

Ф.И. Холуянов

**Трансформаторы однофазного и трехфазного
тока**

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 621.39
ББК 32
Ф11

Ф11 **Ф.И. Холуянов**
Трансформаторы однофазного и трехфазного тока / Ф.И. Холуянов – М.: Книга по Требованию, 2023. – 256 с.

ISBN 978-5-458-46377-5

Книга содержит краткую теорию явлений в однофазных и трехфазных трансформаторах и описание их конструкций. Материалдается в объеме, прорабатываемом в электротехнических ВТУЗах. При некоторых сокращениях тот же материал может быть изучаем и в электротехникумах.

ISBN 978-5-458-46377-5

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

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.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВА ОДНОФАЗНЫХ И ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

§ 1. Работа однофазного трансформатора вхолостую.

Трансформаторами в электротехнике называют такие аппараты, в которых электрическая энергия переменного тока от одной неподвижной катушки из проводника передается другой неподвижной же катушке из проводника, не связанный с первой электрически. Звеном, передающим энергию от одной катушки другой, является магнитный поток, сцепляющийся с обеими катушками и непрерывно меняющийся по величине и по направлению.

На рис. 1а изображен простейший трансформатор, состоящий из двух катушек I и II , расположенных коаксиально одна над другой. К катушке I подводится переменный ток от генератора переменного тока Γ ; эта катушка называется первичной катушкой или первичной обмоткой. С катушкой II , называемой вторичной катушкой или вторичной обмоткой, соединяется цепь с приемниками электрической энергии.

Действие трансформатора заключается в следующем. При прохождении тока в первичной катушке I ею создается магнитное поле, силовые линии которого пронизывают не только создавшую их катушку, но частично и вторичную катушку II . Примерная картина распределения силовых линий, создаваемых первичною катушкою, изображена на рис. 1б. Как видно из рисунка, все силовые линии замыкаются вокруг проводников катушки I , но часть их (на рис. 1б силовые линии 1, 2, 3, 4) замыкаются также вокруг проводников катушки II . Таким образом катушка II является магнитно связанный с катушкой I при посредстве магнитных силовых линий. Степень магнитной связи катушек I и II , при коаксиальном расположении

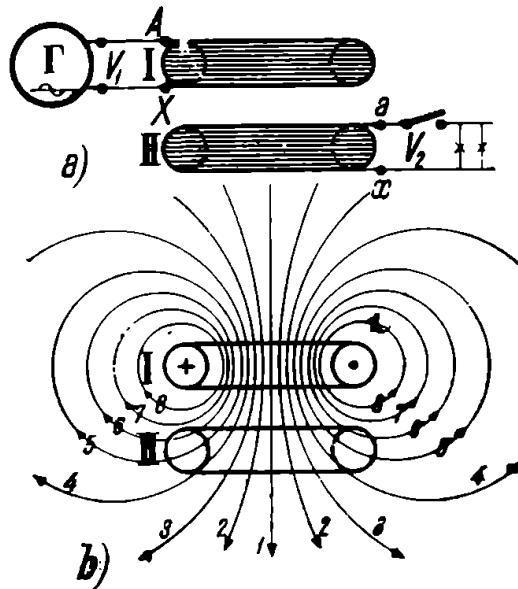


Рис. 1.

жении их, зависит от расстояния между ними: чем дальше катушки друг от друга, тем меньше магнитная связь между ними, ибо тем меньше силовых линий катушки I сцепляется с катушкой II . Так как через катушку I проходит, как мы предполагаем, переменный ток, т. е. ток, меняющийся во времени по какому-то закону, например по закону синуса, то и магнитное поле, им создаваемое, также будет меняться во времени по тому же закону. Например, когда ток в катушке I проходит через наибольшее значение, то и магнитный поток, им создаваемый, также проходит через наибольшее значение; когда ток в катушке I проходит через нуль, меняя свое направление, то и магнитный поток проходит через нуль, также меняя свое направление. В результате изменения тока в катушке I обе катушки I и II пронизываются магнитным потоком, непрерывно меняющим свою величину и свое направление. Согласно основному закону электромагнитной индукции при всяком изменении пронизывающего катушку магнитного потока в катушке индуцируется переменная электродвижущая сила. В нашем случае в катушке I индуцируется электродвижущая сила самоиндукции, а в катушке II индуцируется электродвижущая сила взаимоиндукции.

Если концы катушки II соединить с цепью приемников электрической энергии (см. рис. 1а), то в этой цепи появится ток; следовательно приемники получат электрическую энергию. В то же время к катушке I от генератора направится энергия, почти равная энергии, отдаваемой в цепь катушкой II . Таким образом электрическая энергия от одной катушки будет передаваться в цепь второй катушки, совершенно не связанной с первой катушкой гальванически (металлически). Средством передачи энергии в этом случае является только переменный магнитный поток.

Изображенный на рис. 1а трансформатор весьма несовершенен, ибо между первичной катушкой I и вторичной катушкой II магнитная связь невелика.

Магнитная связь двух обмоток, вообще говоря, оценивается отношением магнитного потока, сцепляющегося с обеими обмотками, к потоку, создаваемому одной катушкой.

Из рис. 1б видно, что только часть силовых линий катушки I замыкается вокруг катушки II . Другая часть силовых линий (на рис. 1б—линии 6, 7, 8) замыкается только вокруг катушки I . Эти силовые линии в передаче электрической энергии от первой катушки ко второй совершенно не участвуют, они образуют так называемое поле рассеяния.

Для того чтобы увеличить магнитную связь между первичной и вторичной обмотками и одновременно уменьшить магнитное сопротивление для прохождения магнитного потока, обмотки технических трансформаторов располагают на совершенно замкнутых железных сердечниках.

Первым примером выполнения трансформаторов может служить схематически изображенный на рис. 2 однофазный трансформатор так называемого стержневого типа. У него первичные и вторичные катушки c_1 и c_2 расположены на железных стержнях $a - a$, соединенных с торцами железными же накладками $b - b$, называемыми ярмами. Таким образом два стержня a , a и два ярма b , b образуют замкнутое железное кольцо, в котором и проходит магнитный поток, сцепляющийся с первичной и вторичной обмотками. Это железное кольцо называется сердечником трансформатора.

Вторым примером выполнения трансформаторов может служить схематически изображенный на рис. 3 однофазный трансформатор так называемого броневого типа.

У этого трансформатора первичные и вторичные обмотки c , состоящие каждая из ряда плоских катушек, расположены на сердечнике, образуемом двумя стержнями двух железных колец a и b . Кольца a и b , окружая обмотки, покрывают их почти целиком как бы бронею; поэтому описываемый трансформатор и называется броневым. Магнитный поток, проходящий внутри обмоток c , разбивается на две равные части, замыкающиеся каждое в своем железном кольце.

Применением железных замкнутых магнитных цепей у трансформаторов добиваются значительного снижения потока рассеяния. У таких трансформаторов потоки, сцепляющиеся с первичною и вторичною обмотками, почти равны друг другу. Предполагая, что первичная и вторичная обмотки пронизываются одним и

тем же магнитным потоком, мы можем на основании общего закона индукции для мгновенных значений электродвижущих сил обмоток написать выражения:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт};$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт}.$$

В этих выражениях w_1 и w_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток, а $d\Phi_t$ — величина изменения пронизывающего катушки магнитного потока за элемент времени dt ; следовательно $\frac{d\Phi_t}{dt}$ есть скорость изменения магнитного потока.

Из последних выражений можно получить следующее отношение:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2};$$

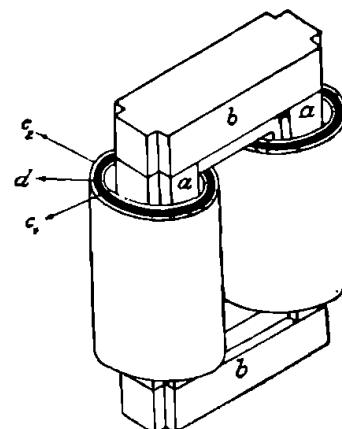


Рис. 2.

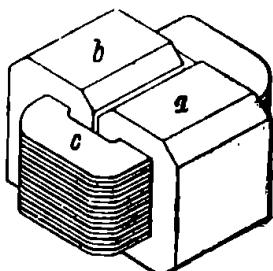


Рис. 3.

т. е. индектируемые в первичной и вторичной катушках I и II мгновенные электродвижущие силы относятся друг к другу так же, как числа витков катушек. Последнее заключение справедливо не только по отношению к мгновенным значениям электродвижущих сил, но и к их наибольшим и действующим значениям.

Электродвижущая сила, индуктируемая в первичной катушке, будучи электродвижущей силой самоиндукции, почти целиком уравновешивает приложенное к той же катушке напряжение (см. далее). Если через E_1 и V_1 обозначить действующие значения электродвижущей силы первичной катушки и приложенного к ней напряжения, то можно написать:

$$E_1 \cong V_1.$$

Электродвижущая сила, индуктируемая во вторичной катушке, равна в рассматриваемом случае напряжению на концах этой катушки. Если, аналогично предыдущему, через E_2 и V_2 обозначить действующие значения электродвижущей силы вторичной катушки и напряжения на ее концах, то можно написать:

$$E_2 \cong V_2.$$

Следовательно, приложив к одной катушке трансформатора некоторое напряжение, можно на концах другой катушки получить любое напряжение, стоит только взять подходящее отношение между числами витков этих катушек. В этом и заключается основное свойство трансформатора.

Отношение числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки называется коэффициентом трансформации и трансформатора. Коэффициент трансформации мы будем обозначать в дальнейшем буквой u .

Следовательно можно написать:

$$\frac{E_1}{E_2} \cong \frac{V_1}{V_2} = \frac{w_1}{w_2} = u,$$

т. е.

отношение электродвижущих сил первичной и вторичной обмоток трансформатора равно коэффициенту трансформации.

Трансформатор, у которого коэффициент трансформации меньше единицы, называется повышающим трансформатором, ибо у него напряжение вторичной обмотки, или так называемое вторичное напряжение, больше напряжения первичной обмотки, или так называемого первичного напряжения. Трансформатор, у которого коэффициент трансформации больше единицы, называется понижающим трансформатором, ибо у него вторичное напряжение меньше первичного.

Величины коэффициентов трансформации по ОСТу 4815 для трансформаторов разных мощностей см. в конце книги „Приложения“.

§ 2. Работа однофазного трансформатора под нагрузкою.

При холостой работе трансформатора магнитный поток создается током первичной обмотки или, впрочем, магнитодвижущей силой первичной обмотки, равной $0,4\pi I_0 w_1$, где I_0 — ток в обмотке, а w_1 — число ее витков. Так как магнитная цепь трансформатора выполняется из железа и потому имеет небольшое магнитное сопротивление, а число витков первичной обмотки берется обычно большим, то ток холостой работы трансформатора невелик; он составляет 5—10% нормального (см. далее).

Если замкнуть вторичную обмотку на какое-либо сопротивление, то с появлением тока во вторичной обмотке появится и магнитодвижущая сила этой обмотки.

Согласно закону Ленца магнитодвижущая сила вторичной обмотки действует против магнитодвижущей силы первичной обмотки.

Казалось бы, что магнитный поток в этом случае должен уменьшаться, но если к первичной обмотке подведено постоянное по величине напряжение, то уменьшения магнитного потока почти не произойдет. В самом деле, электродвижущая сила, индуцируемая в первичной обмотке, при нагрузке трансформатора почти равна приложенному напряжению (см. далее, § 23). Эта электродвижущая сила пропорциональна магнитному потоку. Следовательно, если первичное напряжение постоянно по величине, то и электродвижущая сила при нагрузке должна оставаться почти той же, какой она была при холостой работе трансформатора. Это обстоятельство имеет следствием почти полное постоянство магнитного потока при любой нагрузке.

Итак,

при постоянном по величине первичном напряжении магнитный поток трансформатора почти не меняется с изменением нагрузки и может быть принят равным магнитному потоку при холостой работе.

Магнитный поток трансформатора может сохранить свою величину при нагрузке лишь потому, что с появлением тока во вторичной обмотке увеличивается и ток в первичной обмотке и при том настолько, что разность магнитодвижущих сил или ампер-

витков первичной и вторичной обмоток остается почти равной магнитодвижущей силе или ампервиткам при холостой работе. Таким образом появление во вторичной обмотке размагничивающей магнитодвижущей силы или ампервитков сопровождается автоматическим увеличением магнитодвижущей силы первичной обмотки.

Так как для создания магнитного потока трансформатора требуется, как было указано выше, небольшая магнитодвижущая сила, то можно сказать, что увеличение вторичной магнитодвижущей силы сопровождается почти таким же по величине увеличением первичной магнитодвижущей силы. Это значит, что если при каком-либо токе во вторичной обмотке I_2 магнитодвижущая сила ее равна $0,4\pi I_2 w_2$, где w_2 — число витков вторичной обмотки, то можно сказать, что с большим приближением она равна магнитодвижущей силе первичной обмотки $0,4\pi I_1 w_1$, где I_1 — ток в первичной обмотке при токе I_2 во вторичной обмотке, а w_1 — число витков первичной обмотки.

Следовательно, можно написать:

$$0,4\pi I_2 w_2 = 0,4\pi I_1 w_1,$$

или

$$I_2 w_2 = I_1 w_1.$$

Из последнего равенства получается вторая основная характеристика трансформатора, а именно, отношение:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{u},$$

где u — коэффициент трансформации.

Таким образом

отношение токов первичной и вторичной обмоток трансформатора равно единице, деленной на его коэффициент трансформации.

Итак, основные характеристики трансформатора заключаются в отношениях:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = u;$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{u}.$$

Если перемножить левые части отношений между собой и правые части между собой, то получим

$$\frac{I_1 E_1}{I_2 E_2} = 1,$$

или

$$I_1 E_1 = I_2 E_2.$$

Последнее равенство дает третью характеристику трансформатора, которую можно выразить словами так:

отдаваемая вторичной обмоткой трансформатора мощность в вольт-амперах, почти равна мощности, подводимой к первичной обмотке также в вольт-амперах.

Если пренебречь потерями энергии в меди обмоток и в железе сердечника трансформатора, то можно сказать, что вся мощность, подводимая к первичной обмотке трансформатора от источника энергии, передается вторичной обмотке его, причем передатчиком служит магнитный поток. В этом отношении трансформатор можно уподобить механической зубчатой передаче, почему коэффициент трансформации называется иногда передаточным числом.

§ 3. Принцип действия и устройства трехфазных трансформаторов.

Трехфазный ток можно трансформировать тремя совершенно отдельными однофазными трансформаторами (см. дальше). В этом случае обмотки всех трех фаз магнитно не связаны друг с другом: каждая фаза имеет свою магнитную цепь. Но тот же трехфазный ток можно трансформировать и одним трехфазным трансформатором, у которого обмотки всех трех фаз магнитно связаны между собою, так как имеют общую магнитную цепь.

Чтобы уяснить себе принцип действия и устройства трехфазного трансформатора, представим себе три однофазных трансформатора, приставленных один к другому так, что три стержня их образуют один общий центральный стержень (рис. 4). На каждом из остальных трех стержней наложены первичные и вторичные обмотки (на рис. 4 вторичные обмотки не изображены).

Предположим, что первичные катушки всех стержней совершенно одинаковы и намотаны в одном направлении (на рис. 4 первичные катушки намотаны по часовой стрелке, если смотреть на них сверху). Соединим все верхние концы катушек в нейтраль O , а нижние концы катушек подведем к трем зажимам трехфазной сети. Токи в катушках создадут переменные во времени магнитные потоки, которые будут замыкаться каждый в своей магнитной цепи. В центральном составном стержне магнитные потоки сложатся и в сумме дадут нуль, ибо эти потоки создаются симметричными трехфазными токами, относительно которых мы знаем, что сумма мгновенных значений их равна нулю в любой момент времени. Например, если бы в катушке AX ток I_1 был наибольший и проходил в указанном на рис. 4 направлении, то магнитный поток был бы равен наибольшему своему значению Φ и был направлен в центральном составном стержне сверху вниз. В двух других ка-

тушках BY и CZ токи I_2 и I_3 в тот же момент времени равны половине наибольшего тока и имеют обратное направление по отношению

к току в катушке AX (таково свойство трехфазных токов). По этой причине в стержнях катушек BY и CZ магнитные потоки будут равны половине наибольшего потока и в центральном составном стержне будут иметь обратное направление по отношению к потоку катушки AX . Сумма потоков в рассматриваемый момент равна нулю. То же самое имеет место и для любого другого момента. Отсутствие потока в центральном стержне не означает отсутствия потоков в остальных стержнях. Если бы мы уничтожили центральный стержень, а верхние и нижние ярма соединили в общие ярма (см. рис. 5), то поток катушки AX нашел бы себе путь через сердечники катушек BY и CZ , причем магнитодвижущие силы этих катушек сложились бы с магнитодвижущей силой катушки AX . В таком случае мы получили бы трехфазный трансформатор с общей магнитной цепью всех трех фаз.

Так как токи в катушках смешены по фазе на $\frac{1}{3}$ периода, то и создаваемые ими магнитные потоки также смешены во времени на $\frac{1}{3}$ периода, т. е. наибольшие значения магнитных потоков в стержнях катушек следуют друг за другом через $\frac{1}{3}$ периода. Следствием сдвига по фазе магнитных потоков в сердечниках на $\frac{1}{3}$ периода является такой же сдвиг по фазе и электродвижущих сил, индуцируемых как в первичных, так и во вторичных катушках, наложенных на стержнях. Электродвижущие силы первичных катушек почти уравновешивают приложенное трехфазное напряжение. Электродвижущие силы вторичных катушек при правильном соединении концов катушек дают трехфазное вторичное напряжение, которое подается во вторичную цепь.

В отношении конструкции магнитной цепи трехфазные трансформаторы, как и однофазные, разделяются на стержневые и броневые. Стержневые трансформаторы подразделяются на: а) трансформаторы с симметричной магнитной цепью и б) трансформаторы с несимметричной магнитной цепью. На рис. 6 схематически изображен стержневой трансформатор с симметричной магнитной цепью, а на рис. 7 изображен стержневой трансформатор с несимметричной магнитной цепью. Как видно из рисунков, оба трансформатора состоят из трех железных стерж-

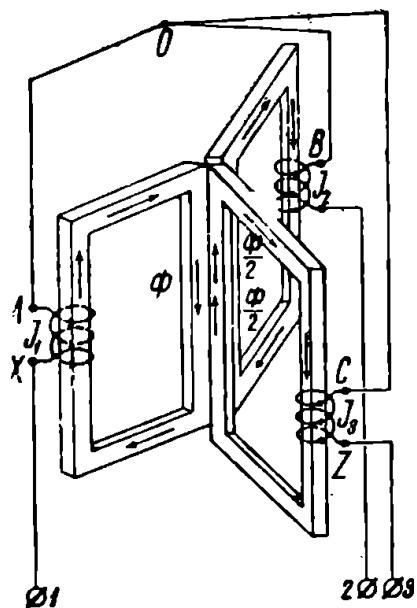


Рис. 4.

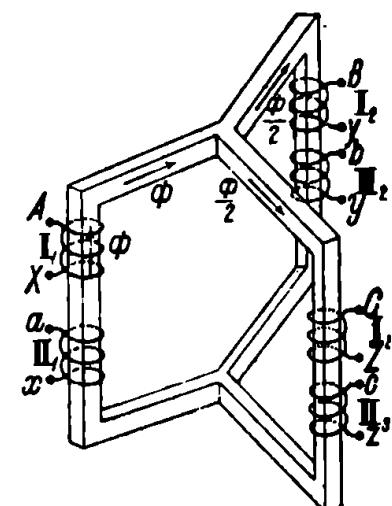


Рис. 5.

ней 1, 2 и 3, схваченных сверху и снизу железными накладками-ярмами. На каждом стержне находится первичная I и вторичная II катушки одной фазы.

У первого трансформатора стержни расположены по вершинам углов равностороннего треугольника; у второго трансформатора стержни расположены в одной плоскости.

Расположение стержней по вершинам углов равностороннего треугольника дает равные магнитные сопротивления для магнитных потоков всех трех фаз, так как пути прохождения этих потоков одинаковы. В самом деле, магнитные потоки трех фаз проходят каждый в отдельности через один вертикальный стержень полностью и через два других стержня по половине. На рис. 6 пунктиром изображены пути замыкания магнитного потока фазы стержня 2.

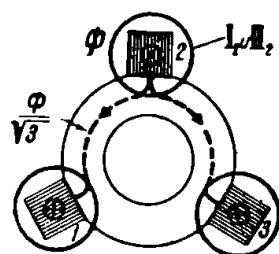
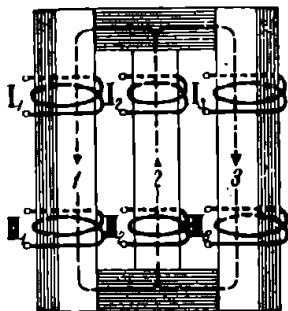


Рис. 6.

Легко видеть, что для потоков фаз стержней 1 и 3 пути замыкания их магнитных потоков совершенно одинаковы. Это значит, что у рассматриваемого трансформатора магнитные сопротивления для потоков равны между собою.

Расположение стержней в одной плоскости приводит к тому, что магнитное сопротивление для потока средней фазы (на рис. 7 для фазы стержня 2) меньше, нежели для потоков крайних фаз (на рис. 7—для фаз стержней 1 и 3). Действительно магнитные потоки крайних фаз проходят по несколько более длинным путям, чем поток средней фазы. Кроме того, поток крайних фаз, выйдя из своих стержней, проходит в одной половине ярма полностью, и только в другой половине (после ответвления в средний стержень) проходит его половину. Поток же средней фазы по выходе из вертикального стержня тотчас же разветвляется на две половины, и потому в обеих частях ярма проходит лишь половина потока средней фазы. Таким образом потоки крайних фаз насыщают ярмо в большей степени, чем поток средней фазы, а потому магнитное сопротивление для потоков крайних фаз больше, чем для потока средней фазы.

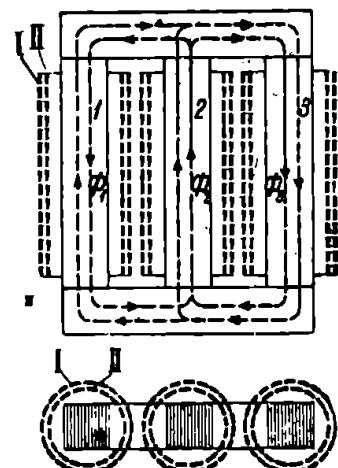


Рис. 7.

Следствием неравенства магнитных сопротивлений для потоков разных фаз трехфазного трансформатора является неравенство токов холостой работы в отдельных фазах при одном и том же фазном напряжении.

Следствием неравенства магнитных сопротивлений для потоков разных фаз трехфазного трансформатора является неравенство токов холостой работы в отдельных фазах при одном и том же фазном напряжении.

Однако при небольшой насыщенности железа ярма и хорошей сборке железа стержней это неравенство токов незначительно. Так как конструкция трансформаторов с несимметричной магнитной цепью значительно проще, чем трансформаторы с симметричной магнитной цепью, то первые трансформаторы и нашли себе преимущественное применение. Трансформаторы с симметричной магнитной цепью встречаются редко.

Рассматривая рис. 6 и 7 и предполагая, что во всех трех фазах проходят токи, легко видеть, что все фазы магнитно связаны друг с другом. Это значит, что магнитодвижущие силы отдельных фаз влияют друг на друга, чего мы не имеем, когда трехфазный ток трансформируется тремя однофазными трансформаторами.

Вторую группу трехфазных трансформаторов составляют броневые трансформаторы. Броневой трансформатор можно рассматривать как бы состоящим из трех однофазных броневых трансформаторов, приставленных один к другому своими ярами.

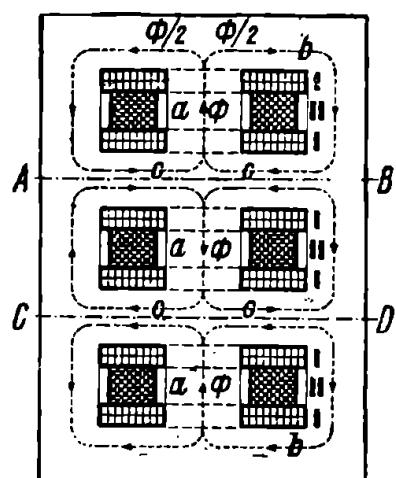


Рис. 8.

На рис. 8 схематически изображен броневой трехфазный трансформатор с вертикально расположенным внутренним стержнем. Легко видеть из рисунка, что плоскостями AB и CD он может быть разбит на три однофазных броневых трансформатора, магнитные потоки которых могут замыкаться каждый по своей магнитной цепи. Пути прохождения магнитных потоков на рис. 8 указаны пунктирными линиями. Как видно из рисунка, в средних вертикальных стержнях a , на которых наложены первичная I и вторичная II обмотки одной фазы, проходит

полный поток, тогда как в ярмах $b-b$ и боковых стенках проходит по половине потока. При одной и той же индукции сечения ярма и боковых стенок должны быть вдвое меньше сечения среднего стержня a .

Что касается магнитного потока в промежуточных частях $c-c$, то его величина, как мы увидим далее, зависит от способа включения средней фазы.

Броневые трансформаторы широко распространены в Америке. В Европе они встречаются значительно реже.

Главным преимуществом броневых трансформаторов перед стержневыми трансформаторами являются короткие пути замыкания магнитных потоков, а следовательно, небольшие токи холостой работы. К недостаткам броневых трансформаторов можно отнести, во-первых, малую доступность обмоток для ремонта, ввиду того, что они окружены железом, и, во-вторых, худшие условия охлаждения обмотки — по той же причине. У стержневых трансформаторов обмотки почти целиком открыты и потому более доступны для осмотра и ремонта, а также и для охлаждающей среды.