поверхности охлаждения.

Книга состоит из трех совершенно различных частей. Часть первая изложена систематически и предназначена для ознакомления с терминологией, с конструкциями и методами расчета. Вторая часть имеет справочный характер; каждая из глав трактует об одном из основных вопросов детального расчета. Эта часть полна ссылок на разные места книги и на литературу.

Ссылки, правда, затрудняют чтение, но неизбежны для взаимной связи глав и параграфов. Третья часть содержит формуляр для расчета, примеры и приложения.

Для начинающих автор рекомендует концентрический охват расчета в три стадии: разбор задания, предварительный расчет и детальный расчет. Это может показаться чрезмерно громоздким, однако ничего нового в этом нет. Совершенно так же поступает всякий, даже опытный проектировщик при расчете новой конструкции; но он проводит начальные стадии расчета иногда прямо в уме, без всякой видимой системы комбинируя и увязывая многие факторы сразу. Ничего подобного не может делать тот, кто приступает к расчетам впервые; о подобном подходе к расчету он даже не подозревает, тем более, что всякая конструкция для него является новой. Параграф 16 книги, посвященный разбору и оценке задания, помогает разобраться в задании и подумать над ним прежде, чем приступить к расчету. Далее, при предварительном расчете начинающий еще нуждается в направляющих указаниях, даваемых при каждом пункте формуляра, но уже получает понятие (§ 17) о гибкости и вариированности расчетов. При детальном расчете после некоторого ознакомления с методами расчета и с самой книгой читатель уже вовсе освобождается от „опеки“; против соответствующих пунктов формулера даются лишь ссылки на параграфы, трактующие о данном расчете.

Автор придерживается того взгляда, что расчет почти неотделим от конструирования, и рекомендует параллельно с расчетом составление эскизов рассчитываемой конструкции. Поэтому в книгу пришлось включить и некоторые элементы конструирования, несмотря на наличие специальных пособий по этому вопросу [Л. 28].¹

Небольшой объем книги и отсутствие подобных руководств затрудняли автора в подборе материала. Большая часть формул приведена без выводов, относящихся к общей теории трансформаторов; несколько подробнее затронуты вопросы нагревания и охлаждения, которым часто уделяется недостаточно внимания. Расчет нагревания сердечника (§ 86) приведен для указания метода подобных расчетов. Расчет большого трехобмоточного трансформатора (пример 3) из-за недостатка места не мог быть приведен полностью.

Автор просит также глубокую благодарность проф. Г. Н. Петрову и инж. М. А. Астащеву, прочитавшим рукопись и сделавшим ряд ценных указаний, и Т. А. Трамбицкой, разделившей труд автора в отношении изготовления рисунков и оформления рукописи.

A. Трамбицкий

¹ См. также [Л. 24].

Часть первая

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА

ГЛАВА I

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ

§ 1. Указания начинающим

1. Нельзя приступать к проектированию, не только детальному, но и предварительному, не выяснив раньше основных черт проектируемого трансформатора, т. е. не представив себе, как могут выглядеть его сердечник, обмотки и т. д. Например, обмотки на 10, 500 или 1000 А будут иметь совсем различный вид. За отсутствием опыта начинающий должен стараться познакомиться с конструкциями трансформаторов хотя бы по описаниям настоящей книги (§ 3—4), или по атласу [Л. 24], или по иным описаниям [Л. 25—32]. Более опытному глазу многое говорит иногда даже фотография активной части трансформатора (примерный масштаб фотографии иногда можно бывает определить). Так поступает даже опытный проектировщик при расчете совсем новой конструкции, не глядя о том, что он старается не упустить случая посмотреть в натуре конструкции разных заводов и фирм, в особенности конструкции, потерпевшие аварию. Ибо всякая авария является результатом чего-то непредвиденного, какой-то ошибки, а на ошибках мы учимся.

Предварительное выяснение основных черт проектируемого трансформатора производится по указаниям § 16.

2. Чем меньше опыта у рассчитывающего, тем больше следует соблюдать систематичность во всех расчетах. До тех пор, пока окончательно не выяснены основные размеры и величины, не следует увлекаться возможностью подсчета разных второстепенных величин и деталей, хотя бы и казалось, что уже имеются все данные для таких расчетов. Почти наверное потраченный труд будет напрасным; в конечном счете все расчеты придется переделывать. Порядок расчета, рекомендуемый для начинающих, указан в § 13.

3. Следует иметь в виду, что путем одного расчета, даже по самым наилучшим и вернейшим формулам и таблицам, нельзя спроектировать вполне пригодный и выполнимый трансформатор; на первых же стадиях проектирования необходимо делать эскизы. Имея в виду сказанное в п. 2, следует начинать с важнейших деталей трансформатора: обмотки, ее изоляции, сердечника и т. д., переходя затем к баку и другим механическим

частям. Составление эскизов помогает во время заметить необходимость изменения некоторых размеров трансформатора, иногда даже основных; путем тех же эскизов может быть обнаружена крупная ошибка в расчетах или допущениях, которая иначе могла бы остаться незамеченной до самого конца расчета.

Таким именно образом, комбинируя расчет и конструирование и применяя метод последовательных приближений, и рекомендуется начинающему вести расчет.

4. Приложенным к книге формуларом (§ 109) следует пользоваться обдуманно, а не механически, и все время вести сравнение получаемых величин с данными выполненных трансформаторов (табл. I и II в приложении). Разумеется, никакого „закона“ данный формулар отнюдь не представляет; расчеты можно вести и в ином порядке.

§ 2. Основная терминология для трансформаторов и их деталей; типы трансформаторов

1. По числу фаз следует различать трансформаторы *однофазные* и *многофазные* (чаще трехфазные).

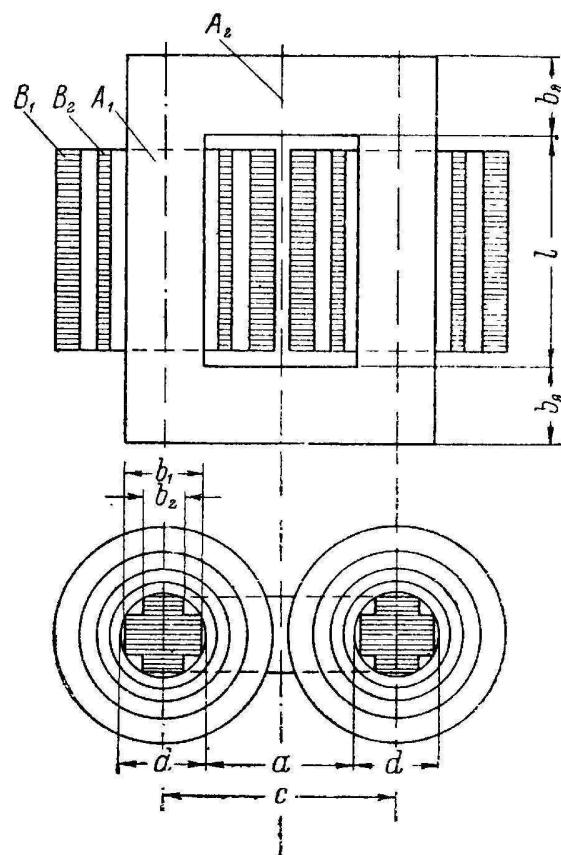


Рис. 1. Однофазный стержневой трансформатор с концентрическими обмотками.

5. Рабочая часть трансформатора, состоящая, как правило, из частей *A, B, C, D* и *F* (см. предыдущий пункт), будет именоваться

2. Если трансформация трехфазного тока совершается при помощи трех однофазных трансформаторов, то такое устройство называется *трехфазной группой*.

3. Под *напряжением трансформатора* иногда для краткости подразумевают наибольшее из напряжений его обмоток. *Коэффициентом трансформации* будем называть отношение фазных напряжений:

$$k_{12} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}, \quad k_{21} = \frac{U_{2\phi}}{U_{1\phi}}.$$

4. Важнейшими частями трансформатора являются: *A* — сердечник, *B* — обмотки, *C* — изоляция, *D* — станина, *E* — бак или кожух (понятия различные), *F* — отводы, *G* — изоляторы, *H* — охлаждающая система (в некоторых случаях) и *I* — прочие (вспомогательные) детали.

Определение этих частей см. ниже — п. 7—39.

иногда для краткости *выемной частью*, поскольку она может быть вынута как одно целое из бака или кожуха.

6. В зависимости от взаимного расположения сердечника и обмоток различают трансформаторы стержневого и броневого типа или, для краткости, *стержневые и броневые трансформаторы*. У стержневых трансформаторов (рис. 1 — однофазный, рис. 2 — трехфазный) обмотки B_1 и B_2 охватывают стержни A_1 сердечника, у броневых однофазных (рис. 3) и трехфазных

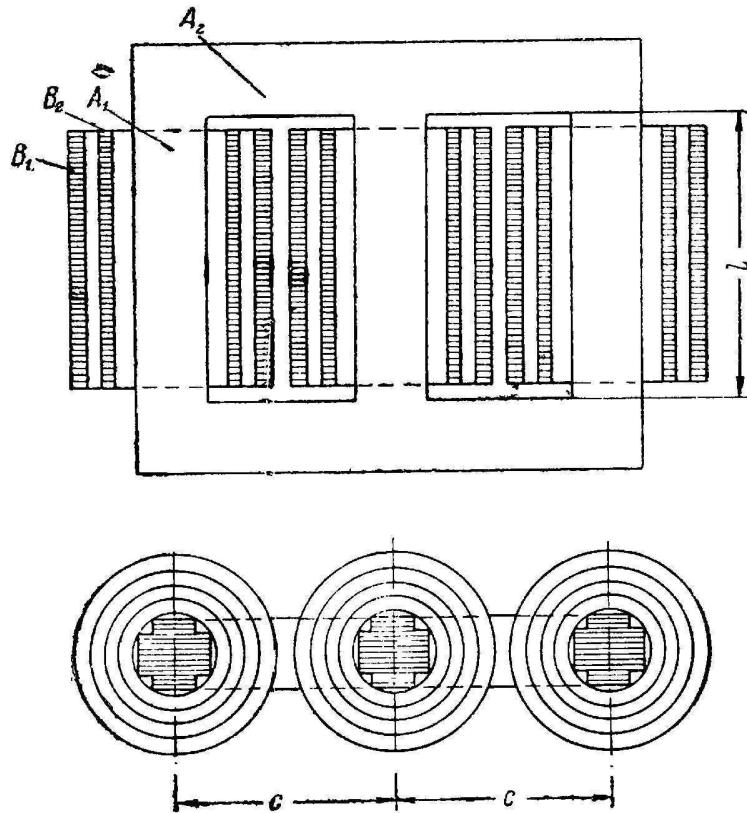


Рис. 2. Трехфазный стержневой трансформатор с концентрическими обмотками.

(рис. 4) — сердечник A охватывает обмотки B_1 и B_2 . Поэтому, например, трансформатор по рис. 5 является броневым, хотя его обмотки по конструкции вполне подобны обмоткам стержневого трансформатора.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ К ПУНКТУ 4

Сердечники

7. *Сердечником* называется магнитная цепь трансформатора со всеми деталями, относящимися к ее конструкции (кроме станины или рамы — см. деталь D).

8. Материал сердечника именуют *сталью*, понимая под этим специальную листовую электротехническую сталь (ОСТ 6391).

9. У стержневых сердечников различают *стержни* A_1 (рис. 1 и 2) — части сердечника, на которых размещены обмотки, и *ярма*

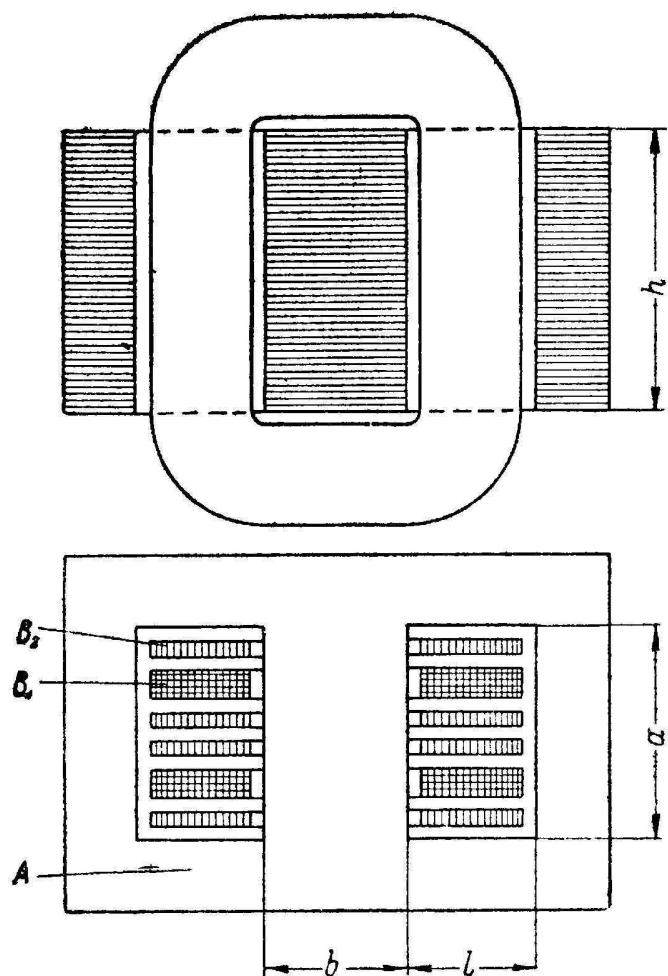


Рис. 3. Однофазный броневый трансформатор с чередующимися обмотками.

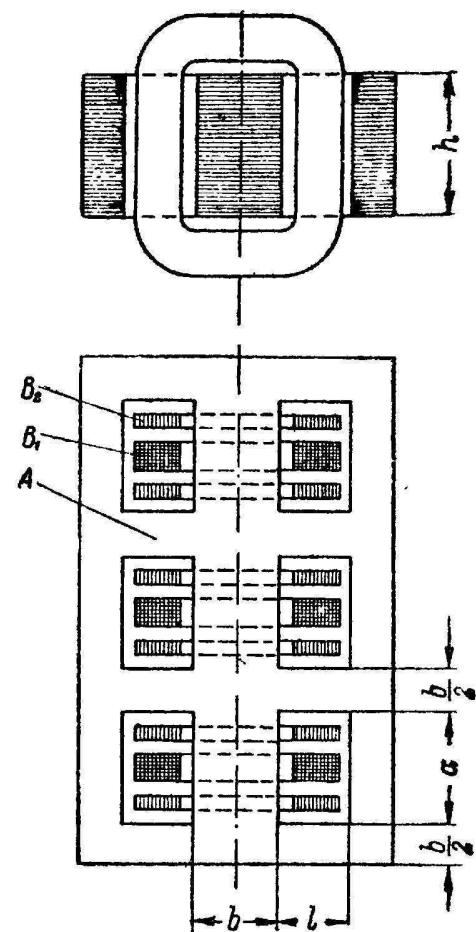


Рис. 4. Трехфазный броневый трансформатор с чередующимися обмотками.

A_2 — части сердечника, служащие для замыкания магнитной цепи через стержни.

10. Пространство, охватываемое магнитной цепью и заполняемое обмотками, изоляцией и каналами, называют окном трансформатора; размеры окна обозначены ниже через a и l (рис. 1, 2, 3 и 4), причем при прямоугольной форме сечения сердечника размер a считается от пакета стали (рис. 6), при круглой же — между концами диаметров окружностей, описанных около двух соседних стержней (рис. 1).

11. Стержневые сердечники разделяются по числу стержней на двух-, трех-, четырех- и пятистержневые; последние два типа, принадлежащие к категории сложных магнитных систем с принудительным распределением магнитного потока, здесь не рассматриваются (см., например, Л. 25, стр. 436, а также § 32).

12. По расположению стержней сердечники разделяются на симметричные и несимметричные. Несимметричным является сердечник обычного трехфазного стержневого трансформатора (рис. 2) в том смысле, что стержни средний и крайний

расположены неодинаково относительно другого крайнего стержня. Несимметричен и трехфазный броневой сердечник (рис. 4), поскольку среднее и крайнее окна расположены неодинаково относительно другого крайнего окна.

13. По способу сборки листов стали различают сердечники со *сборкой впритык и внахлестку* (§ 28).

14. Воздушный (или масляный) промежуток, которым прерывается магнитная цепь, именуется *зазором*; для циркуляции охлаждающего воздуха или масла делаются иногда в сердечнике и в обмотках *каналы*.

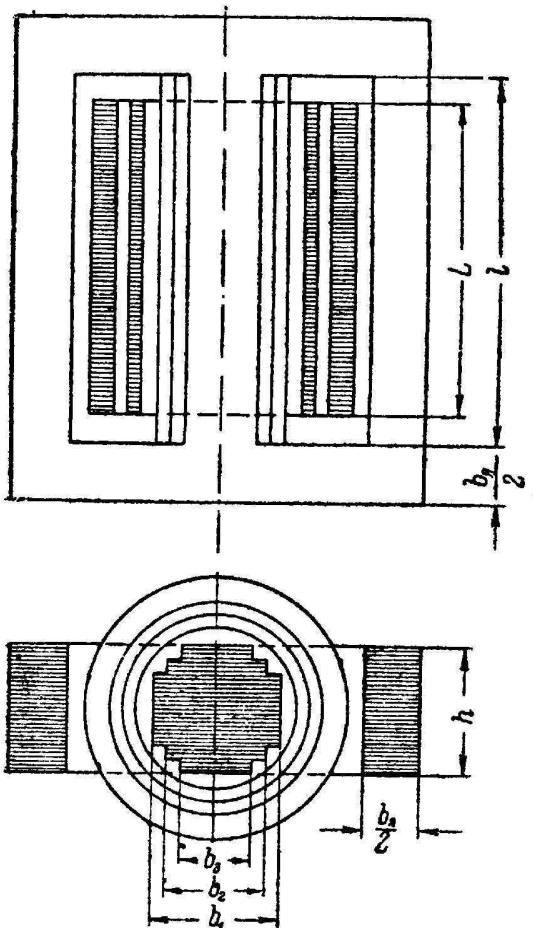


Рис. 5. Однофазный броневой трансформатор с концентрическими обмотками.

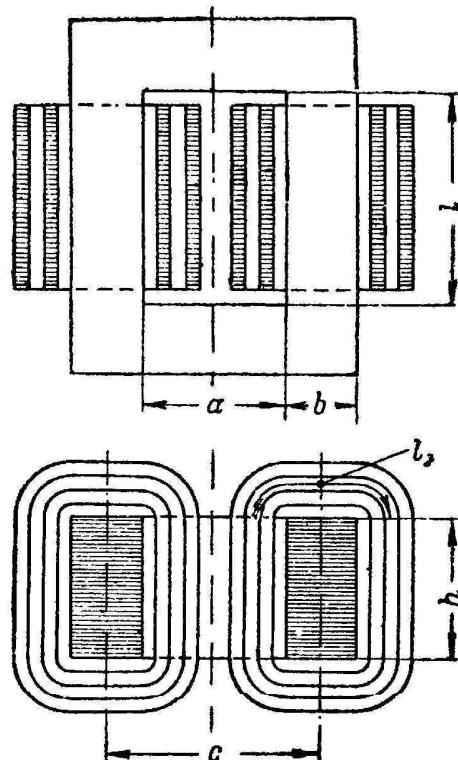


Рис. 6. Очиофазный стержневой трансформатор с концентрическими обмотками и прямоугольным сечением стержней.

15. Конструктивные части, служащие для спрессовки стержней, называются *прессующими накладками*, а служащие для спрессовки ядер — *прессующими блоками* или *прессующими панками*.

16. Для стягивания и спрессовки листов сердечника посредством накладок и блоков применяются обычно *тичьяки* с нарезками, шайбами и гайками на обоих концах; реже ставят заклепки и клинья (§ 27).

17. Обычная форма сечения стержней при круглых обмотках именуется *многоступенчатой*, а именно двух-, трех- и т. д. ступенчатой, если образуется из листов двух, трех и т. д. ширин (рис. 1 и 5).

Обмотки

18. В двухобмоточном трансформаторе различают, в зависимости от напряжения, обмотку *низшего* и обмотку *высшего* напряжения, а в зависимости от назначения(включения)— обмотку *первичную* и обмотку *вторичную*.

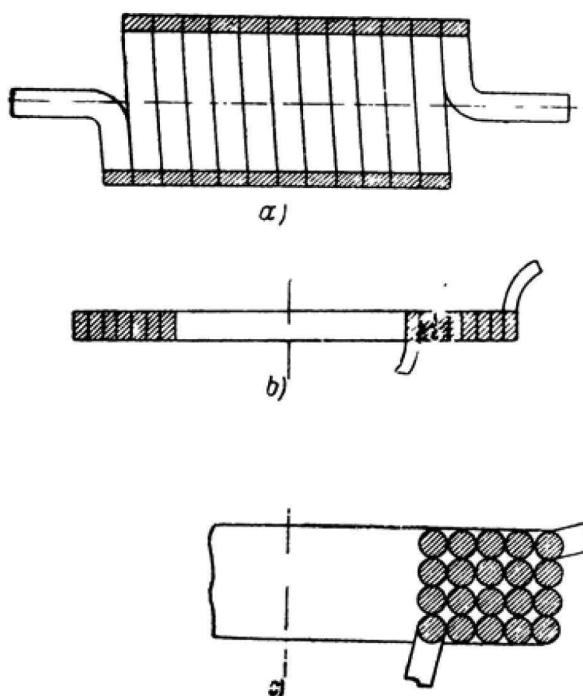


Рис. 7. Типы катушек: а—цилиндрическая; б—дисковая простая; в—дисковая многослойная.

если осевой размер катушки значителен, и последовательные витки одного слоя катушки расположены рядом, образуя цилиндрическую поверхность; однослоиняя цилиндрическая катушка имеется также простой цилиндрической (рис. 7а); б) *дисковые*, если формой их является плоский диск с отверстием посередине; при этом катушки имеют простыми дисковыми, если каждый слой состоит из одного провода (обычно прямоугольного сечения), причем в совокупности образуется плоская спираль (рис. 7б), и в) *многорядными дисковыми*, если каждый слой состоит из многих (обычно не менее трех)

19. Обмотки предполагаются выполненными из меди; в этом смысле говорится о потерях в меди трансформатора.

20. В конструктивном отношении обмотки подразделяются следующим образом: обмотки состоят из катушек, катушки— из слоев, слои— из витков, витки— из проводов.

Примечание. При рассмотрении некоторых вопросов вводится еще понятие о ряде проводов, располагающихся в сечении обмотки по определенному направлению.

21. В зависимости от формы следует различать катушки: а) *цилиндрические*,

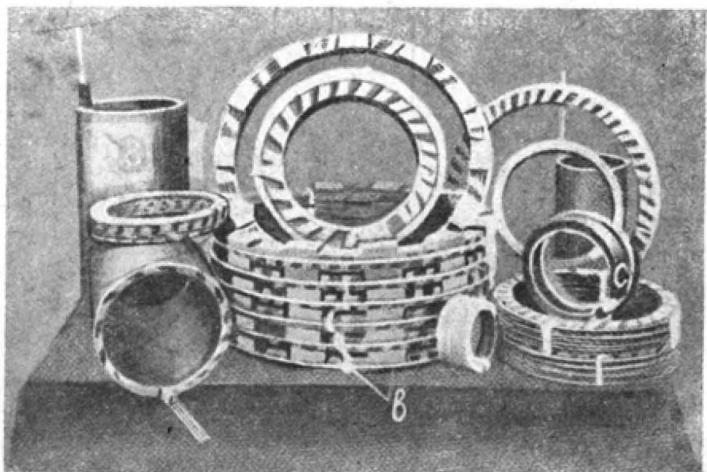


Рис. 8. Типы катушек; обозначения см. рис. 7.