

Нагрузочная способность трансформаторов МТС.

Анализ явлений в электромагнитных системах и гипотезы

В ответ на многочисленные вопросы читателей журнала

Олег Казаков,
Владимир Казаков

kvladimir3@yandex.ru

Компактные трансформаторы МТС, описанные в [1–4], с ферромагнитной обмоткой, совмещающей функции центрального сердечника, пока непривычны, поэтому у специалистов возникают вопросы: каковы нагрузочная способность трансформатора, электродинамические усилия между его частями, излучения помех. В процессе создания новых электромагнитных устройств и систем у многих специалистов накапливаются собственные, часто применяемые лаконичные методы расчетов и описания явлений, универсальные технические и технологические решения, которые обеспечивают разной степени удобства в работе, сокращают сроки и повышают качество ее выполнения. Обмен такой статистической информацией между специалистами важен, так как позволяет уменьшить количество собственных экспериментов и расчетов, снижает уровень погрешностей и количество дорогостоящих ошибок. Для описания новой конструкции трансформатора в данной статье использованы собственные краткие трактовки, которые, может быть, понравятся электротехникам, несмотря на то, что для последовательного изложения пришлось также кратко повторить общеизвестные истины. Здесь рассмотрим только синусоидальные напряжения и токи, так как напряжения и токи с другими временными диаграммами можно свести к сумме синусоидальных. В формулах используем систему единиц измерений СИ.

Вторичные токи — необходимое условие первичных токов

Идеализируем однофазный электромагнитный трансформатор с двумя обмотками, считая его потоки рассеяния магнитного поля и другие потери равными нулю. Полный ток I_1 первичной обмотки в трансформаторе можно регулировать, меняя полные токи, создающиеся в среде, окружающей эту обмотку: полный ток проводимости — полный ток I_2 вторичной обмотки путем изменения нагрузки; полный ток I_μ намагничивания сердечника — используя сердечники с разными значениями магнитной проницаемости μ материала. С учетом влияния формы сердечника векторная сумма полных вторичных токов противоположна векторам первичного тока: $I_1 = -I_2 - I_\mu$. Несмотря на электропроводность первичной обмотки и напряжение на ее выводах, отсут-

ствие встречных токов I_2 и I_μ препятствует возникновению тока I_1 в этой обмотке. Значит, кроме наличия электрического поля напряженностью E и носителей электрического заряда $\pm q$, способных двигаться в направлении этого поля, третьим обязательным условием электрического тока в проводе является создание токов в среде, окружающей провод, противоположных данному току. Докажем, что это справедливо не только для электромагнитных трансформаторов, но и в общем случае для всех электромагнитных цепей, ведь электрический ток возникает также и в уединенном электрическом проводе, к концам которого подключен источник питания, хотя нет ни вторичной обмотки, ни сердечника. **Гипотеза:** ток, встречно уравнивающий ток в проводе, возникает и существует в неэлектропроводной среде в виде токов смещения в зоне формирования электромагнитной волны. Поясним гипотезу, вводя необходимые термины и формулировки.

Источник первичного тока. Рассмотрим источник первичного тока в качестве источника электромагнитной волны. В электромагнитных системах энергия распространяется в направлении от источников волны. Простейшими источниками электромагнитного излучения являются: провод, контур, любая обмотка совместно с источником постоянного или переменного электрического напряжения U , который подключен к их концам или выводам и обеспечивает в них электрический ток i , называемый первичным, а также постоянные магниты. Все остальные тела — воздух, проводящие контуры и вторичные обмотки без источников, ферромагнитные сердечники и т. д. — являются вторичными цепями, то есть звеньями среды, в которых накапливается или через которые дальше передается энергия, например, в виде вторичных (наводимых) токов проводимости или смещения.

Замкнутость контура первичного тока. Первичные токи, так же как и вторичные, всегда замкнуты, замкнута даже цепь тока в прямом проводе в момент соединения им двух тел с противоположными сосредоточенными электрическими зарядами (рис. 1а и 1б) за счет замыкания этой цепи токами проводимости и диэлектрического смещения в окружающей среде. Рассмотрим провод l , по которому протекает ток I (рис. 2а). Предположим, что в этом случае есть аналогия с рассмотренным примером (рис. 1), и в среде

вблизи каждого отрезка провода могут быть токи смещения, встречные первичному току I , образующие с ним замкнутые контуры и в сумме равные I_{sp} . Если это так, то любое приложение первичного напряжения U к концам провода эквивалентно приложению встречного ему вторичного напряжения U_{sp} к среде, окружающей провод. Если провод имеет какое-либо сопротивление, то на некотором отрезке провода будет разность потенциалов ΔU , способная в гальванометре, подключенном к этому отрезку, вызвать ток I' , являющийся частью тока I , а не I_{sp} . Напротив, наведенный ток I'' в той стороне измерительного контура, которая прилегает к проводу, будет встречным к I , то есть совпадающим с разностью потенциалов ΔU , прикладываемой и к среде, окружающей провод.

Аналог вторичного электрического тока — электромагнитная волна. Рассмотрим передачу электромагнитных волн и связанные с этим

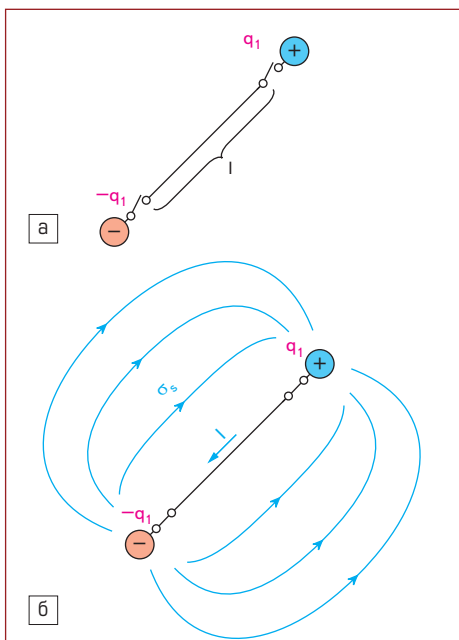


Рис. 1. Два тела с противоположными электрическими зарядами $-q_1$ и q_1 (а), соединяются проводом длиной l , и в нем возникает ток I , замкнутый токами смещения плотностью σ_s в окружающей среде (б)

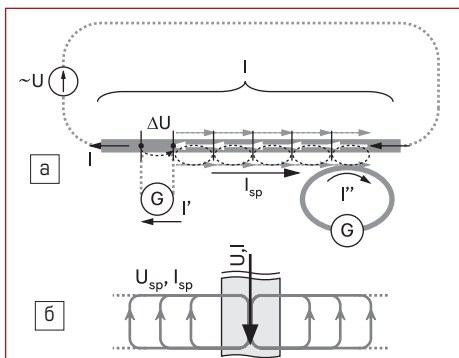


Рис. 2. Гипотеза о встречных электрическом напряжении и токе в среде, содержащей провод с током: а) токи в среде вокруг провода; б) отрезок провода с прилегающей областью среды. Переменный ток проводимости на каждом отрезке провода замыкается током смещения вдоль провода в среде

явления в простейших электромагнитных системах. Обозначим: f и ω — частота и циклическая частота тока в проводе; T , λ и c — период, длина волны и скорость распространения электромагнитной волны, излучаемой этим током, где $\lambda = cT = 2\pi c/\omega$. В любой среде возмущение стремится распространиться, и волна является совокупностью непрерывно следующих волн: волны напряжения, то есть потенциальной энергии, и запаздывающей по фазе волны вызванного им смещения, то есть кинетической энергии. Напряжение является причиной смещения, а смещение среды создает условия для дальнейшего распространения напряжения: новое место, от которого напряжение передается дальше. Дальнейшее движение волны происходит с нового места смещения в среде. Принцип Гюйгенса-Френеля представляет поперечную волну как сумму единичных квантов, то есть как сумму контуров вращения с условным элементарным радиусом, одинаково направленных и тесно расположенных по линии фронтов волны.

Классически принято [5] пространство, занятое электромагнитной волной, разделять на две зоны: ближнюю, отстоящую на расстоянии $r < \lambda$ от источника волны, и волновую, отстоящую на расстоянии $r > \lambda$ от этого источника.

Волновая зона излучения, или пространство на расстоянии $r > \lambda$ от провода. В этой зоне электромагнитная энергия сформировалась в волну [5, с. 466], и от провода, выполняющего роль источника излучения, «оторвалась» и со скоростью c движется волна электрической напряженности E (волна потенциальной энергии — накапливающегося смещения), вместе с ней, отставая по фазе, следует волна токов смещения I_{sp} (волна кинетической энергии). Количество полупериодов токов смещения в волновой зоне четно, суммарный ток смещения уравнивается себя и не взаимодействует с током в проводе. Волна распространяется в виде скомпенсированных колебаний — спаренных смещений. Любую волну можно выразить как сумму элементарных составляющих — элементарных источников, или квантов.

Элементарным источником электромагнитной волны будем считать круглый электропроводящий контур радиуса r с условно подключенным к нему источником электропитания U (рис. 3), полагая, что $r \ll \lambda$, где λ — длина волны. Тогда электромагнитную волну любого из источников — проводов с любым искривлением, контуров, обмоток и соленоидов любой геометрической формы с подключенными источниками электропитания, полюсов любых магнитов — можно считать суммой элементарных источников волны.

Уединенный квант электромагнитного излучения в системе отсчета, связанной с ним,

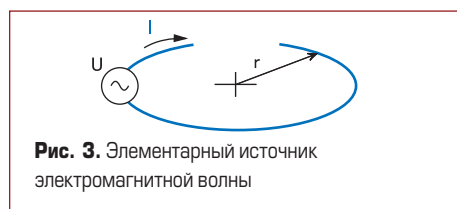


Рис. 3. Элементарный источник электромагнитной волны

принято изображать как элементарный контур электрической напряженности E с перпендикулярно сцепленным с ним элементарным контуром магнитной напряженности H , движущиеся со скоростью c в направлении пересечения плоскостей этих контуров (рис. 4а). Это эквивалентно изображению двух совпадающих элементарных контуров: напряженности E и тока смещения I_{sp} (рис. 4б). Но ток смещения I_{sp} в волне отстает по фазе от приложенной электрической напряженности E (рис. 4в), значит, напряженность H магнитного поля отстает по фазе от напряженности E электрического поля (рис. 4г). Из замкнутости контуров E и H в волновой зоне следует их парность, то есть единичные кванты лучше изображать

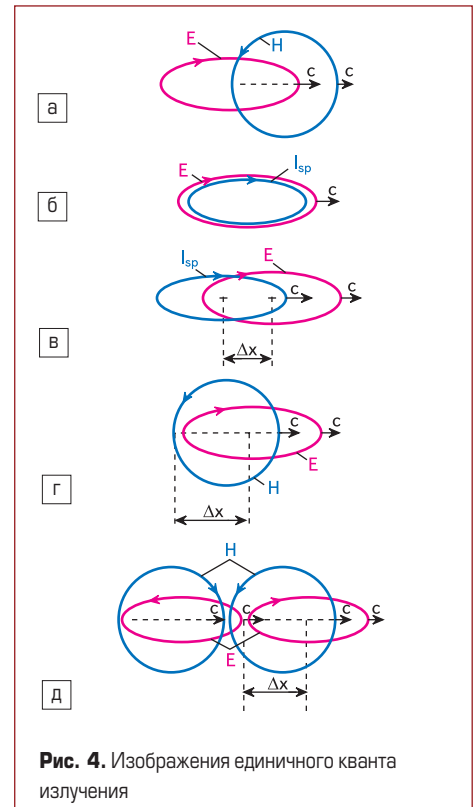


Рис. 4. Изображения единичного кванта излучения

в виде пар взаимно уравновешенных контуров встречного направления (рис. 4д).

Волновая зона представляет сумму единичных квантов, то есть соседних пар встречных полупериодов напряжений (напряженностей E), компенсирующих друг друга, и соседних пар встречных полупериодов токов (напряженностей H), также компенсирующих друг друга. Поэтому волновая зона существует как независимая, полностью сформированная система, она не обменивается энергией с излучающим проводом, то есть не влияет на его ток.

Электромагнитная волна на расстоянии $r < \lambda$ от провода, или в ближней зоне — зоне ее формирования.

В отличие от волновой, эта зона всегда заполняется энергией от провода и может поддерживать ток в проводе, например, вызывая перенапряжение в месте разрыва цепи тока, что проявляется в виде искры или дуги [5, с. 345–385]. В электротехнике многие устройства работают при низких частотах f и размеры самого устройства $D \ll \lambda$, то есть находятся в ближней зоне волны. Поэтому далее нас интересует только зона формирования волны.

В среде, например в вакууме, вблизи от поверхности провода с током образуется и расширяется область токов смещения определенной плотности, допуская увеличение уравниваемого тока в проводе, которая со скоростью света уходит от провода, а освобождающееся место у поверхности провода непрерывно заполняется током смещения. Протяженность зоны токов смещения при низких частотах росла бы неограниченно, увеличивая полный ток смещения в среде, который увеличивает парный с ним уравнишиваемый ток в проводе, однако наступает момент, когда развитие тока смещения среды ограничится, так как ток в излучающем проводе ограничивается омическим сопротивлением. В то же время накапливающееся в волне «инерционное» смещение стремится противодействовать электрической напряженности, распространяющейся параллельно проводу. При установлении постоянного тока в проводе ближняя зона перестает заполняться, а «оторвавшаяся область» полного тока смещений и накопленных напряжений в среде далеко удаляется от провода, уменьшаясь по плотности, то есть увеличиваясь в объеме пропорционально увеличению расстояния от провода. Хотя в проводе с установившимся постоянным током омическое падение напряжения уравнивает напряжение источника питания и дальнейшее формирование волны не происходит, в среде присутствует удаляющаяся одиночная полуволна смещения, встречная току в проводе, то есть уравнивающая его. Такое порционное излучение сходно с током среды, встречно уравнивающим ток в проводе. Отметим, что неподвижный постоянный магнит во всем этом сходен с проводом, в котором установился постоянный ток.

Окончательная формулировка гипотезы. Обязательными условиями возникновения электрического тока являются: наличие электрического поля напряженностью E ; наличие носителей электрического заряда $\pm q$, способных двигаться в направлении этого поля; наличие уравнивающего полного тока в окружающей этот ток среде в виде суммы токов проводимости среды и токов смещения среды в области формирования электромагнитной волны.

Примечание. Принцип парности встречается часто: принцип распределения электронов (принцип Паули), электронные пары Купера, парное рождение частиц противоположных зарядов. В электромагнитной системе с одним источником излучения сумма токов в проводе и окружающей его среде равна нулю. Этот принцип парности первичных и вторичных токов более близок с законом сохранения импульса, или реактивного движения, в механической системе двух незакрепленных взаимодействующих тел, где изменение линейного Δp или вращательного Δm импульса одного из них вызывает встречное изменение импульса $(-\Delta p)$ или $(-\Delta m)$ другого тела, то есть равновесие встречных напряжений и смещений является условием сохранения системы.

Если первичный ток связан с вторичными токами, то как эта связь осуществляется? Рассмотрим связь между первичной и вторичными электромагнитными цепями, то есть элект-

ромагнитное поле. Предположим, что между первичным и вторичным неподвижными контурами находится цилиндр, стенки которого имеют определенную толщину и образованы элементарными замкнутыми контурами электрической напряженности (рис. 5а) или тока (рис. 5б). Очевидно, сумма этих электрических напряженностей или токов не равна нулю только на поверхности связываемых контуров. Поэтому эти элементарные контуры могут быть только абстрактными, и их существование не обязательно. Так как первичный и вторичный контуры неподвижны, то, как и при передаче волны вдоль провода, сдвиг фазы между напряженностями E и H вторичного контура равен нулю. Ток вторичного контура обеспечивает встречную равновесную составляющую тока первичного контура. Аналогично изображаем абстрактные цилиндры связи между первичным контуром и контуром средней линии напряженности электрического поля (рис. 5в), а также контуром средней линии распределенного полного тока смещения среды (рис. 5г) в ближней зоне электромагнитной волны. Здесь тоже сумма электрических напряженностей не равна нулю только на связываемых контурах. Можно предположить, что сдвиг фазы между токами и электрическими напряженностями связываемых контуров обеспечен также задержкой распространения волны. Полный ток смещения среды обеспечивает вторую встречную равновесную составляющую тока первичного контура.

Плоскостям взаимодействующих контуров дозволяется быть непараллельными, особен-

но при наличии ферромагнитных сердечников, так как в этом случае радиус, толщина и искривление оси условных цилиндров связи, называемых классиками физики электромагнитным полем, будут разными вдоль расстояния от первичного контура до вторичного. При наличии связывающего ферромагнитного сердечника первичный контур связывается с вторичным контуром и токами смещения в этом сердечнике и воздухе как через сам сердечник, так и через воздух.

Если в первичном контуре уже установлен постоянный ток, а ток во вторичном контуре гасится из-за омического сопротивления этого контура и вторичный контур перестает участвовать в уравнивании первичного тока, то это уравнивание будет осуществляться только убегающим вдаль током смещения ближней зоны электромагнитной волны. Значит, экранировка вторичным контуром, изготовленным из обычного металла, невозможна для первичного контура с постоянным током и для постоянных магнитов, так как суть экранировки — полное уравнивание экраном излучения первичного источника. Несмотря на отсутствие электрических напряженностей и токов в абстрактных «цилиндрах» связи первичных и вторичных контуров, то есть в электромагнитном поле, любое внесение дополнительных тел или перемещение тел в этой чувствительной зоне вызовет перестройку системы первичных и вторичных контуров, а значит, может создать переходные токи проводимости в связываемых контурах и новые токи смещения в среде. Приведенная формулировка свойств поля совпадает с их описанием, данным основоположниками теории [5].

Распределение электромагнитной энергии по вторичным цепям. Принцип первичности и вторичности электромагнитных цепей

Первичные электромагнитные цепи, например первичные контуры, являются источниками первичного тока, то есть источниками электромагнитной энергии, от которых эта энергия распространяется. Вторичные электромагнитные цепи обеспечивают токи, уравнивающие первичный ток, следовательно, являются потребителями электромагнитной энергии. К ним относятся элементы среды, окружающей источник излучения: воздух, проводящие контуры без источников, вторичные обмотки, ферромагнитные сердечники и т. д., то есть звенья среды, через которую энергия передается дальше и в которой создаются составляющие полного тока среды, направленные навстречу и уравнивающие токи источника электромагнитной волны. При отсутствии связывающего ферромагнитного сердечника первичный контур связывается с контурами, то есть теми или иными сосредоточенными элементами среды, частично. Рис. 6а иллюстрирует тот факт, что основные потоки и потоки рассеяния электромагнитного поля, по определению классиков электротехники, создаются только источником, а не средой или вторичным контуром. описа-

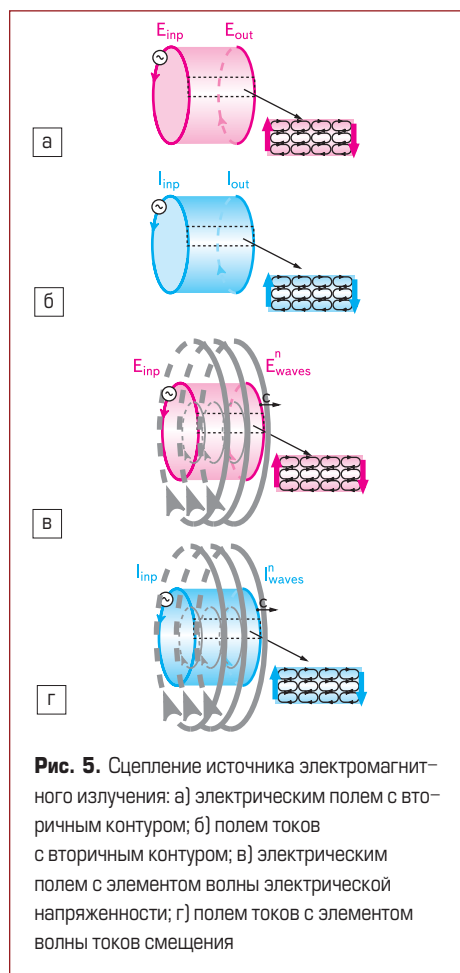


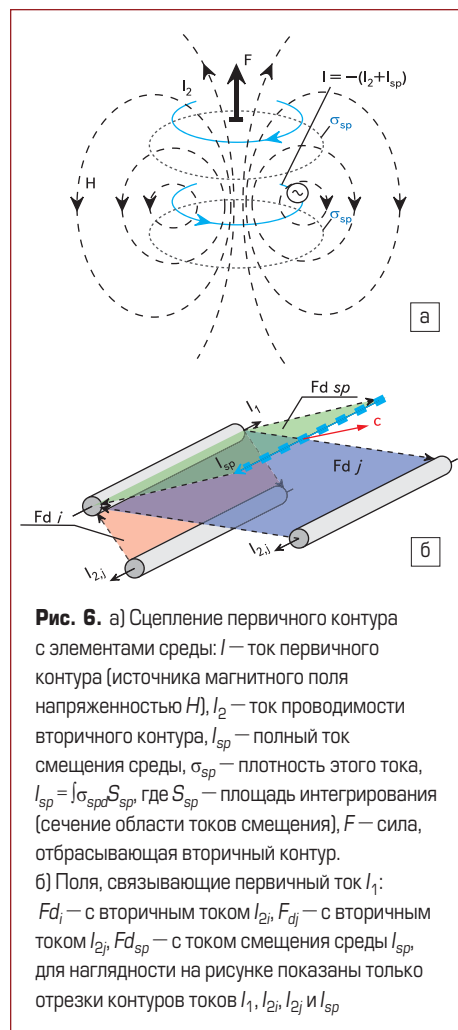
Рис. 5. Сцепление источника электромагнитного излучения: а) электрическим полем с вторичным контуром; б) полем токов с вторичным контуром; в) электрическим полем с элементом волны электрической напряженности; г) полем токов с элементом волны токов смещения

ние магнитных потоков имеет некоторое сходство с описанием электромагнитного поля, приведенным выше. Напомним определения этих потоков. Известно, что основные потоки магнитного поля — это потоки, одновременно пронизывающие первичную и вторичную обмотки. Часто полагают, что при наличии сердечника они обязаны проходить только через сердечник. Потоки рассеяния связывают первичный ток с токами смещения среды. Например, в трансформаторе с ферромагнитным сердечником магнитные потоки создаются первичной обмоткой, идут в сердечник и исходят из сердечника в основном вблизи вторичной обмотки, а также идут от первичной обмотки и ответвляются от сердечника в среду, окружающую трансформатор. Вторичные обмотки, как и все элементы среды, делят между собой энергию первичной обмотки. Ток намагничивания сердечника напрямую не связан с током вторичной обмотки. Конечно, если на пути связи первичной обмотки с сердечником находится вторичная обмотка или на пути связи первичной обмотки и вторичной обмоткой находится вторая вторичная обмотка, то связь будет пронизывать эти специально расположенные обмотки, обеспечивая вынужденное последовательное распределение потоков. Разделение электромагнитной энергии между вторичными цепями поясняет следующий пример. Если ток первичного контура ограничен его сопротивлением и если один из вторичных элементов среды, к которым прикладывается волна напряжения, распространяющаяся в среде, обладает более высокой электропроводностью и способностью к электрическому смещению по сравнению с остальными элементами среды, то электромагнитная энергия источника может использоваться таким элементом до полного «изнеможения» источника, уменьшая долю токов, приходящихся на остальные элементы.

Эксперимент 1. Возьмем однофазный трансформатор с тонким сердечником. Последовательно с первичной обмоткой включим резистор, сопротивление R которого в 10 раз выше сопротивления обмотки, компенсируя уменьшение тока холостого хода, вызванное этим, путем увеличения входного напряжения. Если теперь во вторичной обмотке создать большой ток путем короткого замыкания ее выводов, то сердечник трансформатора полностью размагнитится, так как электрическая напряженность E_c в сердечнике как части среды уменьшилась: $E_c(2\pi r_c) \approx (U_1 - i_1 R)/N_1 \rightarrow 0$; где $(2\pi r_c)$ — эквивалентный средний периметр поперечного сечения сердечника, U_1, i_1, N_1 — входное напряжение, ток и количество витков первичной обмотки. Использование трансформаторов с низкоомной цепью вторичной обмотки (в пределе — сверхпроводящей) с большой нагрузкой, при подключении первичной обмотки либо к генераторам ограниченной мощности, например преобразователям солнечной энергии, либо к сети с последовательно включенными импульсными балластами, обеспечит высокий коэффициент активной мощности ($\cos\phi$) и может представлять коммерческий интерес. По сути, это

могут быть трансформаторы тока специальной конструкции.

Итак, первичные токи источников электромагнитной волны равны сумме вторичных токов среды. Поля, относящиеся к разным вторичным цепям, не заслоняющим друг друга от первичных цепей, то есть являющимся «параллельными нагрузками» источника излучения, не пересекают другую вторичную цепь, не совпадают и не являются частью друг друга. Замкнутые системы первичных и вторичных токов изображены на рис. 6б. К вторичным токам относятся токи всех потребителей электромагнитной энергии, излучаемой источником волны: токи проводимости в среде (токи во вторичных обмотках) и токи смещения распространяющейся волны. Можно сказать об аналогии электромагнитной системы с герметичной гидравлической системой, содержащей источник напора и несколько параллельных стоков.



Эксперимент 2. Рассмотрим трансформатор, содержащий: первичную обмотку с числом витков N_1 , охватывающую центральный сердечник CC_1 , первую вторичную обмотку с числом витков $N_{2,1}$, охватывающую центральный сердечник CC_2 и вторую вторичную обмотку с числом витков $N_{2,2}$, охватывающую центральный сердечник CC_3 (рис. 7). Первичная обмотка имеет сопротивление R_1 и подключена к источнику напряжения U_1 , а вторичные обмотки имеют регулируемые сопротивления $R_{2,1}$ и $R_{2,2}$ и подключены к регулируемым ис-

точникам напряжения $U_{2,1}$ и $U_{2,2}$, синфазным напряжению U_1 и способным дополнительно увеличить токи вторичных обмоток $i_{2,1}$ и $i_{2,2}$. Центральные сердечники CC_2 и CC_3 расположены друг от друга на расстоянии $\Delta x_{2,2}$, и зазоры между ними и ярмом, в которые, для качественной оценки направления магнитных потоков, насыпано небольшое количество пудры отожженного мягкого железа, равны $\Delta x_{1,2}$.

В электротехнике принято использовать напряжения, токи и сопротивления, приведенные к числу витков первичной обмотки. Но при расчетах электромагнитных устройств удобнее пользоваться приведением этих величин к одному витку, то есть использовать напряжения и ЭДС одного витка, полные токи обмоток и намагничивания сердечника, удельные омические сопротивления сердечника и обмоток, так как в этом случае облегчается расчет сердечника. Будем использовать эти величины в качестве основных.

Обозначим: $I_1, I_{2,1}, I_{2,2}$ — полные токи обмоток, I_m — полный ток намагничивания сердечника, e — ЭДС одного витка при холостом ходе, $\rho_1, \rho_{2,1}, \rho_{2,2}$ — сопротивления цепей обмоток, приведенные к 1 витку, где $I_1 = i_1 N_1$, $I_{2,1} = i_{2,1} N_{2,1}$, $I_{2,2} = i_{2,2} N_{2,2}$.

При $U_{2,1} = U_{2,2} = 0$, магнитный поток Φ_1 , протекающий через центральный сердечник CC_1 , складывается из потоков, проходящих через центральные сердечники CC_2 и CC_3 и воздух к вторичным обмоткам $N_{2,1}, N_{2,2}$, и потоков рассеяния, идущих от первичной обмотки и сердечников в пространство, окружающее трансформатор. Потоки Φ_2 и Φ_3 , пронизывающие вторичные обмотки, — параллельные и независимые, то есть независимо от соотношения зазоров $\Delta x_{1,2}$ — между сердечниками и ярмом и $\Delta x_{2,2}$ — между сердечниками (рис. 7) не существует магнитного потока $\Phi_{2,3}$, одновременно протекающего через центральные сердечники CC_2 и CC_3 и пронизывающего обе вторичные обмотки. Это видно из того, что ферромагнитная пудра образует мостики, соединяющие ярмо с центральными сердечниками CC_2 и CC_3 , и оба мостика отделяются друг от друга. Если бы возник поток, проходящий одновременно через CC_2 и CC_3 , то возникло бы слияние мостиков пудры. Этого можно достичь увеличением полного тока $I_{2,1}$ или $I_{2,2}$ до значений, когда один из них станет первичным, как и полный ток I_1 . При отсутствии источников $U_{2,1}$ и $U_{2,2}$ экстремальный полный ток вторичной обмотки $N_{2,2}$, равный $I_{ex2,2} = (U_1/N_1)/\rho_1$ и больший, чем ее полный ток короткого замыкания $I_{sh2,2}$, достигался бы при $R_{2,2} = 0$. Ток короткого замыкания $I_{sh2,2} = [(U_1/N_1) - (U_{2,2}/N_{2,2})]/(\rho_1 + \rho_{2,2})$. Для искусственного достижения $I_{ex2,2}$ (тока «сверхпроводимости») уменьшим $R_{2,2}$ и увеличим напряжение $U_{2,2}$. Обозначив $U_{2,2}/N_{2,2} = e_{2,2}$ и $U_1/N_1 = e_1$ и считая $I_{ex2,2} = I_{sh2,2}$, определим нужное значение $e_{2,2} = -e_1(\rho_{2,2}/\rho_1)$. Если $\rho_{2,2} = \rho_1$, то $e_{2,2} = -e_1$. Значит, напряжение одного витка, приложенное к среде, стало равным $e = e_1 + e_{2,2} = 0$, и намагничивание центрального сердечника CC_3 стало равным нулю. Значение $I_{ex2,2}$ соответствует граничному значению тока $I_{2,2}$, выше которого он станет первичным. Это подтверждается образованием мостика

ферромагнитной пудры между сердечниками CC_2 и CC_3 . Здесь при определении пути магнитных потоков можно пользоваться принципом первичности и вторичности: поток первичной магнитной цепи, содержащей источник электромагнитной волны, замыкается через все вторичные цепи, а потоки вторичных магнитных цепей замыкаются только через первичную цепь.

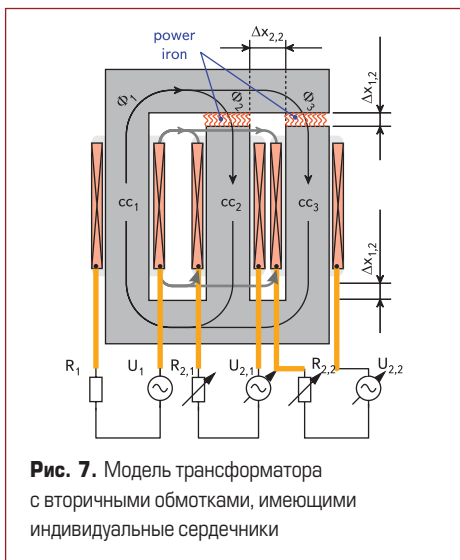


Рис. 7. Модель трансформатора с вторичными обмотками, имеющими индивидуальные сердечники

В качестве примера рассмотрим путь магнитного потока через стыки первичной обмотки с центральным сердечником и стыки центрального сердечника с ярмом: в обычном трансформаторе (рис. 8а) и в трансформаторе *MTS* с вторичной железной обмоткой-сердечником (рис. 8б). Несмотря на то, что в *MTS* центральный сердечник совмещает роль вторичной обмотки, поток Φ_1 в его сердечнике, как и в сердечнике обычного трансформатора, не замыкается через соседние слои. Даже при не-

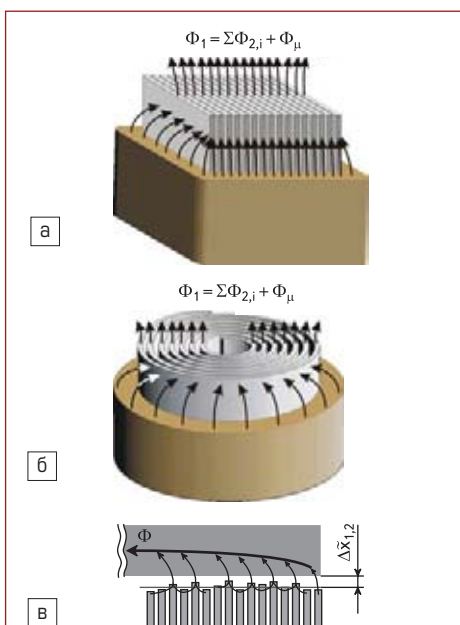


Рис. 8. Стыки центральных сердечников трансформаторов с первичными обмотками и ярмами. Здесь: Φ_1 — магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, $\Sigma\Phi_{2,i}$ — сумма потоков вторичных обмоток, Φ_μ — поток намагничивания сердечника

качественном изготовлении сердечника (рис. 8в), когда зазор с ярмом $\Delta x_{1,2}$ будет неравномерным, в трансформаторах обоих типов поток перераспределяется только на кромки выступающих слоев сердечника, не вызывая в них заметных вихревых токов.

Оценка нагрузочной способности трансформаторов *MTS*. В этих трансформаторах каждый слой рулона похож на вторичную обмотку с собственным центральным сердечником [1–4]. Ток i_2 этих слоев общий, но слои отличаются эквивалентным количеством витков и эквивалентной площадью поперечного сечения сердечника. Поэтому следует определить, достигается ли такое максимальное значение i_{ex2} вторичного тока i_2 трансформатора, при котором некоторые слои рулона станут источниками электромагнитного излучения. Тогда потоки этих слоев замыкались бы через соседние слои, пронизывая их плоскости и вызывая нагревающие вихревые токи, как это происходит при использовании вторичных обмоток *MTS* в роли первичных.

Возьмем центральный сердечник *MTS* со следующими параметрами: толщина АРМКО-ленты — 50 мкм, толщина изоляционного слоя Al_2O_3 — 2 мкм, высота рулона — 26 мм, внутренний диаметр рулона — 5 мм, количество витков в рулоне — 200. Задаем: циклическая частота ω питающей сети — 314 рад/с, индукция магнитного поля в сердечнике $B = 1,1$ Тл, удельное сопротивление железа $\rho_{Fe} = 0,000000098$ Ом·м. Тогда рулон *MTS* можно охарактеризовать параметрами, приведенными в таблице 1.

Условно экстремальный полный ток первичной обмотки достигается при нулевом сопротивлении электрической цепи вторичной обмотки. Значение $I_{ex/Sc}$ этого удельного тока, приходящегося на единицу сечения рулона, вдвое больше максимального удельного полного тока $I_{sh,c}/S_c$ короткого замыкания этого рулона. Здесь оно равно $I_{ex/Sc} = 2 \times 0,117 = 0,234$ А/м² и не менее чем в 1,6 раза выше максимальных значений удельного полного тока короткого замыкания любого витка рулона. Значит, все витки рулона всегда остаются вторичными обмотками, и прохождение их магнитных потоков через соседние витки рулона исключается. Измерения на экспериментальных образцах *MTS* подтверждают расчеты. Немагнитный зазор между ярмом и рулоном уменьшает поток,

пронизывающий каждый виток рулона, увеличивая поток рассеяния от первичной обмотки. При этом соотношения токов, приведенных в таблице 1, почти не меняются.

Комментарии к расчетам электромагнитных систем

Относительно расположения обмоток можно сказать следующее. Предполагается, что ферромагнитный сердечник трансформатора обеспечивает два основных, не зависящих друг от друга канала для связи посредством сетки абстрактных микроконтуров, то есть поля: по омическому току — между первичной и вторичными обмотками; по индуктивному току — между первичной обмоткой и сердечником, так как путь электромагнитной волны вдоль цепочки элементов упорядоченно ориентированного поля Вейсса в сердечнике облегчен. Зависимость этих каналов возникает только в смысле распределения общего электромагнитного потока между ними. Благодаря локализации основной доли ближней зоны электромагнитной волны в сердечнике, уменьшению объема этой зоны и ее «утяжелению» пропорционально относительной магнитной проницаемости μ сердечника паразитный индуктивный ток смещения среды I_{sp} в основном становится равным индуктивному току намагничивания сердечника I_μ , существенно меньшему исходного I_{sp} . Здесь проглядывается небольшая аналогия свойств сердечника и оптоволоконного канала, в котором электромагнитная энергия локализуется благодаря эффекту внутреннего отражения от границы со средой с меньшей оптической плотностью. Поэтому такая среда, как сердечник, позволяет работать при большей передаваемой мощности на единицу ее объема. Магнитный поток в трансформаторах создается первичной обмоткой, реактивная его часть затрачивается на намагничивание сердечника, а также, уходя с поверхности первичной обмотки и сердечника, на намагничивание остальной среды, а другая, то есть активная, часть исходит из сердечника в основном вблизи вторичной обмотки и обеспечивает связь обмоток. При малых зазорах между обмотками и сердечником укорачивается средний путь магнитного потока, связывающего первичные обмотки с вторичными. Рекордсменами по минимуму

Таблица 1. Параметры сердечника *MTS*

Параметры	Рулона	Внутреннего витка	Наружного витка
Внутренний диаметр D_{in} , мм	5	5	26,56
Наружный диаметр D_{out} , мм	26,6	5,004	26,6
Коэффициент заполнения по стали k_c	0,926	0,926	0,926
Охватываемое активное поперечное сечение рулона $S_{c,p}$, мм ²	496,4	0,0291	496,4
Отношение радиусов $kR = D_{out}/D_{in}$	5,32	1,0008	-
Доля ЭДС отделенного элемента $k_U = (k_R^3 - 3k_R + 2) / [3(k_R - 1)2(k_R + 1)]$	0,386	0,5	1
Часть ЭДС витка первичной обмотки $U_{1,i} = \omega B S_i$, В	0,0662	0,000005	0,000857
Сечение ленты, мм ²	1,3	1,3	1,3
Длина ленты, мм	9922	15,7	83,5
Электрическое сопротивление по направлению витков $R_{2,p}$, Ом	0,748	0,0012	0,0063
Максимально возможный ток к. з. элемента от своей ЭДС $I_{sh,p}$, А	0,0885	0,00424	0,136
Собственное сечение в рулоне S_p , мм ²	496,4	0,029	1,546
Максимальный полный ток к. з. элемента на единицу сечения $I_{sh,i}/S_p$, А/м ²	0,117	0,146	0,088

потоков рассеяния и токов намагничивания, то есть реактивной мощности, среди трансформаторов являются трансформаторы MTS. Отсутствие пронизывания вторичных обмоток потоками намагничивания сердечника, создаваемых первичной обмоткой, исключает вынужденное взаимодействие с первичными обмотками, которое возникло бы за счет пространственно последовательного перераспределения магнитных потоков. Эти трансформаторы, в особенности по сравнению с трехфазными и многофазными аналогами, первичные и вторичные обмотки которых расположены соосно на одном уровне, имеют значительно меньший уровень шума. Поэтому выбору расположения обмоток других трансформаторов уделяется особое внимание.

Уравнение полного тока можно записать в виде $(-I_1) = \Sigma I_2 + I_{\mu}$, или $(-I_1) = \Sigma I_2 + H_c l_c$, где H_c — напряженность магнитного поля, l_c — средняя длина сердечника. При расчетах удобно переносить ΣI_2 в левую часть уравнения, однако при этом теряется физический смысл уравнения, то есть принцип первичности и вторичности электромагнитных цепей, так как вторичная обмотка играет роль только части среды, окружающей первичную обмотку (источник электромагнитного излучения).

При проектировании некоторых электромагнитных устройств расчеты становятся понятнее и проще, если вместо термина «магнитное поле» использовать термин «токи смещения», то есть пользоваться только следующими основными параметрами: напряжение U и напряженность E электрического поля, ЭДС (или напряжение) e одного витка — вместо магнитного потока $\Phi = (\omega B S_c)$; полные токи I_{μ}

(или I_{sp}), I_1 , I_2 — вместо МДС $= H l_c$; I_{μ}/S_c — удельный полный ток намагничивания, а также удельные полные токи I_1/S_c и I_2/S_c ; относительная магнитная проницаемость μ ; размеры l_c , S_c сердечника; длина l_L и радиус r_L кривизны провода с током. При этом принимается, что силовые линии магнитного поля характеризуют плотность токов I_{μ} (или I_{sp}) смещения среды: расстояние между этими линиями обратно пропорционально плотности токов смещения. При переходе от методики расчетов индуктивных элементов с использованием термина «магнитное поле» к методике расчетов без использования этого термина, в том числе при расчете любых дросселей и трансформаторов с обмотками, число витков которых более одного, проблема замены потокосцеплений какими-либо другими величинами не возникает. Например, если на выводах обмотки напряжение равно U , то в среде (сердечнике) распространяется напряжение одного витка $e = U/N$. Вызванный полный ток I_{sp} смещения в среде обуславливает встречный полный ток I в обмотке, то есть ток в витках обмотки $i = I/N$. Значит, сопротивление среды, индуктивность элемента и взаимоиנדукция элементов пропорциональны N^2 . Упрощаются дифференциальные уравнения при расчете резонансов и антирезонансов полых и твердотельных каналов, в частности волноводов и магнострикционных излучателей.

Например, значительно упростился расчет входной цепи индукционного управления для нового быстродействующего силового интегрального ключа, построенного на базе разрядника, производимого Рязанским заводом конденсаторов. Эти ключи превосходят по надеж-



Рис. 9. Схема силового ключа

ности и остальным параметрам все известные силовые переключающие модули зарубежного производства: $U_{раб} > 30$ кВ; $I_{раб} > 300$ кА; $t_{сраб} < 1$ мкс; $U_{откр} < 0,02$ В.

Все последующие публикации, в том числе публикация справочника по трансформаторам MTS, осуществляются с участием нашего научного руководителя, профессора Казанского энергетического университета, д. т. н. Ш. И. Вафина.

Литература

1. Казаков В. В. Новые модульные трансформаторы // Компоненты и технологии. 2006. № 8.
2. Казаков В. В. Еще раз о преимуществах MTS-трансформаторов // Компоненты и технологии. 2006. № 11.
3. Немцев Г. А., Казаков В. В. Новые модульные трансформаторы // Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики. 2006. № 1. С. 10–14.
4. Казаков В. В. Силовые MTS-трансформаторы и генераторы // Энергетика Татарстана. 2007. № 3–4. С. 44–55.
5. Тамм И. Е. Основы теории электричества. 9-е изд. М.: Наука, 1976.