

Трансформаторы с уменьшенными бросками тока намагничивания

и пониженными потерями на гистерезис сердечника. Перемагничивание ферромагнетиков

Статья посвящена исследованию свойств новых силовых трансформаторов типа MTS, конструктивной особенностью которых является использование стержней-обмоток — деталей, выполняющих одновременно две функции: одной или всех обмоток трансформатора и стержней ферромагнитного сердечника или всего этого сердечника. Кратко описаны новые трансформаторы, технологии и свойства материалов для их изготовления; рассмотрены размерно-доменное представление ферромагнетиков и гальваномагнитные явления, определяющие основные свойства и преимущества новых трансформаторов. Пространственное совмещение стержней и обмоток в новых трансформаторах позволяет исключить броски тока намагничивания сердечника. Благодаря естественному поперечному (перпендикулярному) подмагничиванию существенно снижены потери на гистерезис перемагничивания сердечника.

**Олег Казаков
Владимир Казаков**

Размеры и вес новых трансформаторов

Благодаря новой конструкции [1] с пространственным совмещением обмоток и сердечника нет необходимости в объеме, заполненном в обычном трансформаторе обмотками, и расстояние между поверхностями частей ферромагнитного сердечника может быть снижено до толщины изоляции обмоток. Но пока не существует ферромагнетиков с такой высокой электропроводностью, как у серебра, меди, алюминия или хрома, и поэтому наибольшая компактность трансформатора достигается, если таким способом сокращается только половина освобожденного объема. Например, в трансформаторе с двумя типами обмоток вторичные обмотки могут изготавливаться в виде стержней-обмоток, а первичные остаются, например, медными.

Почему же, несмотря на то, что каждый стержень-обмотка является обмоткой из железной фольги, причем удельное сопротивление даже используемого сверхчистого железа в 5,6 раза больше, чем у меди, резистивное сопротивление между выводами стержня-обмотки не больше, чем у заменяемой медной обмотки, а КПД нового трансформатора выше? Ведь такую железную обмотку с сечением проводника, увеличенным в 5,6 раза, необходимо вмести́ть в объем стержня сердечника традиционного силово-

го трансформатора, имеющего такую же мощность, какую имеет новый трансформатор. Причем не все витки такой обмотки охватывают полный рабочий магнитный поток сердечника, поэтому и количество ее витков приходится увеличивать в $1/k_U \approx 2-3$ раза. Точно вычисленный геометрический коэффициент $k_U = (D_{ext} + 2D_{int}) / (3D_{ext} + 3D_{int})$, где D_{int} — диаметр осевой полости стержня-обмотки; D_{ext} — его наружный диаметр. Также необходимо увеличивать сечение витков еще в 1,5 раза, так как стержень-обмотка нагревается не только от омических потерь, присутствующих в обмотках, но и от потерь, характерных для сердечников, то есть потерь из-за вихревых токов и гистерезиса перемагничивания. Тем не менее расчет, аналогичный расчету обычных трансформаторов, проведенный с учетом названных ограничений в стержнях-обмотках по плотности тока, увеличивающих их размеры, дает для нового трансформатора меньшие размеры и вес по сравнению с размерами и весом обычного трансформатора. В зависимости от назначения трансформатора получаются следующие результаты уменьшения его размеров: для низкочастотных (50 Гц) низковольтных (до 1 кВ) трансформаторов в 2–2,5 раза; низкочастотных высоковольтных (до 10 кВ и выше) — почти в 1,5–2 раза; среднечастотных (10–1000 кГц) низковольтных — в 16–64 раза; среднечастотных высоковольт-

ных — в 5–10 раз. Очевидно, увеличение сечения стержня-обмотки обеспечивает уменьшение количества его витков, что, наоборот уменьшает сечение этого стержня-обмотки, при этом так же уменьшаются количество витков и толщина медных обмоток. Толщина электрической изоляции остается прежней, и это сказывается на меньших снижениях размеров и веса высоковольтных новых трансформаторов по сравнению с низковольтными.

Теоретическое обоснование и лабораторные испытания

Для оценки пригодности новой конструкции для широкого применения во всех видах дросселей, реакторов и силовых и измерительных трансформаторов, то есть маломощных, большой мощности, низкочастотных и высокочастотных, было необходимо фундаментальное научное обоснование поведения магнитных потоков в сердечнике, содержащем стержни-обмотки. Ведь, согласно классической теории, магнитные потоки витков стержня-обмотки должны были замыкаться, входя в плоскости соседних его витков, вызывая в них вихревые токи, близкие по значению к рабочему току стержня-обмотки. Факт сильного нагрева этими токами приводил бы к невозможности широкого использования новой конструкции. Однако фундаментальный «Метод индивидуального рассмотрения поля движущихся электрически заряженных частиц» [2] показал, что хотя рабочий магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, проходит через сердечник по направлению последовательной передачи электрического усилия и мощности и пронизывает вторичную обмотку, нет магнитного потока от вторичной обмотки, обратного входящего в сердечник. Остальные составляющие магнитных потоков — магнитные потоки рассеяния всех обмоток и сердечника — замыкаются вне сердечника. Таким образом, теоретические опасения в отношении наличия

наводок вихревых токов соседними слоями стержней-обмоток были исключены.

Для экспериментального подтверждения этого результата был изготовлен образец трансформатора (рис. 1) и проведены его калориметрические испытания во всех рабочих режимах [3]. Характеристики использованной для изготовления стержней-обмоток железной ленты марки 08Ю, производимой Ашинским металлургическим заводом, далее откалиброванной подволачиванием, эмалированной полиимидным лаком толщиной 3 мкм, были известны: удельное сопротивление $\rho_{20\text{ }^\circ\text{C}} = 0,22 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, $\mu = 700$, $B_s = 2,1 \text{ Тл}$, $B_r = 0,2 \text{ Тл}$, $H_c = 80 \text{ А/м}$.

Калориметрические исследования образца показали, что новому трансформатору присущи все те же потери, которые возникают в трансформаторах обычной конструкции: резистивные потери в обмотках и вызванные вихревыми токами и гистерезисом сердечника. Об отсутствии дополнительных потерь, которые могли бы вызываться замыканием магнитных потоков через соседние слои стержней-обмоток, свидетельствовало то, что измеренные значения потерь оказались ниже расчетных на 12%. Это окончательно убедило в практической ценности новой конструкции для широкого применения, однако заставило начать теоретические и лабораторные исследования причин сниженных потерь в новом трансформаторе.

Технология

Для изготовления трансформаторов новых конструкций было решено освоить полную технологию производства лент из сверхчистого железа, характеристики которого наилучшим образом, согласно современным теоретическим и технологическим возможностям, удовлетворяют условиям этого производства. Технологически возможными были следующие характеристики нового материала, имеющего себестоимость не выше \$2/кг: $\rho_{20\text{ }^\circ\text{C}}$ — не более 0,093 мкОм·м, что снижает резистивные потери в витках стержней-обмоток; толщина ленты — 5–50 мкм, что компенсирует снижение удельного сопротивления материала и поэтому не увеличивает вихревые токи в нем; заданная ширина ленты с точностью $\pm 0,25 \text{ мкм}$, достигаемой калибровкой подволачиванием, что обеспечивает зеркально ровную поверхность торцов стержней-обмоток и, следовательно, минимальную толщину необходимой электрической изоляции этих торцов, равную немагнитному зазору в сердечнике; заданная равномерная толщина электрической изоляции, обеспечиваемой эмалированием полиимидным лаком, — 0,5–3 мкм по всем четырем граням ленты; μ — не менее 100 000–500 000 и $B_s = 2,1 \text{ Тл}$, что обеспечивает его применение в различных областях электротехники; B_r — не более 0,02 Тл и H_c — не более 0,2 А/м, что обеспечивает низкие потери на перемагничивание. В настоящее время началось промышленное производство нового материала.

Намотка стержней-обмоток с возможностью небольшого взаимного скольжения

слоев ленты позволяет выравнивать торцы стержней-обмоток обжатием, не сминаям ленту, и склеивать эти слои путем финишной лаковой пропитки. Из-за тонкости железной фольги расчетный ток стержня-обмотки обеспечивается тем, что лента, которой наматываются его витки, содержит множество взаимно изолированных параллельных слоев. Поэтому, для исключения разности ЭДС между концами этих слоев, в середине длины ленты выполняется однократное транспонирование с помощью специальной вставки — инвертора слоев (рис. 2). Если в мощном трансформаторе часть обмоток вы-

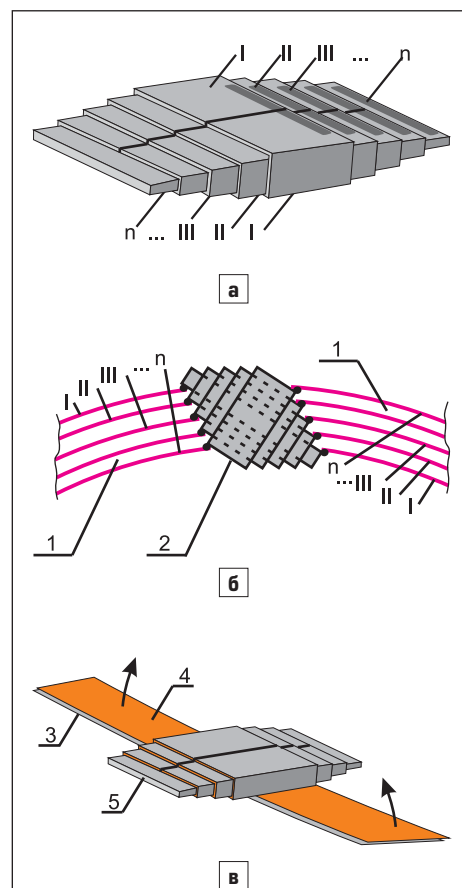


Рис. 2. а) Схематическое изображение инвертора слоев многослойной ферромагнитной ленты, встраиваемого в стержень-обмотку МТС в процессе его намотки (числа I, II, III, ..., n указывают на номер слоя ленты); б) инвертор слоев подключается в разрыве на середине длины многослойной ленты, которой наматывается стержень-обмотка (применение инвертора слоев 2 обеспечивает однократное транспонирование, уравнивающее ЭДС и токи внутренних и внешних слоев ленты 1); в) конструкция инвертора слоев многослойной ленты проста. Инвертор слоев изготавливается оборачиванием центральной полосы 5 полосами из медной или алюминиевой фольги 3 и изоляционной пленки 4. При этом очередной слой такой обертки должен быть уже предыдущего слоя на ширину двух контактных площадок инвертора слоев. Скрепление слоев осуществляется лаковой пропиткой.



Рис. 1. Фотография рабочего макета трансформатора МТС

полняется из фольги, а другая часть — проводом, то неравномерность магнитного потока из-за большого расстояния между витками проводной обмотки вызывает вихревые токи в плоскости фольги соседней фольговой обмотки. Поэтому в мощных трансформаторах МТС медные обмотки также изготавливаются из эмалированной полиимидом калиброванной медной фольги.

Отличительные признаки трансформаторов МТС

Кроме меньших, по сравнению с аналогами, размеров и веса, обеспечивающих меньшие потери, больший КПД и меньшую себестоимость, трансформаторы МТС имеют и иные отличительные признаки, обеспечивающие им более высокие характеристики и другие основные преимущества.

Уменьшение бросков тока намагничивания

Применение стержней-обмоток, то есть конструктивное совмещение сердечника и обмоток, обеспечивает полное пространственное совмещение тока обмотки, создающей магнитное поле, и намагничивающегося ферромагнитного сердечника. Сравним задержку на намагничивание сердечника в традиционной электромагнитной системе с пространственно раздельными сердечником и обмотками с задержкой на намагничивание сердечника в новой конструкции. За электромагнитной волной, излучаемой обмоткой, остается магнитное поле, намагничивающее находящийся в ней сердечник. Намагничивание сердечника в этом поле эквивалентно становлению тока такого же направления, как и у устанавливающегося первичного тока обмотки, и поэтому излучаемая сердечником встречная волна, проходя сквозь обмотку, замедляет изменение тока в ней. Принято считать, что в традиционной системе, в которой обмотка охватывает сердечник снаружи, волна проходит внутрь поперечного сечения сердечника с относительной магнитной проницаемостью μ со скоростью, в μ раз меньшей, чем в воздухе. Следовательно, индуктивность традиционной обмотки с сердечником в начальный момент равна индуктивности такой же обмотки без сердечника и становится равной расчетной с задержкой на время прохождения волны. Поэтому при резких перепадах напряжения или тока, питающего такую обмотку, например в импульсных источниках питания, при работе электросварочного аппарата, в реакторах и трансформаторах цепей питания электродуговых установок, или при аварийных замыканиях наблюдаются резкие пики броска тока. Индуктивность же обмотки, пространственно совмещенной с сердечником, который из-за этого откликается встречным излучением сразу, без задержек замедляя рост первичных токов, изначально равна ее расчетной индуктивности, не требуется время для ее установления, и при резких

коммутациях пиковые броски тока в такой обмотке не возникают.

До сих пор современные массовые изготовители импульсных источников питания, например для компьютеров и электротранспорта, вынуждены, как правило, применять более мощные и дорогие коммутирующие электронные компоненты и усложнять электрические схемы. Применение стержней-обмоток в электромагнитных устройствах снимает эту проблему ненадежности и повышения себестоимости. Отсутствие пиковых бросков тока перемагничивания существенно снижает уровень помех в электрических цепях, снижает потери и улучшает качество электроэнергии в электрических сетях. Кратные пиковые токи, возникающие в импульсных и аварийных режимах в традиционных мощных силовых трансформаторах, вызывают распределенные механические удары на витки обмоток и сердечник, снижая их ресурс и надежность, а также нежелательные, часто экстремальные, переходные процессы в электрических сетях. Очевидно, такое свойство новых электромагнитных устройств, например трансформаторов, дросселей, реакторов, электродвигателей, генераторов и электромагнитных реле, обнаруженное при испытании образцов трансформаторов, дает им некоторое преимущество перед традиционными.

Гальваномагнитные явления в стержнях-обмотках

Известно, что удельное электрическое сопротивление однородно намагниченных ферромагнитных проводников меньше, чем размагниченных. В настоящее время широко используется, например в сверхбыстродействующих считывающих головках жестких дисков памяти компьютеров, обратный эффект — сильного увеличения удельного электрического сопротивления при разном намагничивании [4]. Обратим внимание на сходство конструкции таких датчиков со стержнями-обмотками по признаку совмещения ферромагнитного материала и намагничивающего тока, что обеспечивает быстрое действие этих устройств. Наиболее сильно свойство магниторезистивности ферромагнитных проводников проявляется в материале, состоящем из тонких слоев с неферромагнитными прослойками. При намагничивании такого материала создаются условия образования сверхдомена, или сверхрешетки, размер которой в каждом слое равен всей плоскости слоя. Поэтому мультислойность материала в стержнях-обмотках, происходящая естественным образом, то есть при их намотке, обеспечивает заметное снижение электрического сопротивления таких обмоток в направлении рабочего тока и снижение резистивных потерь в них. Достижимый рост нагрузочной способности стержня-обмотки зависит не только от исходного ферромагнитного проводника, но и от технологии намотки и от характеристик примененной электрической изоляции лент. По этой причине

каждую партию изготовленных стержней-обмоток необходимо измерять на магниторезистивность. Измерения электрического сопротивления стержня-обмотки выполняются установкой его в несложную замкнутую электромагнитную систему постоянного тока (рис. 3), сплошной сердечник которой выполнен из низкоуглеродистой стали с известными характеристиками, имеющую также обмотку управления намагничиванием магнитной цепи. Измеряя на постоянном токе электрическое сопротивление между выводами стержня-обмотки при разных значениях и направлениях постоянного магнитного поля, наводимого током обмотки управления устройства, получают точки характеристики $R_{11}(B)$ рабочей продольной магниторезистивности изготовленного экзземпляра стержня-обмотки. Контрольное значение сопротивления измеряется между концами вытянутой ленты до намотки ее на стержень-обмотку. Наилучшие технологические результаты изготовления материала и намотки стержней-обмоток обеспечивают им при работе в замкнутых магнитных системах электрическое сопротивление меньшее, чем у серебряных обмоток с такими же размерами. При этом влияние возникающей нелинейности сопротивления стержней-обмоток на погрешность измерительных трансформаторов новой конструкции не превышает 0,01% и может не учитываться.

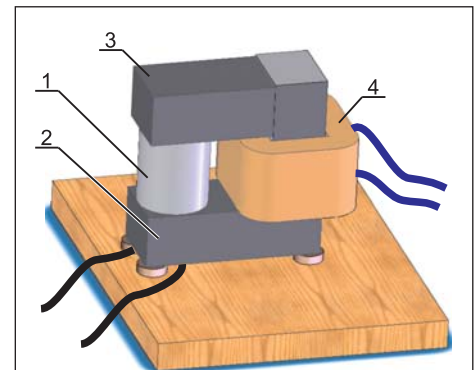


Рис. 3. Устройство для снятия характеристики $R_{11}(B)$ магниторезистивности стержня-обмоток: 1 — исследуемый образец стержня-обмотки; 2 — сплошной уголок; 3 — подвижное ярмо из низкоуглеродистой стали; 4 — обмотка постоянного тока для намагничивания замкнутой магнитной цепи, образованной стержнем-обмоткой, уголком и ярмом устройства

Влияние нежелательных проявлений скин-эффекта, эффекта Холла и униполярного электрического заряда, вызванного протеканием тока [2], например увеличение сопротивления железных обмоток и их электростатической связи, свойственной также и обмоткам из неферромагнитных материалов, компенсируется наличием рассмотренных выше инверторов слоев и использованием материала с нулевым коэффициентом Холла. Это также по-

звоняет отказаться от межобмоточного экрана, используемого в традиционных обмотках.

Управление гистерезисом сердечника

Изготовители магнитно-мягких ферромагнитных материалов и сердечников из них указывают только часть их характеристик, например: индукция насыщения материала $B_s = 2,1$ Тл; рекомендуемое рабочее значение индукции $B_{\text{раб}} = 2/3 B_s$ — в синусоидальном магнитном поле частотой 100 кГц; удельные потери $P_{\text{уд}} = 1$ Вт/кг — в синусоидальном магнитном поле частотой 100 кГц; относительная магнитная проницаемость $\mu = 150\,000$; коэрцитивная сила $H_c < 400$ А/м. Хотя дается приблизительная картина гистерезиса перемагничивания, о значениях остаточной намагниченности материала и сердечника или остаточной индукции B_r обычно умалчивается.

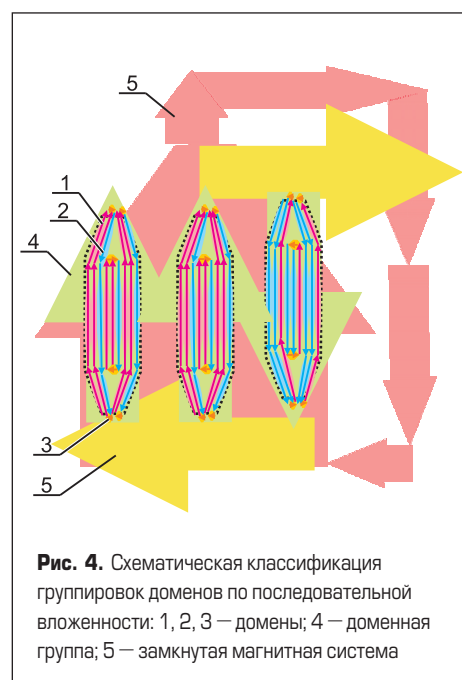
Проблема высокой остаточной индукции, частично ответственной, например, за нелинейность сердечников в измерительных трансформаторах и повышенных гистерезисных потерь перемагничивания сердечников, возникла не в настоящее время, а существует уже около века. В замкнутых сердечниках существует также проблема гистерезиса «конструкционной остаточной намагниченности», известная в электроаппаратостроении как залипание ярма. В низкочастотных устройствах или устройствах, работающих замкнуто на постоянном токе, такой недостаток замкнутых магнитных цепей почти полностью устранялся встраиванием в них немагнитных зазоров. Так, на стр. 306 в [5] говорится: «... зависимость коэффициента N размагничивания от магнитной проницаемости $\mu_0 \mu$ материала и его намагниченности J (равной приблизительно $2/3$ намагниченности насыщения B_s) значительно сильнее, чем от формы образца, и ее часто не учитывают при технических расчетах». Однако рассмотрим осциллограмму первичного тока холостого хода трансформаторов с сердечниками, навитыми из тонкой ленты современного лучшего магнитно-мягкого нано-кристаллического сплава с индукцией насыщения $B_s \geq 1$ Тл и $\mu \geq 100\,000$, при питании симметричным синусоидальным напряжением без постоянной составляющей, например на частотах f выше 5 кГц. В зависимости от полярности первого полупериода напряжения этот ток имеет постоянную составляющую такой же направленности со значением около 30% от амплитуды его переменной составляющей. Поэтому, если не уменьшать напряжение питания, наблюдается насыщение сердечника и вызванный этим пик тока. Очевидно, причиной наблюдаемого режима, снижающего КПД трансформатора из-за гистерезисных потерь и эффективность использования сердечника, является относительно высокое значение остаточной индукции B_r материала и замкнутой конструкции сердечника из него. Часто таким магнитно-мягким материалам, содержащим примесные частички для повы-

шения удельного сопротивления, присуща и остаточная магнитоотрицательная потеря в таких материалах. В качестве интересного примера можно рассмотреть последовательную $L-C$ цепочку, в которой роль индуктивного компонента выполняет обмотка с замкнутым сердечником, навитым из ленты современного магнитно-мягкого магнитоотрицательного материала — железа, пропитанного алюминием (так как процесс пропитки при погружении железной ленты в расплавленный алюминий происходит быстро, такой материал недорог). Ток в такой обмотке отстает от напряжения на ней по фазе, равной не $\pi/2$, а близкой к π , что видно также по тому, что $L-C$ цепочку с таким индуктивным компонентом невозможно настроить в резонанс подбором емкостного компонента, и значение тока в ней всегда будет ограничено этим индуктивным компонентом. Остаточная магнитоотрицательная свидетельствует о наличии активных гистерезисных потерь в материале.

Какие методы можно использовать для снижения B_r в сердечнике? Использование немагнитных зазоров в сердечнике снижает в нем значение остаточной индукции B_r лишь частично, и стремление далее снизить ее значение путем увеличения зазоров ведет к существенному росту потерь на намагничивание и ухудшает потокоцепление обмоток. Следовательно, снижение B_r в материале сердечников выгоднее осуществлять путем использования беспримесных тонкослойных ферромагнитных металлов и, например, методом перпендикулярного намагничивания сердечника, который используется также для линеаризации характеристик измерительных трансформаторов тока [6].

Рассмотрим наиболее простую модель, описывающую процесс управления остаточной намагниченностью ферромагнетика в направлении рабочего магнитного потока путем перпендикулярного намагничивания сердечника. Магнитные моменты, то есть магнитные спины связанных электронов ферромагнетика, не имеющие пары в своем атоме для образования замкнутой магнитной системы и не участвующие в сцеплении соседних атомов, склонны к магнитному взаимодействию со спинами таких же электронов соседних атомов, образуя группы или домены, в пределах которых ориентация этих спинов одинакова. Принято также считать, что при отсутствии ориентирующего магнитного поля, создаваемого источником, внешним по отношению к сердечнику, домены спонтанно взаимно ориентированы, образуя произвольные (можно сказать, аморфные) замкнутые магнитные цепи, за пределами которых их суммарное магнитное поле равно нулю. При этом внешнее магнитное поле вынуждает домены к дополнительному повороту вдоль своего направления, пропорциональному значению этого поля. Однако согласно сегодняшним публикациям [7], описывающим распространение волн намагничивания в ферромагнитных образцах, то есть спиновых волн, эти волны соответ-

ствуют колебаниям разных частот, отличающихся исследуемый тип ферромагнитного материала, причем чем выше частота, тем выше скорость распространения колебания с этой частотой. Логично сделать следующий вывод. Каждому типу ферромагнитного материала свойственны домены с вполне определенными размерами и интенсивностью их магнитного поля, образующие наименьшие напряженные группы с максимальным коэффициентом упругости и с вполне определенными размерами. Ориентации этих жестких групп соответствует спиновая волна максимальной частоты. Однако полного замыкания магнитного потока доменов внутри этой группы не происходит. Поэтому образуется более крупная группа, также вполне определенных размеров, вмещающая доменные группы минимального размера, более инерционная и имеющая меньший коэффициент упругости по сравнению с группами минимального размера. Но внутри этой группы полное замыкание магнитного потока доменов также не достигается. Это вызывает образование еще более крупной группировки, более инерционной и с еще меньшим коэффициентом упругости. Наибольшая группировка доменов, самая чувствительная не только к внешнему полю, но и к малозначимым дефектам материала и конструкции, будет заполнять собой весь ферромагнитный сердечник. Хотя она и дает наименьший, то есть остаточный вклад в магнитную проницаемость и рабочую индукцию в сердечнике, но более всего ответственна за остаточную намагниченность сердечника. Высокая чувствительность ко внешнему магнитному полю у максимальных группировок доменов по сравнению с более мелкими группировками позволяет легко устранять их нежелательное влияние путем подмагничивания сердечника слабым магнитным полем, перпендикулярным рабочему магнитному полю. Группировки доменов в сердечнике схематически показаны на рис. 4.



1, 2, 3 — домены, которые, ориентируя друг друга, образуют в однородном ферромагнетике самые жесткие доменные группы 4, то есть замкнутые магнитные системы одинакового мелкого размера; причем небольшая часть доменов одного из направлений намагниченности не входит в замкнутую магнитную систему. Поэтому минимальные группировки доменов входят в одинаковые группы 5 большего размера с меньшим коэффициентом упругости, то есть более крупные замкнутые магнитные системы. Но в этих группах также остаются группы 4 предыдущего мелкого порядка, не входящие в замкнутую магнитную систему 5. Это объединяет группировки 5 в более крупные замкнутые магнитные системы. Самая крупная группировка доменов заполняет весь ферромагнитный сердечник. Наличие и размеры промежуточных группировок зависят от типа материала, технологии его обработки, например от текстуры, образовавшейся при обработке, от геометрических форм сердечника. В тонкопленочных ферромагнитных материалах из-за возникновения больших доменных группировок первых порядков разброс их размеров может ограничиваться всего тремя или двумя. Размеры и коэффициент упругости доменных группировок и их количество оцениваются по спектральному составу и интенсивности каждой гармоники в спиновых волнах, возникающих в ферромагнитном образце после подачи на его участок короткого импульса намагничивающего поля.

Очевидно, линейризация характеристик намагничивания ферромагнитного сердечника методом его перпендикулярного подмагничивания связана с управляемостью изменениями доменных группировок используемого ферромагнетика. Однако большей ценностью этого метода является возможность устранения остаточной намагниченности сердечника, то есть повышения КПД устройства благодаря уменьшению гистерезисных потерь, соответствующих перемагничиванию в направлении рабочего магнитного потока. Наилучшие результаты достигаются при использовании тока подмагничивания, изменяющегося одинаково и синхронно с рабочим током первичной обмотки устройства. В беспримесных магнитномягких ферромагнетиках перпендикулярное намагничивание направлено вдоль оси трудного намагничивания доменов, в отличие от рабочего перемагничивания вдоль оси легкого намагничивания. Несмотря на это, значение B , остаточной индукции существенно меньше рабочей индукции $B_{раб}$, и управляются наиболее чувствительные, то есть наименее энергоемкие доменные группировки, поэтому петля гистерезиса перпендикулярного подмагничивания имеет относительно малую площадь, соответствующую таким же малым потерям энергии в перпендикулярной магнитной цепи.

Влияние перпендикулярного подмагничивания на магнитную проницаемость μ_{\perp} в направлении рабочего магнитного потока сердечника незначительно, так как из-за малости магнитной проницаемости μ_{\perp} в направлении

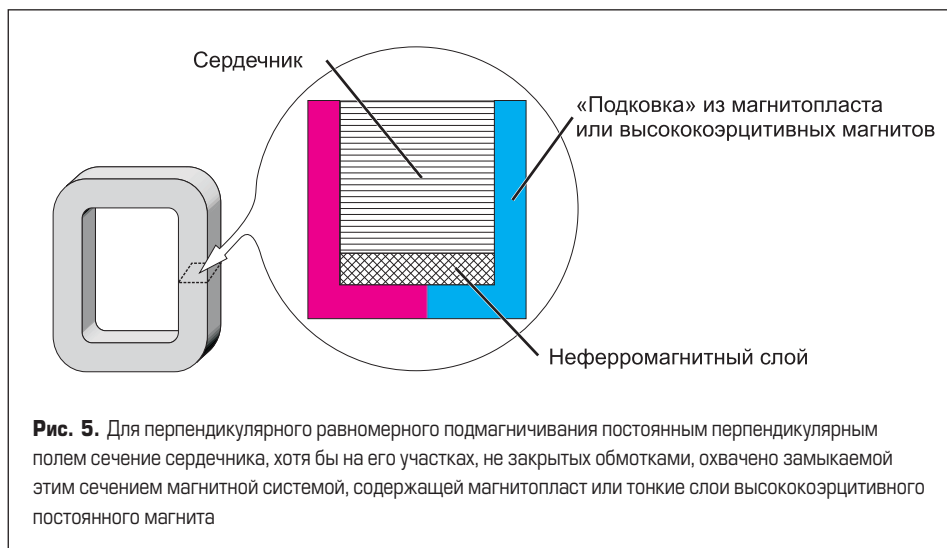


Рис. 5. Для перпендикулярного равномерного подмагничивания постоянным перпендикулярным полем сечение сердечника, хотя бы на его участках, не закрытых обмотками, охвачено замыкаемой этим сечением магнитной системой, содержащей магнитоласт или тонкие слои высококоэрцитивного постоянного магнита

подмагничивания, отвлекаемой при этом методе коррекции характеристик сердечника, значение μ_{\parallel} мало отличается от полной магнитной проницаемости сердечника $\mu = (\mu_{\parallel}^2 + \mu_{\perp}^2)$.

Перпендикулярное подмагничивание в трансформаторах МТС не влияет на магниторезистивность стержней-обмоток, так как суммарный магнитный поток при этом только слегка закручивается вдоль их оси, оставаясь однородным вдоль витков.

В традиционных конструкциях трансформаторов и дросселей для перпендикулярного подмагничивания приходится использовать дополнительную энергозатратную внешнюю магнитную систему [6]. Часто используется подмагничивание постоянным магнитным полем (рис. 5), однако это также не упрощает конструкцию равномерно подмагничивающей магнитной системы и к тому же вносит искажения в кривую перемагничивания $B_{раб}(H_{раб})$ сердечника.

В простых конструкциях МТС система перпендикулярного подмагничивания возникает естественным образом, благодаря тому, что провод внутреннего вывода стержня-обмотки охватывает его вертикальное сечение (рис. 6). Избыточность перпендикулярного подмагничивания, которая могла бы ухудшить характеристики этих ферромагнитных стержней, компенсируется размагничивающим короткозамкнутым витком, охватывающим это же вертикальное сечение стержня-обмотки. Чтобы перпендикулярное подмагничивание не обнулялось полностью, электрическое сопротивление $R_{\perp dm} > 0$ короткозамкнутого витка рассчитывается так, чтобы полный ток электромагнитной системы подмагничивания остался достаточным для исключения остаточной намагниченности стержней-обмоток в направлении рабочего магнитного потока. Так как ток стержня-обмотки и его вывода является одним и тем же, нет проблем с синхронизацией рабочего и перпендикулярного подмагничивания. В результате характеристика $B(H)$ перемагничивания должна выглядеть так, как показано на рис. 7, т. е. соответствовать линейризованному сердечнику почти без гистерезисных потерь.

Историческая справка

Уже в 60-х годах прошлого века предпринималась попытка использовать эмпирический параметр комплексной магнитной проницаемости, учитывающий не только отношение индукции и напряженности магнитного поля в ферромагнетике, но и фазовые сдвиги между их гармониками ([5], стр. 307). Однако получить динамическую кривую намагничивания и динамическую магнитную проницаемость материала не удавалось, поскольку применявшаяся металлургическая технология не обеспечивала повторяемость результатов при тестировании груп-

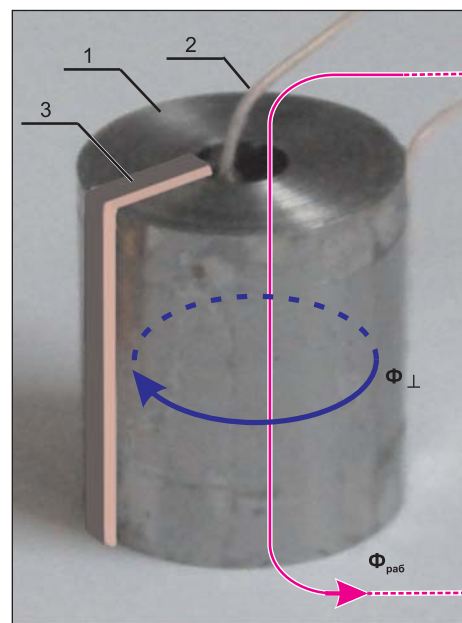
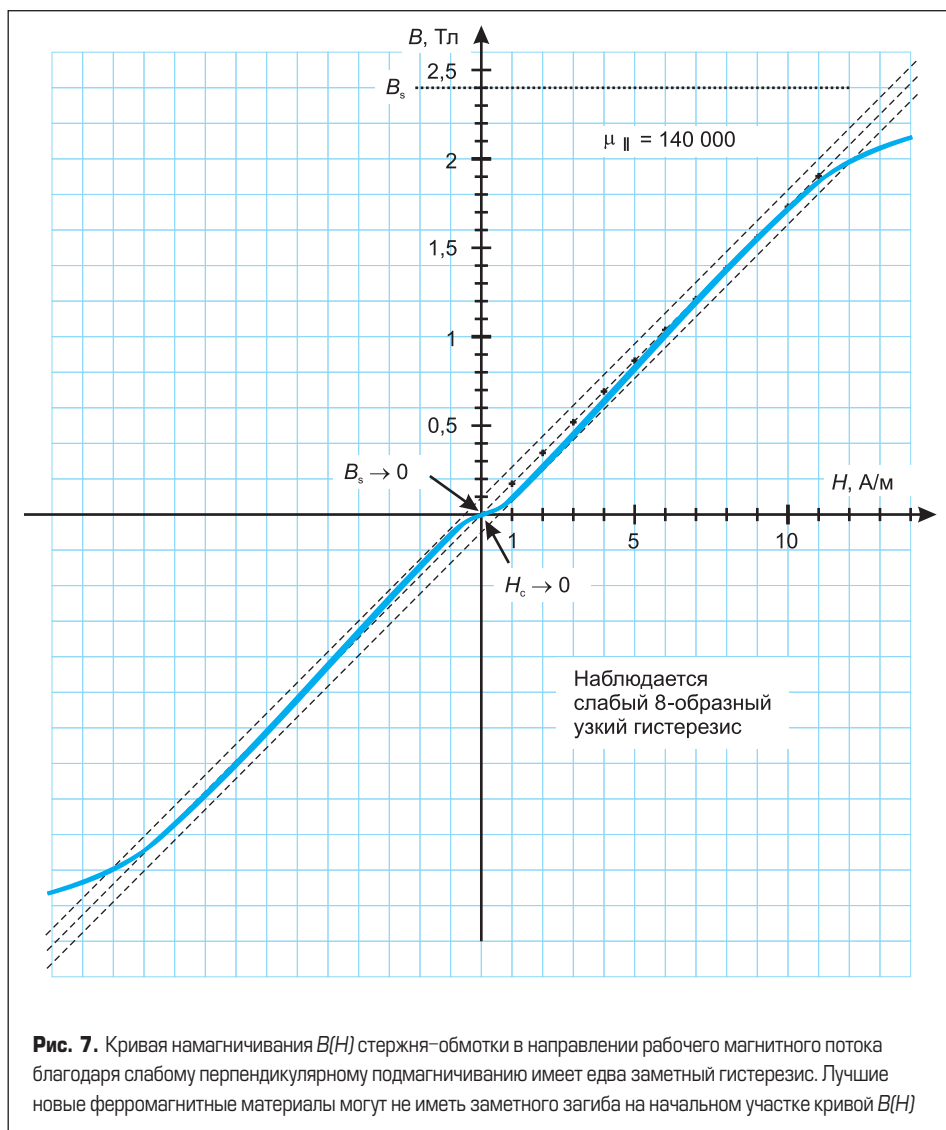


Рис. 6. Конструкция стержня-обмотки трансформатора МТС: 1 — стержень-обмотка; 2 — внутренний вывод, образующий электромагнитную систему перпендикулярного намагничивания; 3 — короткозамкнутый виток перпендикулярного размагничивания; $\Phi_{раб}$ — рабочий магнитный поток трансформатора; Φ_{\perp} — поток перпендикулярного намагничивания стержня-обмотки током вывода 2



пы одинаковых образцов. Теперь же стало возможным использовать характеристики спектрального состава волн намагничивания ферромагнетика не только в числе основных его параметров, но и как информацию для коррекции технологий, применяемых в изготовлении ферромагнетиков и ферромагнитных сердечников.

Заключение

Изготовители новых магнитно-мягких ферромагнитных материалов в паспорте материала планируют обязательно указывать все его параметры: $B(H)$, μ , B_p , B_s , H_c , удельные потери на рекомендуемых частотах работы материала, параметры доменных группировок и рекомендуемые значения поля перпендикулярного подмагничивания, точность изготовления и калибровки лент, параметры изоляции лент.

Литература

1. Пат. № 2320045 (РФ), МКИ H01F 30/06. Трансформатор / В. В. Казаков, Г. А. Немцев // Бюл. 2008. № 8.
2. Казаков В. В., Казаков О. В., Немцев Г. А. Метод индивидуального рассмотрения поля заряженных частиц в электромагнитных системах // Материалы VII международной научно-практической конференции «Динамика научных исследований». 2001. Том 20.
3. Протокол калориметрических исследований омических потерь в электромагнитном устройстве. Чувашский государственный университет, кафедра ЭСПИ. 2008.
4. Binasch G., Grunberg P., Saurenbach F., Zinn W. Enhanced magneto-resistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange // Physical review. 1989. V. 39. № 7.
5. Электротехнический справочник. 3-е изд. Под ред. Голована А. Т. и др. Т. 1. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1962.
6. Puilo G., Shevchenko V. Effective method and constructions, reducing error of measuring current transformers // Proceedings of X International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA'97. V.1.
7. Kalinikos B. A. Dipole-exchange spin-wave spectrum of magnetic films. // Linear and Nonlinear Spin Waves in Magnetic Films and Superlattices. Singapore: World Scientific Publishing Company. 1994.