

**С. А. Фарбман, А. Ю. Бун**

**Ремонт и модернизация  
трансформаторов**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 53  
ББК 22.3  
С11

С11 **С. А. Фарбман, А. Ю. Бун**  
Ремонт и модернизация трансформаторов / С. А. Фарбман, А. Ю. Бун – М.:  
Книга по Требованию, 2013. – 554 с.

**ISBN 978-5-458-47004-9**

В книге приведены сведения о конструкциях и расчетах различных трансформаторов и с возможной полнотой рассмотрена технология ремонта и модернизации трансформаторов средних и больших мощностей напряжением до 110 кв включительно в условиях проведения этих работ на местах. Одновременно даны отдельные справочные и вспомогательные сведения, необходимые работникам, осуществляющим ремонт и модернизацию трансформаторов. Книга является практическим руководством для работников, занятых восстановлением и переделкой; трансформаторов. Она рассчитана на инженерно-технических работников, мастеров и квалифицированных рабочих.

**ISBN 978-5-458-47004-9**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2013

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.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)



## ВВОДНАЯ

### ГЛАВА ПЕРВАЯ

#### ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РЕМОНТНЫХ РАБОТ

В практике имеют место три основных вида ремонтных работ:

1) *восстановительный* ремонт, когда восстанавливаются или заменяются новыми какие-либо части трансформатора по причине их изношенности или выхода из строя; параметры трансформатора, а также конструкция этих частей при этом не меняются и остаются в заводском исполнении;

2) *реконструкция*, когда конструкция каких-либо частей трансформатора меняется, параметры же трансформатора остаются при этом без изменения; например, меняется конструкция обмоток вследствие их электродинамической неустойчивости, в частности цилиндрическая обмотка заменяется непрерывной, или меняется конструкция прессовки (осевой стяжки) обмоток, в частности прессовка путем расклиновки заменяется прессовкой с помощью нажимных колец и прессующих болтов, и т. п.;

3) *модернизация*, когда меняются параметры трансформатора: мощность, напряжение, ток, схема и группа соединения обмоток и др.; при модернизации меняется, как правило, и конструкция отдельных частей трансформатора: обмоток, отводов, вводов и др.

Реконструкция и модернизация, строго говоря, не являются ремонтными работами, но, учитывая, что при этом переделываются лишь отдельные части трансформатора, тогда как другие именно ремонтируются, практически относят оба эти вида работ к ремонтным.

Во всех этих случаях приходится иметь дело с гото-

вым трансформатором и, в частности, с готовыми магнитопроводом и баком, что определяет как активное сечение стали магнитопровода, так и все те размеры и габариты, в которые необходимо укладываться при любом виде ремонтных работ, в том числе и при модернизации.

Помимо указанных трех основных видов ремонтных работ, в практике имеет место еще так называемый профилактический ремонт без подъема или с подъемом активной части. Этот вид ремонта является предупредительным и сводится в основном к периодическому осмотру трансформатора и устранению различных небольших дефектов, обнаруженных в процессе осмотра.

В настоящей книге этот вид ремонта не рассматривается.

### **1-1. ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ РЕМОНТ**

Из всех указанных основных видов ремонтных работ восстановительный ремонт является наиболее простым, поскольку в этом случае ничего не меняется и задача сводится в основном к знанию определенной технологии и умению практически эту технологию выполнить.

Основное требование, которое необходимо соблюдать при восстановительном ремонте,— это выполнять по возможности все так, как это было сделано заводом. Если же по тем или иным причинам приходится делать какие-либо отдельные отступления (например, менять провода обмоток), то они должны быть тщательно продуманы и обоснованы с тем, чтобы не нарушить работоспособности трансформатора и не ухудшить его качественных показателей.

### **1-2. РЕКОНСТРУКЦИЯ**

Более сложным является реконструкция той или иной части трансформатора в целях устранения выявленных недостатков и тем самым повышения надежности работы трансформатора.

Здесь, помимо знания технологии и умения ее выполнить, необходимо найти такое решение, которое отвечало бы своему назначению и которое возможно было бы осуществить в данных, вполне определенных габаритах.

Разберем такой случай. На одном химическом заводе работало значительное количество трансформаторов иностранной фирмы для питания ртутных выпрямителей

мощностью по  $2 \times 5\,000$  *кв*а, которые систематически выходили из строя. Анализ аварий показал, что основной причиной являлись неудачная конструкция обмоток, а также крепления отводов. Обмотки были выполнены фирмой как цилиндрические слоевые со сложной позицией и оказались электродинамически неустойчивыми. Возникла необходимость реконструкции обмоток, а соответственно и отводов, причем требовалось сохранить все параметры трансформаторов без изменения. Кроме того, фирма вложила в каждый трансформатор 4,5 т меди, и менять такое количество меди было нецелесообразно — надо было использовать старый провод. Было принято решение выполнить обмотки по типу обмоток наших отечественных выпрямительных трансформаторов, которые себя зарекомендовали как весьма надежные.

Однако при новой конструкции обмоток оказалось возможным вложить в существующие габариты только 3,5 т старого провода. Это снижало мощность трансформатора с  $2 \times 5\,000$  до  $2 \times 3\,500$  *кв*а. Поскольку снижение мощности было недопустимо, одновременно с реконструкцией обмоток была осуществлена замена системы охлаждения, а именно: естественно-масляное охлаждение было заменено принудительным циркуляционно-масляным с установкой водяного маслоохладителя и насосов.

Это позволило соответственно увеличить плотность тока в обмотках, а возросшие в связи с этим потери — отвести более эффективной системой охлаждения.

Таким образом, в результате произведенной реконструкции обмоток, отводов и системы охлаждения были сохранены требуемые параметры и одновременно достигнута необходимая электродинамическая устойчивость, а соответственно и надежность значительного количества трансформаторов, которые после реконструкции работают безаварийно уже более 7 лет.

Можно привести еще ряд примеров из практики реконструкции трансформаторов.

В эксплуатацию было включено несколько силовых трехобмоточных трансформаторов разных фирм с регулированием напряжения под нагрузкой мощностью по 31 500 *кв*а класса изоляции 110 *кв*. Все эти трансформаторы через несколько месяцев вышли из строя. Как показал анализ аварий, трансформаторы не обладали необ-

ходимой электрической прочностью и, в частности, не имели специальных средств защиты от атмосферных перенапряжений, т. е. были негрозоупорными.

Было решено реконструировать все эти трансформаторы по типу отечественных тех же мощности и напряжений, сохранив при этом их параметры без изменения.

Чтобы это выполнить в существующих габаритах, пришлось отказаться от регулирования напряжения под нагрузкой, удалить специальную четвертую регулировочную наружную обмотку и за счет освободившегося места переделать соответствующим образом обмотки ВН и СН, а также всю изоляцию и осуществить защиту в виде емкостных витков.

В результате трансформаторы приобрели необходимую электрическую прочность и грозоупорность и работают безаварийно уже несколько лет.

### 1-3. МОДЕРНИЗАЦИЯ

Наиболее сложным видом ремонтных работ является модернизация, во время которой меняются параметры, а соответственно и конструкция отдельных частей трансформатора.

Здесь в каждом отдельном случае приходится находить свое решение, в зависимости от задания, назначения, предъявляемых требований и конструкции подлежащего модернизации трансформатора.

Наибольшие трудности возникают, если требуется повысить мощность трансформатора. Такое требование наиболее часто предъявляется к печным<sup>1</sup> трансформаторам, мощность которых оказывается недостаточной по отношению к возросшим производственным возможностям обслуживаемых ими электропечей.

Повышение мощности трансформатора в существующих габаритах возможно за счет: 1) лучшего использования стали магнитопровода, т. е. повышения индукции; 2) вложения в те же габариты большего количества меди; 3) более эффективной системы охлаждения; 4) общего комплекса всех указанных факторов.

Увеличение мощности за счет повышения индукции, принятой заводом, как правило, исключается, так как

---

<sup>1</sup> Трансформаторы для питания электропечей названы для краткости печными.

готовый магнитопровод, выполненный из стали определенной марки, уже обычно рассчитан на оптимальную индукцию.

В отдельных редких случаях, при низких значениях заводской индукции (12—13 тыс. гс), можно допустить ее небольшое увеличение (в пределах 5—10%).

Однако при горячекатаной электротехнической стали значение индукции во всех случаях не должно превышать 14 800 гс.

Следует отметить, что при стыковом магнитопроводе берут несколько меньшее значение индукции, чем при шихтованном. Для печных трансформаторов в свою очередь берут несколько меньшее значение индукции, чем для силовых.

В практике модернизации увеличение мощности производят, как правило, или за счет вложения в те же габариты большего количества меди, или за счет применения более эффективной системы охлаждения, или за счет одновременного использования обоих этих мероприятий.

Чтобы вложить в те же габариты большее количество меди и при этом сохранить индукцию, близкую к заводской, а также выдержать необходимые изоляционные расстояния и все прочие требования, вытекающие из задания, назначения и условий работы подлежащего модернизации трансформатора, приходится, как правило, находить принципиально отличное от заводского решение как в части расположения, так и в части конструкции обмоток.

Так, например, печные трансформаторы, имеющие чередующееся расположение обмоток и обмотку НН в виде коротких винтовых катушек с витками из многих параллельных проводов, удается модернизировать с повышением мощности на 25—40%, заменяя чередующееся расположение обмоток концентрическим и выполняя обмотку НН наружной или в виде двойных дисковых катушек и большого количества параллельных групп, располагаемых равномерно по всей высоте стержня, или в виде голых медных цилиндров (см. рис. 3-10, а и б, 3-11 и 3-13).

Но увеличение мощности влечет за собой увеличение нагрузочных потерь (потерь короткого замыкания). Это в свою очередь может потребовать замены суще-

ствующей системы охлаждения более эффективной, например вместо естественно-масляной — принудительной циркуляционно-масляной.

Следует отметить, что более эффективная система охлаждения может сама по себе решить задачу определенного повышения мощности трансформатора без каких-либо других его переделок, обеспечив при этом необходимую термическую прочность трансформатора, т. е. допустимую температуру обмоток и масла.

Однако, печные трансформаторы, в частности средних и больших мощностей, уже имеют, как правило, принудительное циркуляционно-масляное охлаждение, которое с увеличением мощности трансформатора иногда оказывается недостаточным. В этом случае может помочь устройство направленного принудительного циркуляционно-масляного охлаждения, когда в нижней части бака создается напорная камера, из которой поступившее в нее из охладителя холодное масло направляется принудительно непосредственно в обмотки и тем самым эффективно их охлаждает.

В отдельных случаях, если это допускает технологический процесс, можно увеличить номинальную мощность трансформатора за счет уменьшения общего диапазона регулирования напряжения и повышения нижнего предела этого диапазона.

Как известно, при большом диапазоне регулирования и низком пределе его номинальная мощность трансформатора сильно отличается от его типовой мощности.

Модель трансформатора выбирается не по номинальной, а по типовой мощности, а типовую мощность определяют количеством закладываемых в трансформатор активных материалов (стали и меди). Чем больше диапазон регулирования напряжения и меньше нижний предел этого диапазона, тем больше требуется заложить в трансформатор активных материалов. При этом активное сечение стали определяется индукцией, и числом витков, соответствующих верхнему пределу напряжения, тогда как для получения нижнего предела напряжения приходится включать в обмотку ВН большое число витков. Индукция при этом падает, и модель оказывается недоиспользованной.

При модернизации имеется готовый магнитопровод, соответствующий типовой мощности трансформатора

Поэтому, уменьшая общий диапазон регулирования и повышая нижний предел напряжения, получаем возможность увеличить в определенных пределах номинальную мощность трансформатора и тем самым улучшить использование модели.

Таким образом, модернизация трансформатора, решая задачу изменения параметров, а соответственно и конструкции в существующих габаритах, требует еще в большей степени, чем реконструкция, определенной эрудиции и творческого подхода для нахождения в каждом конкретном случае возможного и оптимального решения.

## *ГЛАВА ВТОРАЯ*

### **ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ТРАНСФОРМАТОРАМ**

#### ***А. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ***

Любой вид ремонтных работ требует грамотного и сознательного их выполнения, а для этого надо знать, от чего зависят работоспособность и надежность того или иного трансформатора.

С этой точки зрения необходимо хотя бы коротко напомнить как общие требования, которые предъявляются к каждому трансформатору, так и специальные дополнительные требования, которые предъявляются к тем или иным отдельным трансформаторам или группе трансформаторов в зависимости от их мощности, класса изоляции, назначения и условий работ.

К каждому трансформатору предъявляются следующие общие требования, которым он должен во всех случаях удовлетворять.

#### **2-1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ<sup>1</sup>**

Согласно этому требованию любой трансформатор должен выдерживать различные перенапряжения —

---

<sup>1</sup> Более подробно с вопросом об электрической прочности можно познакомиться по книге А. В. Сапожникова «Конструирование трансформаторов» (Госэнергоиздат, 1959).

кратковременные воздействия, которые могут превышать рабочее напряжение в несколько раз.

Различают коммутационные перенапряжения, которые воздействуют на трансформатор при всяких переходных процессах и режимах его работы (включение и отключение трансформатора, резкое изменение нагрузки и т. д.), и атмосферные, которые возникают на вводах трансформатора при атмосферных (грозовых) разрядах, а также при перекрытии на линии вблизи трансформатора, т. е. при резком спаде напряжения, так называемом срезе волны напряжения.

Воздействие на трансформатор перенапряжений зависит как от их величины (амплитуда —  $U_0$ ), так и от их продолжительности. Амплитуда атмосферных перенапряжений больше, чем амплитуда коммутационных перенапряжений, и доходит до 10-кратного значения фазного напряжения и более, однако продолжительность атмосферных перенапряжений значительно меньше и не превышает нескольких десятков микросекунд.

На размеры изоляции трансформатора влияют как коммутационные, так и атмосферные перенапряжения, однако при решении вопроса об электрической прочности продольной изоляции трансформатора исходят из анализа явлений, которые имеют место при различных атмосферных перенапряжениях, так как они оказываются наиболее опасными для этой изоляции обмоток.

Амплитуда и форма волны атмосферного перенапряжения, проникающего в обмотки трансформатора, в сильной степени зависят от того, как далеко находится место атмосферного разряда или перекрытия на линии, а также от защиты подстанции и подходов к ней и т. п.

Грозовые разряды вызывают, как правило, отдельные короткие электрические импульсы с большой амплитудой (рис. 2-1).

В этих импульсах различают начальный и конечный периоды. Начальный период протекает очень быстро, причем время подъема напряжения от нуля до максимума измеряется микросекундами. Эту часть кривой называют *фронтом волны* (рис. 2-1).

Скорость процесса в начальный период столь велика, что в момент, когда волна с крутым (коротким) фронтом достигает трансформатора, ток не проходит по

виткам обмотки вследствие их большого индуктивного сопротивления, а практически протекает по емкостной цепочке обмотки.

Иначе говоря, в первый (начальный) момент падения весьма крутой (прямоугольной) волны на трансформа-

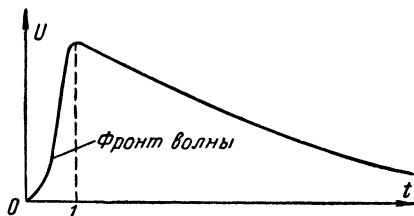


Рис. 2-1. Волна напряжения, имеющая характер аperiodического импульса.

тор, обмотку его можно приближенно представить как цепочку емкостей  $C$  и  $K$  (рис. 2-2), считая, что обмотки состоят из отдельных независимых витков.

Начальное распределение напряжения по емкостной цепочке обмотки зависит в этот момент от коэффициента

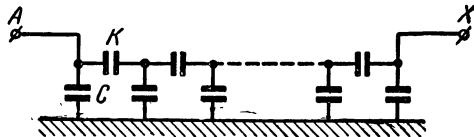


Рис. 2-2. Емкостная цепочка обмотки.

$\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}}$ , где  $C$  — поперечная емкость, т. е. емкость между катушками и заземленными частями, а  $K$  — продольная емкость, т. е. емкость между отдельными элементами продольной изоляции обмотки (рис. 2-2). В обычных трансформаторах  $\alpha = 5-15$ . Как показывает расчет, при таких значениях  $\alpha$  распределение напряжений по емкостной цепочке обмотки крайне неравномерно и почти не зависит от того, заземлен ли конец обмотки или нет.

На рис. 2-3 даны кривые начального распределения напряжений по емкостной цепочке обмотки при разных значениях  $\alpha$  как при заземленном ( $a$ ), так и при неза-

земленном (б) конце обмотки. Здесь  $U$  — амплитуда фронта волны напряжения;  $x$  — расстояние рассматриваемого элемента от конца обмотки в долях полной длины обмотки.

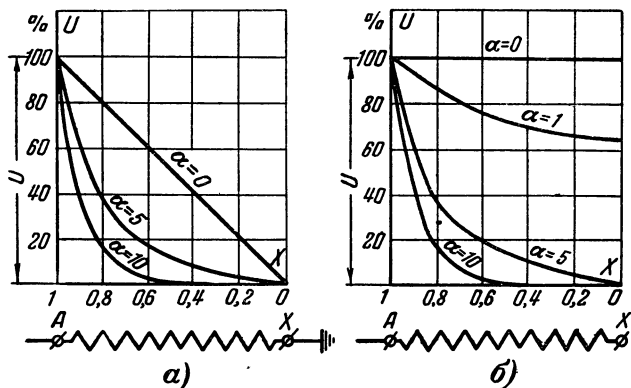


Рис. 2-3. Начальное распределение напряжения по емкостной цепочке обмотки.

*a* — при заземленном конце обмотки; *b* — при незаземленном конце обмотки.

Как видно из этих кривых, в начальный период воздействия волны с крутым фронтом наиболее опасные по величине напряжения возникают для изоляции начальных катушек обмотки. Непосредственно для первых ка-

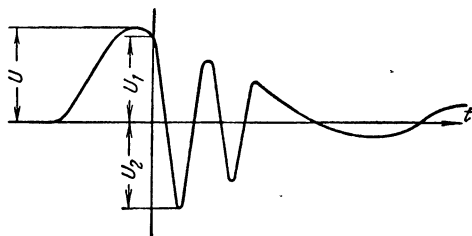


Рис. 2-4. Срезанная волна импульса напряжения.

тушек опасные по величине напряжения возникают при резком спаде напряжения — срезе волны, который происходит при перекрытии линии вблизи трансформатора. Форма волны при срезе показана на рис. 2-4.