

**А. В. Трамбицкий**

# **Расчет трансформаторов**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 62  
ББК 30.6  
А11

А11 **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 формуляром 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 оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном 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
<b>Глава X. Тепловые расчеты трансформаторов</b>	
§ 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 циркуляции охлаждающей среды . . . . .	205
§ 84. Удельная тепловая нагрузка поверхности охлаждения . . . . .	205
§ 85. Охлаждающие каналы и охлаждающие 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
<b>Глава XI. Тепловые расчеты баков и охлаждающих систем</b>	
§ 97. Определение размеров баков и кожухов . . . . .	233
§ 98. Баки гладкие . . . . .	235
§ 99. Баки волнистые . . . . .	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
<b>Глава XII. Механические расчеты деталей трансформаторов</b>	
§ 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 concentрическими 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 однофазного трехобмоточного трансформатора 5000/3000/3000 kVA, $\frac{110}{\sqrt{3}} / \frac{33}{\sqrt{3}} / 6,6$ kV, 50 Hz с естественным масляным охлаждением . . . . .	314
§ 113. Пример 4. Расчет однофазного трансформатора 0,5 kVA, 500/230 V, 50 Hz с естественным воздушным охлаждением . . . . .	329
Указатель литературы . . . . .	

## П р и л о ж е н и я

**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“, принесящая 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 приступать 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 варьировании расчетов. При детальном расчете после некоторого ознакомления с методами расчета и с самой книгой читатель уже вовсе освобождается от „опеки“; против соответствующих пунктов формул 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].<sup>1</sup>

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

---

*А. Трамбицкий*

---

<sup>1</sup> См. также [Л. 24].



## **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 10000 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 много 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 говоря 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 формуляром (§ 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 формуляр 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).

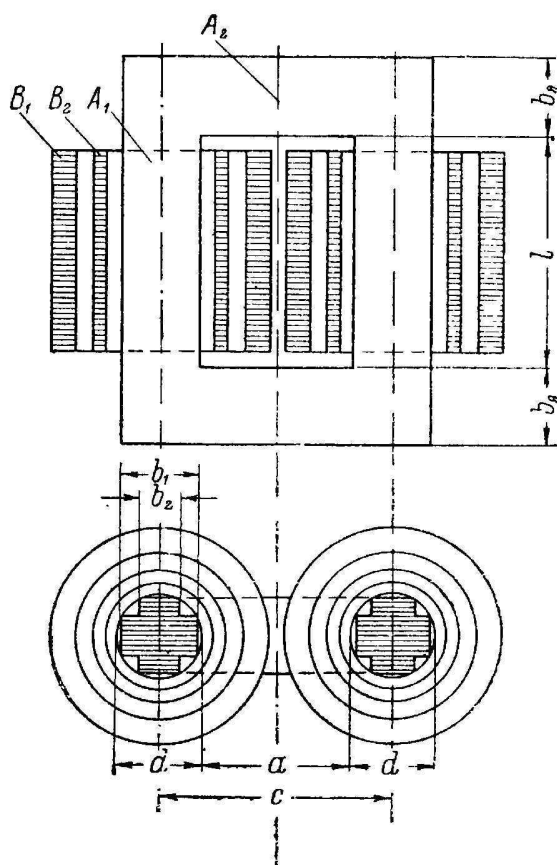


Рис. 1. Однофазный стержневой трансформатор с концентрическими обмотками.

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.

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

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 броневые 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

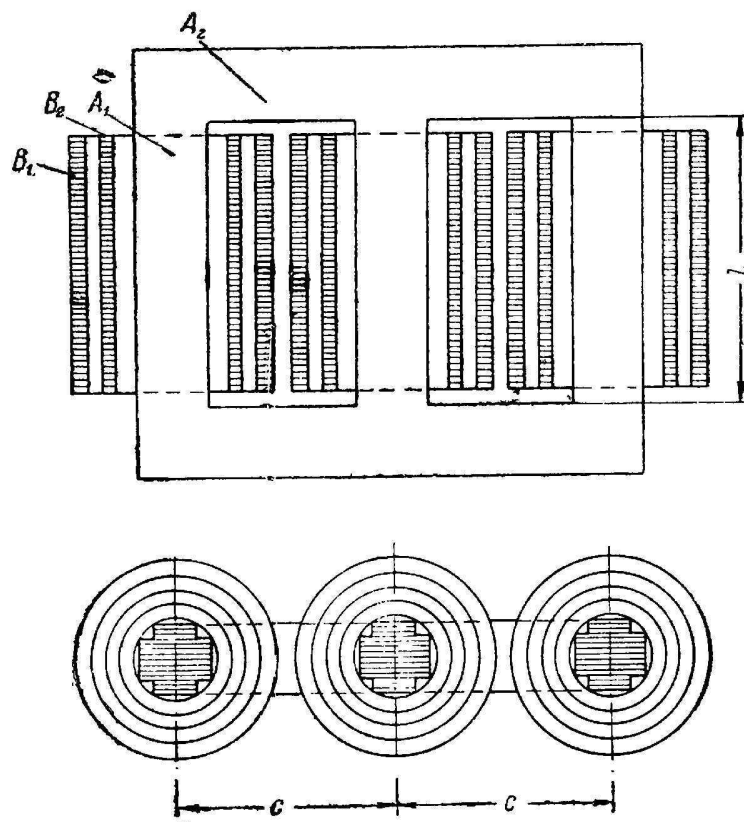


Рис. 2. Трехфазный стержневой трансформатор с концентрическими обмотками.

(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*

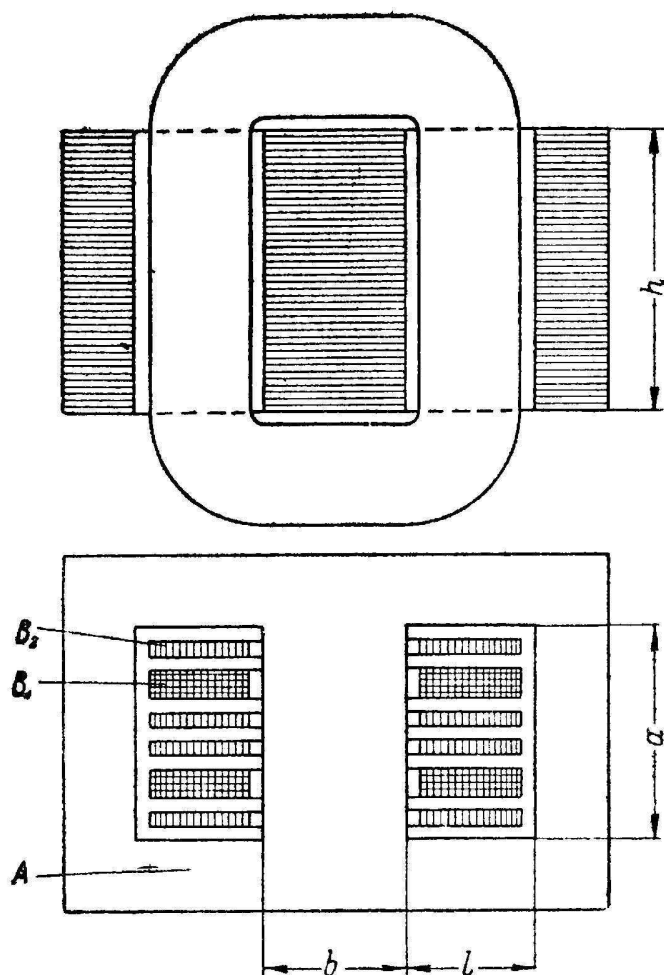


Рис. 3. Однофазный броневой трансформатор с чередующимися обмотками.

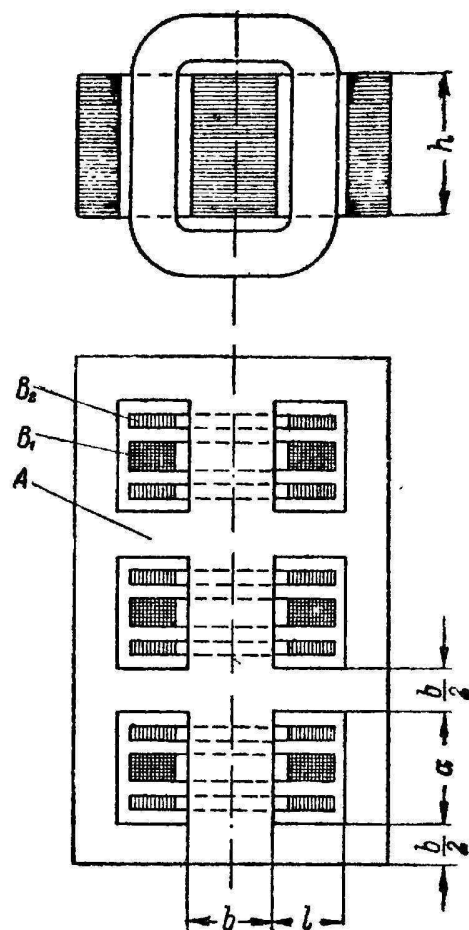


Рис. 4. Трехфазный броневой трансформатор с чередующимися обмотками.

$A_2$  — 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 обыкновенного 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* (§ 23).

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

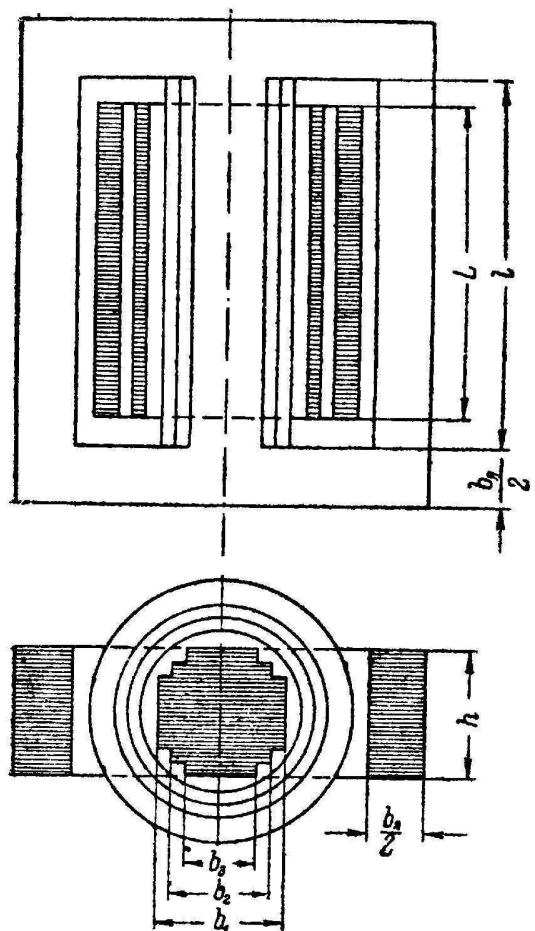


Рис. 5. Однофазный броневой трансформатор с концентрическими обмотками.

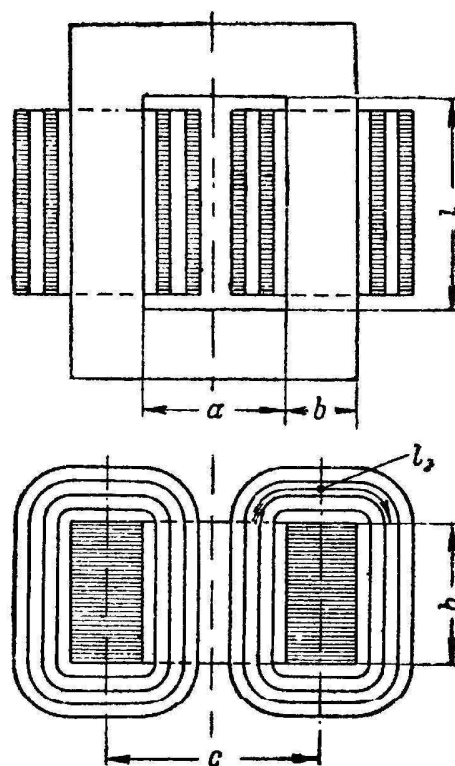


Рис. 6. Однофазный стержневой трансформатор с концентрическими обмотками и прямоугольным сечением стержней.

15. Конструктивные части, служащие для спрессовки стержней, называются *прессующими накладками*, а служащие для спрессовки ярем — *прессующими балками* или *прессующими планками*.

16. Для стягивания и прессовки листов сердечника посредством накладок и балок применяются обычно *шпильки* 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. ширины (рис. 1 и 5).

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

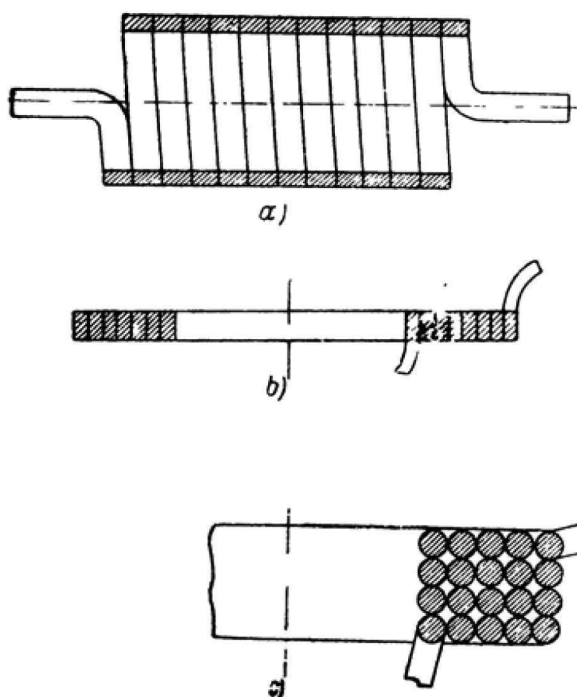


Рис. 7. Типы катушек: *a* — цилиндрическая; *b* — дисковая простая; *c* — дисковая многорядная.

если осевой размер катушки значителен по сравнению с радиальным, и последовательные витки одного слоя катушки расположены рядом, образуя цилиндрическую поверхность; однослойная цилиндрическая катушка именуется также простой цилиндрической (рис. 7*a*); *b*) *дисковые*, если формой их является плоский диск с отверстием посередине; при этом катушки именуются *простыми дисковыми*, если

каждый слой состоит из одного провода (обычно прямоугольного сечения), причем в совокупности образуется плоская спираль (рис. 7*b*), и *c*) *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*, слой — 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: *a*) *цилиндрические*,

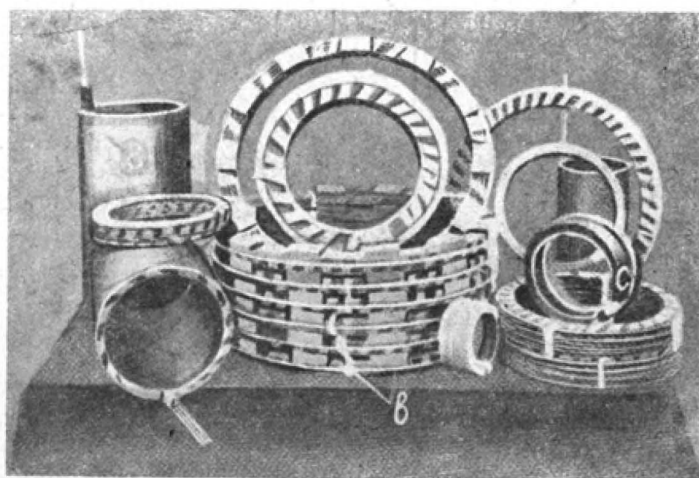


Рис. 8. Типы катушек; обозначения см. рис. 7.