М. Видмар

Теория и работа электрических машин

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 53
ББК 22.3
М11

М. Видмар
М11 Теория и работа электрических машин / М. Видмар – М.: Книга по Требованию, 2023. – 210 с.

ISBN 978-5-458-56311-6

Описание о назначениях электрических машин а также Задача теории Механизирование трансформации. Синхронные машины и асинхронные машины, Коллекторные машины. Электротехника оперирует напряжениями, вызывающими электрический ток. Роль разности высот верхнего и нижнего уровня воды в гидравлической установке играет в электрических цепях напряжение. Количеству воды, проходящему единицу времени через турбину, соответствует сила тока.

ISBN 978-5-458-56311-6

© 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 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

Введение.

1. НАЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. ЗАДАЧА ТЕОРИИ.

Электротехника оперирует напряжениями, вызывающими электрический ток. Роль разности высот верхнего и нижнего уровня воды в гидравлической установке играет в электрических цепях напряжение. Количеству воды, проходящему в единицу времени через турбину, соответствует сила тока.

Как без разности высот нельзя получить гидравлической энергии, так и без напряжений не могут существовать работающие электрические цепи. Могущие быть использованными разности высот нам дает сама природа, в то время как напряжения приходится создавать. Само собой разумеется, что получение необходимых напряжений является одной из важнейших проблем электротехники.

Из водных сил мы добываем энергию, которая в свою очередь должна была быть сообщена воде. Как это происходит, мы знаем. Солнце поднимает воду из морей, образует облака, с которых вода ниспадает на горы. Оно работает как чудовищный насос, неутомимо поддерживающий естественную циркуляцию воды.

Когда мы заставляем работать электрические цепи, мы также должны подводить энергию, чтобы затем ее преобразовать в электрическую. Мы должны непременно вздымать высоко электроны, чтобы затем, для работы, они падали вниз, подобно потоку. Нам нужен насос, подобный солнцу, нам нужен электрический генератор.

Генератор — наиболее важная электрическая машина. Его назначение — преобразование механической энергии в электрическую. Он создает напряжение и поддерживает его. Генератор — сердце всякой электрической установки.

Мы знаем, что энергия легко меняет свою форму, что она одинаково легко переходит из механического вида в электрический, как и из электрического в механический. В виду этого не трудно перевернуть процесс работы генератора. Таким образом получается электрический мотор. Мотор также является машиной. Мы называем энергетической машиной всякий преобразователь энергии, длительно работающий, и на одной стороне которого находится механическая энергия.

Имеются, однако, электрические машины, не подходящие под это определение. Электрическая энергия сама по себе проявляется в различных формах, менять которые нам нужно уметь. Электрическая цепь, обладающая высоким напряжением и малой силой тока, может развивать такую же мощность, как цепь с малым напряжением и большим током.

Мы охотно используем энергию при малом напоре, но при большом количестве воды. Еще приятней для нас немноговодные потоки с высоким падением. К сожалению, мы вынуждены пользоваться водяной силой в том виде, как она встречается в природе. В виду этого многие источники гидравлической энергии остаются неиспользованными. Однако то, что на нашем свете является невозможным — в мире электричества легко достигается. Трансформатор по нашему желанию преобразовывает электрическую энергию.

С полным правом мы считаем трансформатор также электрической машиной, хотя он и не имеет никакого механического привода. Он является таким же преобразователем электрической энергии, как генератор или мотор. Теория электрических машин, как мы увидим ниже, не может исключить из своего рассмотрения трансформатор. Все электрические машины являются своего рода трансформаторами. Существует, собственно говоря, только одна возможность создания напряжений — путем использования электромагнитной энергии. Электротехника, правда, начала с другого. Но теперь для длительной работы используется только напряжение, индуктируемое изменяющимся по времени магнитным потоком. Таким образом, во главу угла теории построения электрических машин нужно поставить закон электромагнитной индукции. Магнитный поток, содержащий Φ силовых линий, наводит в каждом охватывающем его проводнике напряжение E_i — если напряженность поля изменяется по времени; напряжение E_i пропорционально скорости убывания количества силовых линий. Если в элемент времени dt число силовых линий уменьшается на $d\Phi$, то

$$E_i = -\frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Всякая техническая электрическая цепь нуждается в длительном напряжении. В эксплоатации мы должны иметь возможность рабочее состояние машин повторять и сохранять его произвольно долго. Гальванические элементы поэтому для этой цели не годятся, так как они быстро расходуются. Нам нужно иметь непрерывный поток энергии, чтоб иметь возможность им непрерывно пользоваться.

Уравнение (1) приводит нас к мысли о непрерывно убывающем и неисчерпаемом магнитном потоке, так как мы имеем в виду создание длительного напряжения постоянной величины. Но подобный поток получить мы не в состоянии. С этой точки зрения закон электромагнитной индукции практических результатов не дает.

Мы должны прибегнуть к такому магнитному потоку, число силовых линий которого то возрастает, то убывает, т.-е. претерпевает колебания; интенсивность такого потока представляет собой периодическую функцию от времени. При этом, конечно, и величина наведенного напряжения будет также колебаться, периодически изменяясь во времени. Другого пути для получения длительного рабочего напряжения нет. Нам приходится допустить изменение величины рабочих факторов внутри одного периода. Зато мы имеем возможность заставлять такие одинаковые периоды следовать друг за другом произвольное число раз, создав таким образом нечто длительное, необходимое в жизни.

В этом заключается идея переменного тока, к которой нас неизменно приводит закон электромагнитной индукции. Вполне, однако, понятно, что нам ближе постоянный ток с его неизменным напряжением и постоянно одинаковой силой. То обстоятельство, что и постоянный ток и постоянные напряжения являются результатом применения закона индукции, что

машины постоянного тока строятся по тому же принципу, как машины переменного тока, — кажется непонятным и ни в коей мере не вытекает из уравнения (1).

Кристально чистый закон индукции, выраженный уравнением (1), мы будем встречать в теории электрических машин в различных его модификациях. По существу своему он представляет собой один из самых замечательных и таинственных законов физики. Построение электрических машин раскрыло многие его тайны, постигло многие его тонкости, и он стал краеугольным камнем громадного здания, каковое представляет собой теория электрических машин в ее современном развитии.

Строя машины как переменного, так и постоянного тока, мы, естественно, должны иногда строить машины, преобразовывающие постоянный ток в переменный и обратно. Эти преобразователи также являются машинами постольку, поскольку они служат для преобразования энергии. Механический привод для них является несущественным придатком.

Генератор, моторы, преобразователи и трансформаторы представляют собой разновидности электрических машин, имеющие каждая свою эксплоатационную задачу. Но за различием формы все же скрывается их единая сущность электрической машины.

Наиболее благодарная задача теории — дать общее описание принципа действия электрических машин, т.-е. нарисовать такую физическую картину, которая годилась бы для любой электрической машины и показала бы, что разные машины являются лишь отдельными модификациями. Лишь только после того, как правильно будет решена эта задача, легко будет понимать детали. Действительность показывает, что вполне возможно единообразно изложить основные свойства всех машин и тем самым создать для теории машин мощный остов. Оказывается возможным показать, что все формы исполнения являются лишь частными случаями, в которых отдельные свойства машины получили наибольшее развитие. Есть возможность дать ясный обзор всего электромашиностроения и тем самым помочь инженеру овладеть этой важнейшей отраслью электротехники.

Вполне понятно, что теорию электрических машин необходимо начать с элементарной картины. Такую картину дает трансформатор. Теорию последнего легко развить в теорию универсального трансформатора, охватывающую все электрические машины. Прорабатывая детали, мы узнаем принципы действия генераторов моторов и преобразователей. Самостоятельную ветвь этой теории представляют собой коллекторные машины.

I. Трансформатор.

2. ЗНАЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ. ТРАНСФОРМАТОР НАПРЯЖЕНИЯ. ТРАНСФОРМАТОР ТОКА.

В современных обширных электрических установках мы различаем три, строго обособленных части. На месте нахождения естественного источника энергии—гидравлической энергии или месте нахождения запасов угля или нефти—сооружается устройство для получения электрической энергии. На большом или малом расстоянии от него находятся потребители—осветительные сети, заводы с электромоторами и т. п. Место производства энергии соединяют с местом ее потребления линии электропередач.

Потребителям нужно иметь низкое напряжение, например 220 вольт. Очевидно, что в жилища нельзя вводить опасного для жизни напряжения. Распределительные сети, поэтому, должны передавать большие токи и сохранять при этом предписанное низкое напряжение.

Дальняя электропередача не может работать при низком напряжении. С увеличением дальности передачи энергии возрастает и рабочее напряжение. В Европе работают уже с напряжением 220 000 вольт и недалека от разрешения проблема электропередачи при напряжении 380 000 вольт.

Генераторы крупных установок не могут быть построены ни на низкое напряжение потребителей, ни на высокое напряжение электропередач. Электрические машины имеют свои особенности, рассмотреть которые необходимо. Таким образом возникает необходимость иметь в электрической установке еще третье напряжение; но и этого третьего напряжения зачастую бывает недостаточно и приходится прибегать к четвертому напряжению—для линий среднего напряжения между электропропередачей и распределительной сетью, что облегчает проникновение электрического тока к разбросанным потребителям.

Поток энергии, направляясь от места его возникновения к потребителю, должен на этом пути претерпеть много превращений. При постоянной мощности, равной произведению силы тока на напряжение, меняются составляющие ее факторы. В этом заключается задача трансформатора. Легко усмотреть, что от работоспособности наших трасформаторов сильно зависит развитие крупных электрических установок. Чем выше мы можем поднять напряжение трансформаторов, тем дальше возможно будет передать энергию. Таким образом, трансформатор сам по собе содействует успехам техники сильных токов.

Нормальные установки работают при напряжении постоянной величины, не испытывающем сколько-нибудь значительных колебаний. Конечно внутри одного периода напряжение переменного тока изменяется от своей

Пусть магнитный поток в некоторый момент времени t имеет Φ линий. По закону индукции этот поток наводит в каждом охватывающем его витке напряжение

$$E_{it} = -\frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8}.$$

Суммарное напряжение обмотки составляется из совершенно одинаковых напряжений отдельных витков. Оно потому в w_1 раз больше напряжения каждого витка. Равновесие напряжений наступит, когда

$$E_1 \cdot \sqrt{2} \sin \omega t - w_1 \cdot \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

Из уравнения (2) находим

$$\Phi_t = \frac{E_1 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^8}{\omega \cdot w_1} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

т. е., что магнитный поток является величиной переменной, изменяющейся с такой же периодичностью, как приложенное напряжение; максимальное значение числа сильных линий пропорционально эффективному значению подводимого напряжения.

Понятие о равновесии весьма важно для теории трансформатора, а следовательно, и для всей теории электрических машин. Приложенное напряжение должно находиться в равновесии с наведенным магнитным потоком напряжением. Это равновесие устанавливается во всякое время само собой; намагничивающий ток, вызывающий магнитный поток, возрастает до тех пор, пока не наступит равновесие. Одна из труднейших проблем эксплоатации трансформаторов — это создание надежной гарантии для равновесия напряжений.

С другой стороны, магнитный поток попадает в полную зависимость от подводимого напряжения. Магнитный поток изменяется вместе с напряжением и имеет одинаковое с напряжением число периодов. Разумеется, что эта зависимость является только следствием устанавливающегося с неумолимой точностью равновесия напряжений.

Находящийся под мощным электрическим воздействием магнитный поток на практике может нам оказать некоторую услугу. Он наводит напряжения в каждом витке другой, состоящей из w_2 витков, обмотке, также охватывающей этот поток, но электрически разделенной от первой обмотки. Совершенно очевидно, что все окружающие поток витки для него равнозначущи; в каждом из них поток наводит одинаковые напряжения. Таким образом, во второй обмотке появляется суммарное напряжение E_2, величина которого относится к величине наведенного, а следовательно и приложенного к первой обмотке напряжения, — как число витков этих обмоток

$$E_1 : E_2 = w_1 : w_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

После этого ясно, что вполне возможно произвольно уменьшать или увеличивать напряжение переменного тока, и что передаточное число может быть установлено достаточно точно.

При этом, однако, нужно, чтобы было соблюдено одно условие. Вызывающий трансформацию магнитный поток должен проходить всеми своими силовыми линиями как через обмотку, к которой приложено трансформируемое напряжение (первичную), так и через вторую обмотку, на клеммах которой устанавливается преобразованное напряжение (вторичную). Только при этом условии все витки равнозначащи, независимо к какой обмотке они ни принадлежали бы.

Мы заставляем силовые линии избрать желательный нам путь через отверстия внутри витков тем, что создаем на этом пути минимальное магнитное сопротивление, так как пропускаем поток по железу. Железо проводит магнитные линии в тысячу раз лучше, чем воздух. Таким путем практически удается претворить в жизнь идею трансформации напряжения.

Трансформатор немыслим без железного сердечника, так же, как немыслима без железного сердечника любая другая электрическая машина. Несмотря на то, что железо обладает рядом неприятных свойств, вследствие его магнитных особенностей, оно тем не менее, благодаря свой громадной магнитной проводимости, сделалось незаменимым в электромашиностроении.

В железных сердечниках трансформаторов мы различаем керны, на которых помещаются обмотки, и ярма, на которых обмоток нет. В механическом отношении весь сердечник является прочной опорой для обмоток, одетых на керны. Необходимость собирать сердечник из отдельных тонких листов дела не меняет.

4. НАГРУЗКА ТРАНСФОРМАТОРА. ЗАКОН РАВНОВЕСИЯ.

Вызываемая магнитным потоком трансформация напряжений может быть с исключительной простотой представлена при помощи векторной диаграммы.

Приложенное напряжение E_1, вектор которого наносится первым на диаграмму (рис. 2), вызывает поток Φ; вектор последнего, согласно уравнения (2), отстает на 90° от вектора напряжения E_1. Наведенное потоком в первичной обмотке напряжение E_1 отстает, как всякое наведенное напряжение, от своего потока на 90°. Таким образом его вектор имеет прямо противоположное направление с вектором E_1. В фазе с магнитным потоком находится возбуждающий его намагничивающий ток I_m. Для трансформируемого напряжения этот ток является индуктивной нагрузкой, и его вектор отстает поэтому на 90° (рис. 2). Строго говоря намагничивающий ток нельзя изображать в виде вектора. Задачей намагничивающего тока является выравнивание всякого нарушения равновесия напряжений в первичной обмотке. На нем отражаются поэтому явления магнитного гистерезиса в железе. Как мы увидим позже, под действием гистерезиса он сильно искажается и не является синусоидальным, в то время как магнитный поток и вторичное напряжение строго синусоидальны, если только синусоидально приложенное напряжение.

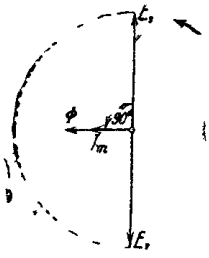

Рис. 2

Как известно, только синусоидальные величины могут быть представлены в виде векторов Если все-таки на диаграмме изображают намагничивающий ток, то под этим разумеют основную волну искаженной в действительности кривой. Необходимо с самого начала обратить внимание на это обстоятельство.

Пока мы имеем пред собой только картину ненагруженного трансформатора, так как во вторичной обмотке тока нет. Последняя во время работы должна обтекаться рабочим током, в чем, собственно говоря, и состоит нагрузка трансформатора.

Как только замыкается вторичная обмотка, в ней появляется рабочий ток I_2 (рис. 3) Он стремится нарушить равновесие напряжений в первичной обмотке, пытаясь возбудить сердечник Очевидно, что ампервитки

нагрузки I_2w_2 не должны проявлять себя. Магнитный поток сердечника должен всегда, несмотря на нагрузку, соответствовать равновесию напряжений в первичной обмотке.

Если только один выход. Первичная обмотка берет из сети ток I_1; при этом ее ампервитки I_1w_1 должны быть равны и противоположны ампервиткам вторичной обмотки

$$I_1w_1 = I_2w_2 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (4)$$

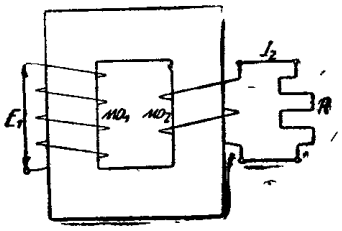

Рис. 3

Действующим остается только намагничивающий ток I_m, обтекающий наряду с I_1 первичную обмотку.

На диаграмме рис. 4 вектор наведенного вторичного напряжения E_2 имеет то же направление, как и вектор наведенного магнитным потоком в первичной обмотке противодействующего напряжения E_1. Вторичный нагрузочный ток I_2 отстает от вторичного напряжения E_2 на угол φ, величина которого определяется характером нагрузки. Этим же углом характеризуется направление вектора вторичных ампервитков I_2w_2; вектор первичных витков I_1w_1, необходимых для магнитного уравновешивания действия тока I_2, имеет прямо противоположное направление. Первичный суммарный ток складывается из тока нагрузки I_1 и из намагничивающего тока I_m.

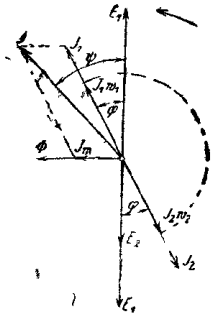
Рис. 4

Легко убедиться в том, что первичный суммарный ток имеет такую же активную слагающую, как первичный ток нагрузки, так как намагничивающий ток I_m всегда является реактивным. Поэтому из рис. 4 имеем

$$Iw_1 \cos\psi = I_2w_2 \cos\varphi,$$

откуда

$$IE_1 \cos\psi = I_2 E_2 \cos\varphi,$$

чем достигается баланс энергии.

Идеальный трансформатор передает весь поток энергии без изменения с первичной обмотки на вторичную, при этом напряжения изменяются в отношении числа витков, а токи — обратно пропорционально числу витков первичной и вторичной обмотки. Кроме того, трансформатор загружает первичную сеть реактивным током — намагничивающим — что необходимо для возбуждения магнитного потока.

Работа трансформатора при любой нагрузке регулируется двумя законами равновесия: электрическим и магнитным. Первое заключается в том, что в первичной обмотке должны уравновешиваться напряжения. Магнитное равновесие состоит в равенстве при нагрузке ампервитков первичных и вторичных, что в свою очередь, необходимо опять-таки для сохранения электрического равновесия.

Конечно, в первичной обмотке, в действительности, протекает всегда суммарный ток, а не его составляющие: нагрузочный ток и намагничивающий. Физически правильней было бы считать, что магнитный поток является результатом одновременного воздействия как первичных, так и вторичных ампервитков. Но очевидно, что в этом случае, активными в магнитном отношении являются лишь ампервитки намагничивающего тока I_mw_1.

Рис. 4 соответствует также и этому представлению. Последнее, после данного выше описания принципа действия идеального трансформатора, понятно без дальнейших рассуждений; это представление, кроме того, делает особенно понятным нижеследующее равенство

$$E_1 I w_1 \cos\varphi = E_2 \cdot I_2 w_2 \cos\varphi.$$

5. ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПОТЕРЯ ЭНЕРГИИ.

Реальный трансформатор отличается от идеального во многом. Эти отклонения должны быть рассмотрены теорией. Дело в том, что провода обеих обмоток обладают сопротивлением, а железо допускает прохождение некоторых силовых линий через воздух.

Если первичная обмотка имеет некоторое омическое сопротивление R (ом), то часть приложенного напряжения E_1 должна пойти на преодоление падения напряжения в этом сопротивлении.

Теперь уже не только одно наведенное магнитным потоком напряжение E_i должно уравновешивать приложенное напряжение E_1, теперь ему приходит на помощь падение напряжения в омическом сопротивлении IR_1.

Таким образом, теперь трансформируется не полное напряжение E_1, а разница между последним и IR_1. То же самое можно себе представить, если предположить, что одновременно с напряжением E_1 трансформируется и омическое падение напряжения I_1R_1, действие которого проявляется во вторичной обмотке.

Но вторичная обмотка имеет свое омическое сопротивление R_2, от чего и в ней происходит падение напряжения I_2R_2. Так-что на клеммах вторичной обмотки мы располагаем напряжением, меньшим на величину падения напряжения во вторичной обмотке I_2R_2 и на величину трансформированного падения напряжения

$$IR_1 \cdot \frac{w_1}{w_2},$$

чем соответствующее вторичное напряжение идеального трансформатора

$$E_1 \frac{w_1}{w_2}.$$

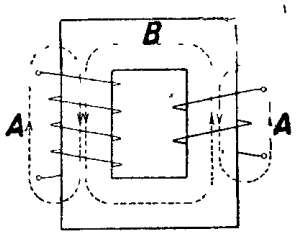

Рис. 5

Действительный трансформатор работает с потерей напряжения. Но описанное выше падение напряжения не является единственным. Приходится учитывать еще другие падения напряжения, так как обмотки имеют, кроме омических, еще индуктивные сопротивления.

Ампервитки обоих обмоток возбуждают силовые линии, замыкающиеся вокруг находящихся под током проводов. Только в железе, в этом естественном русле магнитного потока, силовые линии от ампервитков обоих обмоток действуют почти все друг другу навстречу, тем самым оставляя в силе только ампервитки намагничивающего потока. Однако остаются еще пути для силовых линий, охватывающих только одну из обмоток (рис. 5). Эти силовые линии возбуждаются ампервитками соответствующей обмотки.

Наряду с главным потоком, сцепленным с витками обоих обмоток, существует еще первичный и вторичный поток рассеяния. Первичный поток рассеяния сцеплен только с первичной обмоткой, а вторичный — только со вторичной обмоткой. Главный поток возбуждается разностью

ампервитков обоих обмоток, а потоки рассеяния ампервитками соответствующих обмоток. Казалось бы, что в виду этого потоки рассеяния должны быть больше, чем главный поток, так как ампервитки каждой из обмоток превосходят ампервитки намагничивающего тока. Намагничивающий ток является, как то следует из описания идеального трансформатора, добавочным, бесполезным для эксплоатации, но необходимым для наведения главного магнитного потока. Он потребляется самим трансформатором и, как и ток индуктивный, ухудшает коэффициент мощности установки. Поэтому намагничивающий ток не должен быть слишком большим сравнительно с током нагрузки.

Однако, хотя ампервитки, возбуждающие потоки рассеяния, много больше, чем намагничивающие ампервитки, образующие главный поток, тем не менее потоки рассеяния на много меньше главного потока. Как показано на рис. 5, потоки рассеяния вынуждены искать себе путь через воздух, в то время как главный поток проходит по железу. Колоссальная разница между магнитной проводимостью железа и воздуха снижает число силовых линий потоков рассеяния до сотых долей числа линий главного потока. Силовые линии рассеяния, сцепленные только с витками возбуждающих их обмоток, сообщают последней индуктивное сопротивление; индуктивным сопротивлением обладает всякий обтекаемый переменным током проводник, ибо при этом он окружен силовыми линиями. В первичной обмотке индуктивное сопротивление x_1 должно преодолеваться приложенным напряжением, если через обмотку должен проходить ток I. Напряжение Ix_1 наравне с напряжением IR_1 помогает наведенному напряжению E_i.

То же самое можно себе представить иначе, а именно, что вместе с приложенным напряжением E_1 одновременно трансформируется напряжение Ix_1. Тогда мы должны учесть на клеммах вторичной обмотки потерю напряжения

$$Ix_1 \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

помимо падения напряжения $I_2 x_2$ в ней самой от собственного индуктивного сопротивления x_2 (ом).

При составлении полной векторной диаграммы (рис. 6) лучше всего исходить из вектора вторичного напряжения на клеммах E_2. Величина и направление вектора вторичного тока I_2 зависят от характера нагрузки. Кроме напряжения на клеммах, во вторичной обмотке имеет место еще падение напряжения $I_2 R_2$, совпадающее по фазе с током нагрузки, и падение напряжения $I_2 x_2$, опережающее ток на 90°; все эти напряжения должны наводиться главным магнитным потоком. Вектора E_2, $I_2 R_2$ и $I_2 x_2$, складываясь дают наведенное во вторичной обмотке суммарное напряжение E_{i2}.

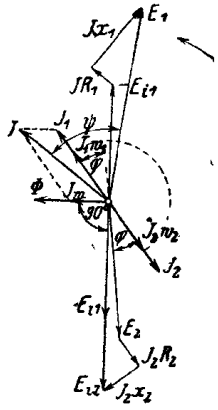

Рис. 6

Вектор E_{i2}, разумеется, опережается вектором главного потока на 90°. В фазе с E_{i2} находится наведенное в первичной обмотке противодействующее напряжение E_{i1}. Вектор необходимого первичного намагничивающего тока находится в фазе с главным магнитным потоком; вектор первичного тока нагрузки I_1 направлен прямо противоположно вектору I_2. Суммарный первичный ток I получается в результате сложения векторов I_m и I_1.

Приложенное напряжение E_1 уравновешивает наведенное напряжение E_{i1}, вектор которого мы уже определили, падение напряжения IR_1, вектор

которого совпадает по направлению с I, и падение напряжения Ix, отстающее от I на 90°. Построение вектора E_1 ясно из рис. 6.

Рис. 6 дает представление о потере напряжения в трансформаторе. Закон трансформации напряжений действителен только для напряжений, наведенных главным потоком

$$E_{t1} : E_{t2} = w_1 : w_2.$$

Закон трансформации нагрузочных токов, гласящий

$$I_1 : I_2 = w_1 : w_2,$$

остается в силе.

В реальном трансформаторе большое значение имеют Джоулевы потери $I^2 R_1$ и $I_2^2 R_2$. Они отражаются на стоимости электрической энергии, уменьшающейся в результате трансформации. Эти потери являются доминирующими в трансформаторе.

Как известно, в железном сердечнике также происходят потери. Для полного перемагничивания железа в течение каждого периода требуется энергия, что ведет к потерям на перемагничивание. Кроме того, вокруг силовых линий в железе, являющемся, как известно, хорошим проводником, образуются вихревые токи, вызываемые последними. Джоулевы потери называются потерями на вихревые токи. Они уменьшаются с уменьшением толщины железных листов; избавиться, от них окончательно, однако, невозможно.

Несовершенство материалов вызывает несовершенство трансформации. Вообще, нет машины, которая работала бы без потерь. Трансформатор в свою очередь не может не разделить участи всех устройств нашего несовершенного мира. Однако, необходимо тут же отметить, что реальный трансформатор все-таки мало отличается от идеального. Падение напряжения в трансформаторе выражается в сотых долях рабочего напряжения. Точно так же и потери в трансформаторе уменьшают мощность трансформируемого потока энергии на сотые доли.

Иначе и не могло бы быть Потери энергии проявляются в виде выделения тепла при работе; это тепло должно отводиться, во избежание перегрева трансформатора. Изолирующие материалы, окружающие проводники обмотки, не выносят высоких рабочих температур. Все части трансформатора неподвижны, вследствие чего отвод тепла в окружающий воздух является еще более необходимым.

Как раз эта необходимость надлежащего охлаждения заставляет нас снижать величину потери энергии. Очень большие трансформаторы потребляют около одной сотой всего количества трансформированной энергии, а малые трансформаторы, обладающие относительно большой охлаждающей поверхностью, редко удерживают более 5% протекающей энергии.

Падение напряжения стоит в определенной зависимости от потерь энергии в обмотках, что мы будем иметь возможность доказать более точно. Оно держится поэтому, во избежание неприятных последствий, в известных пределах. Нужно сказать, что трансформатор является самой совершенной электрической машиной, любое исполнение которой более совершенно, чем всякая другая конструкция в машиностроении.

6. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРА.

Векторная диаграмма дает хорошее представление о работе трансформатора и является незаменимой при изучении происходящих в нем электрических и магнитных явлений; недостатком векторной диаграммы