

Р. Рихтер

Электрические машины

Том 3

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621
ББК 34.4
Р11

Р11 **Р. Рихтер**
Электрические машины: Том 3 / Р. Рихтер – М.: Книга по Требованию, 2021. – 292 с.

ISBN 978-5-458-34820-1

В третьей книге е подробно излагаются: теория трансформаторов и основы расчета их. Многие специальные вопросы теории рассмотрены подробно и тщательно обоснованы. Книга предназначена для студентов, специализирующихся по электрическим машинам, и инженеров электромашиностроительных заводов.

ISBN 978-5-458-34820-1

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

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 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.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

Г. Регулирование напряжения		Стр.
1. Регулирование напряжения		155
2. Основные схемы ступенчатого регулирования		156
а) Регулирование на главном трансформаторе		—
б) Регулирование с помощью добавочного регулирования		158
в) Двойное регулирование		—
3. Устранение коротких замыканий ступеней обмотки		159
а) Посредством сопротивлений или дроссельных катушек		—
б) Посредством подразделения обмотки		160
4. Выполнение регулируемых трансформаторов		161
а) Устройство специальных прерывающих выключателей		—
б) Схема Янсена		—
5. Расположение обмоток и ее частей		163

Г. Экспериментальное исследование		
1. Коэффициент трансформации и схемы соединения обмоток		165
а) Коэффициент трансформации		—
б) Схема соединения		168
2. Холостой ход и короткое замыкание		169
а) Измерение мощности		—
б) Потери при холостом ходе		171
в) Ярмовой поток и его потери		174
г) Короткое замыкание		175
3. Нагревание		177
а) Общие определения		—
б) Метод возвратной работы		180
в) Искусственная нагрузка		183
г) Холостой ход и короткое замыкание		186
4. Испытание изоляции		187
а) Испытание главной изоляции обмотки		—
б) Испытание волной с крутым фронтом		189
в) Витковое испытание		—

Н. Конструирование трансформатора		
1. Магнитная система		190
а) Стержневой и броневой типы		—
б) Форма сечения сердечника и ярма		—
в) Шихтовка железа		192
г) Прессующие устройства		195
2. Обмотки		199
а) Дисковые катушки		—
б) Конструкция обмотки		202
в) Специальные конструкции обмоток		205
3. Общая конструкция трансформатора и ее элементы		208
а) Остов трансформатора и соединение его с баком		—
б) Масляный бак		210
в) Трансформаторное масло		211
г) Выводы		212
д) Защитные приспособления		213

И. Охлаждение и нагревание		
1. Система охлаждения		214
а) Сухие трансформаторы		—
б) Естественное охлаждение масляных трансформаторов		215
в) Искусственное охлаждение		216
2. Теплоотдача в окружающую среду		219
а) Теплоотдача в окружающий воздух		—
б) Волнистый и трубчатый баки		222
в) Искусственное охлаждение		223

	Стр.
3. Распределение температуры внутри трансформатора	224
а) Общие замечания	—
б) Распределение температуры в железе	226
с) Распределение температуры в обмотке	228
д) Теплоотдача в масле	233
К. Электрический расчет и выбор изоляции	
1. Важнейшие свойства изолирующих материалов	235
а) Диэлектрические постоянные	—
б) Пробивная прочность воздуха	—
с) Пробивная прочность трансформаторного масла	236
д) Пробивная крепость некоторых твердых материалов	—
2. Электрическая нагрузка изоляции	238
а) Пробивное напряжение	—
б) Основные формы электродов	—
с) Влияние краевого эффекта	239
3. Составная изоляция	240
а) Пространство между обмотками	—
б) Расчет изоляции	241
с) Практическое определение изоляционных расстояний	243
Л. Проектирование	
1. Главные размеры	247
а) Поперечное сечение сердечника	—
б) Линейные размеры	249
2. Соотношения между плотностями тока в высоковольтной и низковольтной обмотках	250
а) Дисковая обмотка	—
б) Цилиндрическая обмотка	253
с) Общие выводы	254
д) Сечение проводов высоковольтной и низковольтной обмоток	257
3. Распределение потерь между железом и медью	259
а) Мощность, магнитная цепь и обмотка заданы	—
б) Минимум веса металла обмотки	261
с) Наибольший коэффициент полезного действия	262
д) Практические выводы	263
4. Экономический расчет	265
а) Наиболее экономичный трансформатор	—
б) Наиболее дешевый трансформатор	266
с) Электромагнитные нагрузки	269
5. Связь между основными величинами трансформатора	270
а) Влияние увеличения линейных размеров трансформатора	—
б) Влияние частичного изменения размеров	272
6. Общий ход расчета	276
а) Пример расчета	—
б) Наиболее дешевый трансформатор	282
Указатель литературы	286
Предметный указатель	—

ПЕРЕЧЕНЬ ТАБЛИЦ

	Стр.
1. Гармоники кривой намагничивающего тока при различных индукциях в сердечнике. Гистерезисом пренебрегается; индукция в ярме равна индукции в сердечнике	16
2. Гармоники кривой намагничивающего тока при индукции в сердечнике, равной 14 000 Г при учете гистерезиса. Индукции в ярме и сердечнике одинаковы	17
3. Относительное номинальное напряжение короткого замыкания, его активная составляющая и фазовый угол между ними для стандартных трансформаторов по DIN VDE 2 600	121
4. Отношение добавочных нагрузочных токов при n параллельно работающих трансформаторах к таковым же при двух параллельно работающих трансформаторах в самом неблагоприятном случае	130
Таблица 1 из RET 1930 г. Групповые соединения обмоток трансформаторов	132
5. Установившиеся токи короткого замыкания у автотрансформаторов	142
6. Средние разности температур у масляных трансформаторов	223
7. Значения теплоотдачи для масла	234
8. Средние значения диэлектрических постоянных	235
9. Наименьшие значения пробивной крепости для прессшпановых досок по VDE 464	237
10. Наименьшие значения пробивной крепости для твердой бумажной изоляции по VDE 509 и 510	—
11. Средние значения пробивной крепости для перитинаксовых плит фирмы Мейеровский и К°	—
12. Силы поля при сравнительно малой толщине изолирующего цилиндра между низковольтной и высоковольтной обмотками	243
13. Силы поля в случае, когда толщина изолирующего цилиндра между низковольтной и высоковольтной обмотками выбирается такой, что при наличии проводящих мостиков в масляном слое сила поля в изолирующем цилиндре достигает 100 kV/cm	—
14. Цены на железо в конце 1931 г.	267

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Длительная вопреки желанию задержка в появлении „Трансформаторов“ была бы неизбежна, если бы они, как это сначала предполагалось, были напечатаны в одном томе с асинхронными моторами. Поэтому глава о трансформаторах выделилась в этот небольшой самостоятельный том. Может быть иному покажется излишним обстоятельная трактовка этой специальной области электромашиностроения, если он вспомнит известную обширную работу по трансформаторам М. Видмара.

Однако я надеюсь дать в моей книге в сжатой форме много нового не только по способу изложения, но из области достижений и расчета трансформаторов, так что читатель при сравнении с книгой Видмара убедится, что ни одна из обеих не может полностью заменить другую.

Из моих сотрудников по обработке данного тома я мог бы первым долгом назвать моего бывшего ассистента доктора-инженера Теодора Бодефельда, теперь профессора техникума в Карлсруэ, и моих ассистентов доктора-инженера Иосифа Рейзера и дипломанта-инженера Теофиля Зитцлера. Рейзер и Зитцлер просмотрели всю рукопись, а Бодефельд большую часть ее, и способствовали при этом исправлению изложения и пополнению материала. Проф. Бодефельду я обязан также сжатым освещением новейшего состояния вопроса о перенапряжениях, чем я и воспользовался при изложении гл. С „Перенапряжения“. Многочисленные отдельные просчеты и экспериментальные исследования, которые были необходимы для количественного выяснения различных вопросов и частично использовались в этом томе, разрабатывались как дипломные работы в Электротехническом институте высшей технической школы в Карлсруэ под наблюдением ассистентов. Наряду с вышеназванными в работе приняли участие мой бывший ассистент-дипломант-инженер Эрнст Буркарт и мои ассистенты дипломант-инженер Людвиг Хесс и дипломант-инженер Вольфганг Мельхардт. Корректуру читал кроме Рейзера и Зитцлера еще мой бывший ассистент

доктор-инженер Франц Хейлес. Особенно ценным был для меня при этом многолетний опыт в трансформаторостроении Хейлеса.

Всем им я приношу сердечную благодарность за их сотрудничество и за их чуткое понимание моего хода мыслей, чем они в большой мере содействовали появлению этого тома. Я мог бы поблагодарить далее всех тех, к ним относятся также и дипломанты, которые помогали мне при обработке отдельных вопросов, но здесь особо не названы. Я благодарю также фирмы, которые предоставили в мое распоряжение чертежи и другие материалы и книгоиздательство Шпрингер, которое охотно шло навстречу всем моим желаниям.

Рудольф Рихтер

Карлсруэ, март 1932 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Третий том капитального труда проф. Р. Рихтера — „Электрические машины“ посвящен трансформаторам. Появление этого тома в 1932 г. знаменовало собой значительный шаг вперед в вопросах теории трансформаторов. Как правильно пишет в своем предисловии автор, его книга ни в какой мере не дублировала другого капитального труда по трансформаторам — книгу проф. М. Видмара — „Трансформаторы“. Стиль этих двух книг совершенно различен. Книга Р. Рихтера содержит сжатое и строгое изложение основ современной теории трансформаторов и кратко освещает вопрос проектирования, несколько их математизируя. В противоположность этому книга М. Видмара мало разбирает общие вопросы теории и рассматривает главным образом вопросы проектирования в самом их общем виде.

К большим достоинствам книги Р. Рихтера следует отнести подробное и глубокое освещение процессов намагничивания трансформаторов, одного из труднейших вопросов теории, оригинальное и чрезвычайно тщательное исследование условий параллельной работы трансформаторов, оригинальное изложение круговых диаграмм, свежесть материала в разделе испытаний и ряд оригинальных исследований по вопросам проектирования.

В иностранной специальной технической литературе нет книг, подобных книге Р. Рихтера, поэтому перевод ее на русский язык следует приветствовать. Советский читатель найдет в этой книге много для себя нового, несмотря на наличие у нас ряда трудов по трансформаторам.

Для студентов вузов, при изучении электрических машин, книга Р. Рихтера может служить хорошим пособием.

Г. Петров.

А. ЯВЛЕНИЯ НАМАГНИЧИВАНИЯ

В первом томе мы уже ознакомились в основном с принципом действия трансформатора (гл. I, С, 9), с его конструкцией (гл. II, А, 4) и углубили эти сведения во втором томе при рассмотрении основных уравнений (гл. I, 3, в) и явлений рассеяния. Этих основ достаточно, чтобы начать систематическое исследование работы трансформатора, останавливаясь более подробно на отдельных явлениях, наиболее существенных для работы трансформатора.

Для лучшего уяснения материала можно рекомендовать параллельно ознакомиться с гл. II, в которой описаны конструкции выполненных трансформаторов более подробно, чем это сделано в первом томе (гл. II, А, 4). Прежде всего рассмотрим расчет намагничивающего тока и связанные с ним явления.

I. ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

а) **Магнитная цепь и воздушный зазор.** При однофазном трансформаторе мы имеем простую магнитную цепь, какую мы уже изучали в первом томе в усложненной форме, применительно к конструкции вращающихся машин (гл. II, G).

Магнитная цепь в трансформаторе состоит из обмотанных сердечников, ярем и воздушных зазоров, наличие которых, как мы уже ранее видели (гл. II, А, 4, т. 1), обусловлено производственными соображениями. Влияние этих воздушных зазоров на намагничивающий ток тем больше, чем меньше трансформатор, так как длина сердечника и ярма увеличивается с ростом мощности, но длина воздушного зазора мало зависит от этого.

Совершенно малые трансформаторы — меньше 1 kVA — поэтому иногда устраивают также без воздушного зазора, неудобство намотки на замкнутые железные пакеты в этом случае влияет на стоимость трансформатора. Если трансформатор выполнен посредством сборки встык, то соответственные поверхности не должны соприкасаться непосредственно, но должны быть изолированы друг от друга посредством промежуточной прокладки.

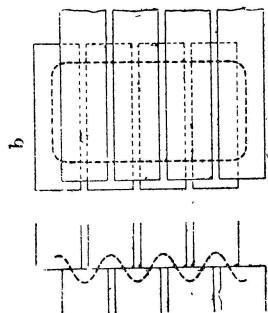
Эта электрическая изоляция противостоящих железных листов необходима для того, чтобы воспрепятствовать образованию вихревых токов, которые возникали бы, если бы тонкие изолирующие слои между железными листами соединяемых частей (например, ярмо и сердечник) образовали проводящие мостики.

На фиг. 1 путь таких вихревых токов обозначен утолщенной пунктирной линией на двух проекциях железных пакетов. Для наглядности здесь изображены только по четыре пакета сердечника и ярма, и ширина сердечника в плоскости железных листов принята очень малой.

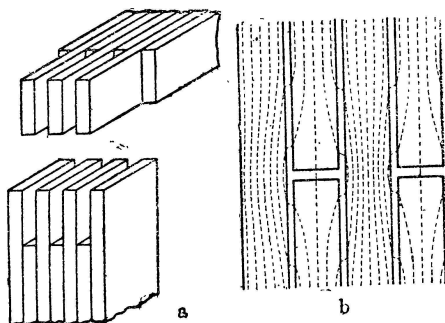
При тщательно выравненных соединяемых поверхностях железных пакетов необходимо для трансформаторов малой и средней мощности брать толщину изолирующей прокладки в стыке, как правило, равной

$$\delta = 0,15 \text{ mm.} \quad (1)$$

При необработанном стыке необходимо применять изолирующую прокладку, усиленную до 1 mm, так как иначе возникает опасность того, что листы железа разрушат изолирующую прокладку. Если железо сердечников и ярем соединяется не



Фиг. 1. Вихревые токи при отсутствии изоляции в стыке.



Фиг. 2. Шихтовка железа (индукционные линии проведены пунктиром).

встык, а, как показано на фиг. 2, а и б, шихтуется, то индукционные линии вблизи места стыка двух листов железа переходят в соседние листы, вследствие чего разгружается воздушный зазор стыка. В этом случае действительная длина стыкового соединения зависит главным образом от магнитной нагрузки железного листа; она при практически встречающихся индукциях обыкновенно так мала, что, пренебрегая ею, можно считать

$$\delta = 0.$$

В дальнейшем суммарную длину пути $\sum \delta$ воздушного зазора отнесем к общей длине $L_{\text{жс}}$ железного пути и введем отношение

$$\eta = \frac{\sum \delta}{L_{\text{жс}}}. \quad (2)$$

В однофазном трансформаторе мощностью 50 kVA с четырьмя воздушными зазорами около 0,15 mm $\eta \approx 4 \cdot 10^{-4}$, общая длина пути в воздухе составляет, следовательно, 0,04% общего пути в железе.

В дальнейшем мы постоянно будем иметь дело с высоколегированным железом (пунктирная кривая на фиг. 87, т. II), какое обычно применимо в трансформаторах на 50 Hz.

б) Мгновенное значение намагничивающего тока. Намагничивающий ток трансформатора получается известным образом из закона полного тока (гл. I, В, 3, т. I).

Мгновенное значение намагничивающего тока выражается соотношением

$$i = \frac{v}{w}, \quad (3)$$

в котором v — мгновенное значение магнитного напряжения обхода и w — число витков обмотки (соединенных последовательно), т. е. число проводов, обтекаемых намагничивающим током i , которое помещается в окне трансформатора (ср. гл. I, В, 3, т. I).

Магнитное напряжение обхода выражается достаточно точно для стержневого трансформатора (фиг. 3, а) через

$$v = 2L_c h_c + 2L_{\text{я}} h_{\text{я}} + 4\delta h_{\delta} \quad (3a)$$

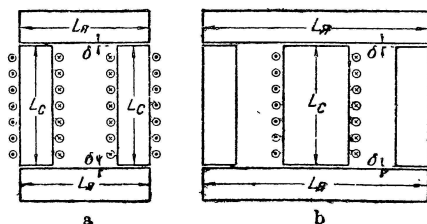
и для броневого трансформатора (фиг. 3, б) через

$$v = L_c h_c + (L_{\text{я}} + L_c) h_{\text{я}} + 2\delta (h_{\delta, c} + h_{\delta, \text{я}}). \quad (3b)$$

При этом принято, что в случае броневого трансформатора площади сечений продольного и поперечного ярем одинаковы. h_c и $h_{\text{я}}$ — мгновенные значения напряженности поля в сердечнике и в яре (строгие средние значения по длине), h_{δ} — напряженность поля в воздушном зазоре при стержневом трансформаторе, $h_{\delta, c}$ и $h_{\delta, \text{я}}$ — напряженность поля в воздушном зазоре у сердечника и у боковых ярем броневого трансформатора.

Для определения напряженности поля в частях железа исходим из мгновенного значения потока Φ в железе сердечника. Поток в расположенных параллельно железу рядом лежащих путях воздушного пространства при практически встречающихся индукциях для магнитной цепи без воздушного зазора исчезающе мал и может остаться не принятым во внимание. При магнитной цепи с воздушным зазором рассеяние вблизи мест соединения может привести к значительному уменьшению напряженности поля в частях железа, близких к стыку.

Индукцию в железе мы подсчитываем как частное от деления потока на площадь сечения железа, пренебрегая при этом рассеянием в местах соединения, так что расчет ведем с известной осторожностью. По индукции мы получаем по кривой намагничивания соответствующую напряженность поля. Кривые намагничива-



Фиг. 3. Однофазный стержневой а и однофазный броневого б трансформаторы.

ния фиг. 87 и 88 второго тома даны для мгновенных значений индукций и сил поля и пренебрегая явлением гистерезиса.

Индукцию в воздушном зазоре получаем так же, как частное от деления потока на площадь сечения воздушного зазора, и, деля эту индукцию на проницаемость:

$$H_0 = 1,257 \cdot 10^{-8} \text{ Н/см} = 1,257 \text{ Г} \cdot \text{см/А}, \quad (4)$$

получаем напряженность поля в воздушном зазоре.

При определении площади сечения воздушного зазора необходимо принять во внимание распространение в нем индукционных линий. Приближенно мы приравняем площадь сечения воздушного зазора к площади стыка, т. е. площади поперечного сечения железа, деленной на коэффициент $k_{\text{эс}}$, который представляет отношение площади сечения чистого железа к общему сечению сердечника, включая площадь сечения изоляции между листами железа (ср. т. I). Этот коэффициент мало отличается от единицы: при толщине железных листов в 0,5 мм и с обычной прокладочной бумагой он равен около 0,9 и при толщине в 0,35 мм — 0,86. Так как толщина воздушного зазора при сборке может быть установлена только приблизительно, то для простоты расчета можем принять индукцию в воздушном зазоре равной соответствующей индукции в железе ($b_{\text{э}} = b_{\text{с}}$, $b_{\text{а.с}} = b_{\text{с}}$, $b_{\text{в.я}} = b_{\text{я}}$), т. е. опять будем считать с известной осторожностью. При броневом трансформаторе принимается во внимание, что два ярма всегда включены магнитно-параллельно.

с) **Изменение во времени и эффективное значение намагничивающего тока.** Если мы определили для различных задаваемых значений потока индукции в железе сердечника намагничивающий ток i по уравнениям (3), (3а) и (3б), то получим магнитную характеристику трансформатора $\varphi(i)$ или $b(i)$, где b — индукция в сердечнике, пропорциональная потоку индукции φ . Для заданного изменения во времени потока индукции или индукции b мы можем определить магнитную характеристику изменения во времени намагничивающего тока. На фиг. 4, а и б дано определение кривой тока для синусоидальной формы кривой потока (кривая б на фиг. 4, б) с максимальным значением индукции в сердечниках и ярме $B = 14000 \text{ Г}$. Чтобы иметь возможность обобщить результат, введем вместо тока i отношение между магнитным напряжением $\mathcal{U}$ цепи и общей длиной $L_{\text{эс}}$ железного пути, так что намагничивающий ток будет получаться посредством умножения этого отношения на длину пути в железе и деления на число витков. Далее примем, что общая длина пути в воздухе $\sum \mathfrak{z}$ составляет 0,04% общей длины пути в железе ($\eta = 4 \cdot 10^{-4}$). Если бы проницаемость железа была бесконечна, то магнитная характеристика представляла бы прямую линию L на фиг. 4, а.

Влияние магнитного гистерезиса (т. I, гл. II, F, 2а) несколько искажает эту кривую тока. На фиг. 4, а и б пунктиром вычерчены