

Область техники

Первый аспект настоящего изобретения касается изолированного проводника для высоковольтных обмоток в электрических машинах.

Второй аспект настоящего изобретения касается вращающихся электрических машин или статических электрических машин, содержащих изолированный проводник вышеописанного типа.

Изобретение пригодно для вращающихся электрических машин, таких как синхронные или асинхронные машины, а также для статических электрических машин, таких как мощные трансформаторы и электрические реакторы. Изобретение также пригодно для других электрических машин, например машин с двойным возбуждением, и для использования в асинхронных статических токовых каскадах, машинах с внешним полюсом и синхронных машинах непрерывного действия, при условии, что их обмотки состоят из изолированных электрических проводников, описанных выше, и предпочтительно работают при высоких напряжениях. Здесь термин "высокие напряжения" относится к электрическим напряжениям, превышающим 10 кВ. Типичный рабочий диапазон напряжений для изолированного проводника для высоковольтных обмоток, выполненного согласно изобретению, может составлять 1-800 кВ.

Уровень техники

Для объяснения и описания машины сначала будет дано краткое описание вращающейся электрической машины на примере синхронной машины. Первая часть описания по существу касается магнитной цепи такой машины и ее классического построения. Поскольку магнитная цепь, о которой в большинстве случаев идет речь, расположена в статоре, ниже магнитную цепь обычно будем описывать как статор с пластинчатым сердечником, обмотку которого будем называть обмоткой статора, а пазы для обмотки в пластинчатом сердечнике будем называть пазами статора или просто пазами.

Обмотка статора расположена в пазах в листовом железном сердечнике, причем обычно пазы имеют прямоугольное или трапециевидное поперечное сечение, т.е. имеющее форму прямоугольника или трапеции. Каждая фаза обмотки содержит множество последовательно соединенных групп катушек, а каждая группа катушек включает множество последовательно соединенных катушек. Различные части катушки обозначим следующим образом: боковая часть катушки - та часть, которая помещена в статор, торцевой конец обмотки - та часть, которая расположена вне статора. Катушка включает один или более проводников, объединенных вместе по высоте и/или ширине.

Между всеми проводниками имеется тонкая изоляция, например, из эпоксидной смолы/стекловолокна.

Катушка изолирована от паза с помощью изоляции катушки, т.е. изоляции, рассчитанной на то, чтобы выдерживать номинальное напряжение машины относительно "земли". В качестве изоляционного материала могут использоваться различные пластмассы, лак и стекловолоконные материалы. Обычно используется так называемая слюдяная лента, которая состоит из слюды и прочной пластмассы, выполненная специально для предотвращения частичных разрядов, которые могут быстро пробить изоляцию. Изоляцию наносят на катушку, наматывая несколько слоев слюдяной ленты вокруг катушки. Осуществляют пропитку изоляции, а затем боковую часть катушки окрашивают краской на графитовой основе для улучшения контакта с окружающим статором, который соединен с потенциалом земли.

Площадь сечения проводника для обмоток определяется силой текущего через них тока и используемым способом охлаждения. Проводник и катушка обычно имеют прямоугольную форму, чтобы увеличить количество проводящего материала в пазу. Обычная катушка выполнена из так называемых стержней Ребеля и некоторые стержни имеют пустоты для хладагента. Стержень Ребеля содержит множество прямоугольных медных проводников, соединенных параллельно, которые скручены в пазу на 360°. Могут использоваться стержни Ринглэнда со скручиванием на 540° и другие параметры скручивания. Скручивание делают во избежание возникновения циркулирующих токов, которые возникают в поперечном сечении проводника, если смотреть в направлении магнитного поля.

По причинам механического и электрического свойства, машину невозможно сделать произвольного размера. Мощность машины определяют по существу три фактора:

- площадь проводника в обмотках. При нормальной рабочей температуре медь, например, имеет максимальную величину тока 3-3,5 А/мм²;
- максимальная плотность потока (магнитного потока) в материале статора и ротора;
- максимальная напряженность электрического поля в изолирующем материале, так называемая электрическая прочность диэлектрика.

Многофазные обмотки переменного тока выполнены в виде однослойных или двухслойных обмоток. В случае однослойных обмоток на паз приходится только одна боковая часть катушки, а в случае обмоток с двумя слоями на паз приходится две боковые части катушки. Двухслойные обмотки обычно выполнены в виде равносекционных обмоток, тогда как однослойные обмотки, которые могут быть здесь использованы, могут быть равносекционными или концентрическими. В случае равносекционной обмотки имеется только одна величина ша-

га обмотки (или, возможно, две величины шага обмотки), тогда как плоские обмотки выполнены как концентрические обмотки, то есть с сильно меняющимся шагом обмотки. Шагом обмотки называется расстояние по дуге между двумя боковыми частями одной катушки по отношению либо к полюсному шагу, либо ряду промежуточных пазовых шагов. Обычно для придания обмотке требуемых свойств используются различные варианты намотки, например намотка с укороченным шагом.

Тип обмотки по существу указывает на то, как расположены катушки в пазах, а именно, как боковые части катушки соединены снаружи статора, т.е. своими торцевыми концами.

Вне сложенных листов статора катушка не имеет нанесенного окрашиванием проводящего заземленного слоя. На торцевом конце обмотки обычно имеется средство для управления электрическим полем в виде так называемого коронозащитного лака, предназначенного для преобразования радиального поля в аксиальное поле, поскольку изоляция на торцевых концах обмотки находится под высоким потенциалом относительно земли. Это иногда вызывает коронный разряд около торцевых концов обмотки, который может привести к поломкам. Из-за так называемых точек, определяющих поле, у торцевых концов обмотки, во вращающейся электрической машине возникают проблемы.

Обычно все большие машины имеют двухслойные обмотки и одинаковые большие катушки. У каждой катушки одну боковую часть помещают в одном из слоев, а другую - в другом слое. Это означает, что все катушки пересекаются друг с другом в торцевых концах обмотки. При использовании более двух слоев эти пересечения затрудняют намотку катушек и ухудшают торцевые концы катушек.

Общезвестно, что подключение синхронной машины/генератора к силовой электросети должно производиться через повышающий трансформатор, соединенный по схеме треугольник-звезда, поскольку напряжение силовой электросети обычно выше, чем напряжение вращающейся электрической машины. Таким образом, этот трансформатор вместе с синхронной машиной является неотъемлемой частью силовой установки. Наличие трансформатора приводит к росту стоимости установки, а также снижает эффективность всей системы. Если бы было возможно изготовление машины для значительно более высоких напряжений, необходимость в повышающем трансформаторе отпала бы.

В течение последних десятилетий значительно возросла необходимость во вращающихся электрических машинах, рассчитанных на более высокие напряжения, чем известные до этого машины. Максимальные напряжения, которых при имеющемся уровне техники можно было достичь для синхронных машин, при хо-

рошем промышленном выходе годных катушек лежат в диапазоне 25-30 кВ.

Некоторые попытки осуществления нового подхода к разработке синхронных машин описаны, помимо прочего, в статье "Water-and-oil-cooled Turbogenerator TVM-300", J. Elektrotechnika, No. 1, 1970, pp. 6-8, в патенте США № 4429244 "Статор генератора" и в патенте СССР № 955369.

Синхронная машина с водяным и масляным охлаждением, описанная в журнале J.Elektrotechnika, рассчитана на напряжения до 20 кВ. В статье описана новая система изоляции, состоящая из масляно-бумажной изоляции, которая позволяет погрузить статор полностью в масло. При этом масло может использоваться как хладагент и в то же самое время как изоляция. Для предотвращения просачивания масла из статора к ротору, на внутренней поверхности сердечника имеется диэлектрическое маслоудерживающее кольцо. Обмотка статора выполнена из полых проводников овального сечения с масляной и бумажной изоляцией. Боковые части катушки с изоляцией закреплены в пазах прямоугольного сечения посредством клиньев. Как в полых проводниках, так и в отверстиях в стенках статора, для их охлаждения используется масло. Однако такие системы охлаждения требуют большого количества как электрических, так и гидравлических соединений на концах катушек. Кроме того, толстая изоляция приводит к увеличению радиуса кривизны проводников, что, в свою очередь, вызывает увеличение вылета обмотки.

Вышеупомянутый патент США относится к части статора в синхронной машине, которая содержит листовую магнитный сердечник с трапецеидальными пазами для статорной обмотки. Паза сужаются, поскольку потребность в изоляции статорной обмотки уменьшается в направлении к внутренней части ротора, где расположена ближайшая к нейтральной точке часть обмотки. Кроме того, часть статора содержит диэлектрический маслоудерживающий цилиндр, расположенный поблизости от внутренней поверхности сердечника. Эта часть может повысить требования к магнитной части устройства по сравнению с машиной без этого кольца. Обмотка статора выполнена из маслонеполненных кабелей одинакового диаметра для каждого слоя катушки. Слои отделены друг от друга посредством распорных деталей, установленных в пазах, и закреплены клиньями. Особенностью обмотки является то, что она содержит две так называемых полуобмотки, соединенные последовательно. Одна из двух полуобмоток расположена по центру внутри трубчатой изоляции. Проводники статорной обмотки охлаждаются окружающим маслом. Недостатками системы с таким большим количеством масла являются риск утечки и большой объем работы по очистке в случае аварии. Те части трубчатой

изоляции, которые расположены вне пазов, имеют цилиндрическую часть и коническое завершение, усиленное токонесущими слоями, назначение которых заключается в управлении напряженностью электрического поля в области, где кабель входит в конец обмотки.

Из патента СССР № 955369 понятно, что еще одна попытка увеличить номинальное напряжение синхронной машины заключается в том, что охлаждаемая маслом статорная обмотка содержит известный высоковольтный кабель одинакового размера для всех слоев. Кабель помещен в пазы статора, выполненные в виде круговых радиально расположенных отверстий, размеры которых соответствуют площади поперечного сечения кабеля и необходимому месту для их установки и для хладагента. Различные расположенные радиально слои обмотки окружены трубчатой изоляцией и закреплены в ней. В пазу статора трубки закреплены изолирующими распорками. Из-за масляного охлаждения во внутреннем воздушном зазоре необходимо установить внутреннее диэлектрическое кольцо для создания уплотнения для предупреждения просачивания масляного хладагента. Описанные выше недостатки, связанные с наличием масла в системе, присущи и этой конструкции. Кроме того, конструкция характеризуется очень малыми радиальными промежутками между различными пазами в статоре, что подразумевает большой поток утечки в пазах и значительно влияет на требования к машине, связанные с намагничиванием.

В докладе Научно-исследовательского института электроэнергетики (EPRI), EL-3391, 1984 г., выполнен обзор концепций для построения вращающейся электрической машины повышенного напряжения для подключения ее к силовой электросети без промежуточного трансформатора. Такое решение, судя по исследованиям, способно обеспечить повышение эффективности и экономичности. Главной причиной для рассмотрения в 1984 г. проектов генераторов для непосредственного подключения к электросети было то, что в это время был изготовлен сверхпроводящий ротор. Большие магнитные поля, создаваемые сверхпроводником, позволяют использовать обмотку с воздушными зазорами при достаточно толстой изоляции для противодействия электрическим нагрузкам. Было решено, что при объединении наиболее многообещающей, согласно проекту, концепции создания магнитной цепи с обмоткой так называемого монолитного цилиндрического якоря, т.е. концепции, согласно которой обмотка содержит два цилиндра с проводниками, concentрически заключенными в трех цилиндрических изоляционных кожухах, а вся система установлена на железном сердечнике без зубцов, высоковольтная вращающаяся электрическая машина могла бы быть непосредственно подключена к силовой электросети. Решение подразумевало,

что главная изоляция должна быть сделана достаточно толстой, чтобы выдержать напряжения "сеть-сеть" и "сеть-земля". После обзора всех известных на то время систем изоляции было решено, что система изоляции, которая должна была выдержать более высокое напряжение, будет такой, какая обычно используется для силовых трансформаторов и состоит из прессованной целлюлозы с пропиткой диэлектрической жидкостью. Очевидные недостатки предложенного решения заключаются в том, что в дополнение к требованиям, обусловленным наличием сверхпроводящего ротора, требуется очень толстая изоляция, которая увеличивает размер машины. Для того чтобы выдерживать большие электрические поля, торцевые концы обмоток должны быть изолированы и охлаждаться маслом или фреонами. Вся машина должна быть герметично закрыта для предотвращения поглощения жидким диэлектриком влаги из атмосферы.

При изготовлении вращающихся электрических машин согласно данному уровню техники обмотку с проводниками и системами изоляции изготавливают в несколько этапов, причем обмотка должна быть выполнена заранее до установки в магнитной цепи. Пропитку для подготовки системы изоляции выполняют после установки обмотки в магнитную цепь.

Сущность изобретения

Целью изобретения является создание высоковольтной вращающейся электрической машины без какой-либо сложной предварительной подготовки обмотки и без необходимости пропитки системы изоляции после установки обмотки.

Известно, что для увеличения мощности вращающейся электрической машины необходимо увеличить электрический ток в катушках переменного тока. Это было достигнуто оптимизацией количества проводящего материала, т.е. плотной упаковкой прямоугольных проводников в прямоугольных пазах ротора. Цель состояла в том, чтобы справиться с возникающим из-за этого повышением температуры за счет увеличения количества изолирующего материала и использования более термостойких и, следовательно, более дорогих изоляционных материалов. Кроме того, повышенная температурная и электрическая нагрузка на изоляцию сокращает срок ее службы. В относительно толстостенных изолирующих слоях, которые используются для высоковольтного оборудования, например, пропитанных слоев из слюдяной ленты, серьезной проблемой является частичный разряд. При изготовлении этих изолирующих слоев легко образуются полости, поры и т.п., в которых при действии на изоляцию мощного электрического поля возникает коронный разряд. Этот коронный разряд постепенно разрушает материал и может привести к электрическому пробое изоляции.

Настоящее изобретение основано на понимании того, что для увеличения мощности вращающейся электрической машины технически и экономически приемлемым способом необходимо, чтобы изоляция не была разрушена из-за описанных выше явлений. Согласно изобретению это может быть достигнуто с использованием слоев изоляции, выполненных так, чтобы риск образования полостей и пор был минимален, например, с использованием полученных с помощью экструзии слоев из подходящего твердого изоляционного материала, например термопластических смол, термопластических смол с поперечными связями, каучука, например силиконового каучука, и т.д. Кроме того, важно, чтобы изолирующий слой включал внутренний слой, окружающий проводник, с полупроводящими свойствами и чтобы изоляция включала также, по меньшей мере, один дополнительный внешний слой с полупроводящими свойствами. В этом контексте считается, что полупроводящими свойствами обладает материал, который имеет значительно более низкую проводимость, чем проводник электрического тока, но который не имеет такой низкой проводимости, как изолятор. При использовании только изолирующих слоев, которые могут быть изготовлены с минимумом дефектов и, кроме того, при создании изоляции с внутренним и внешним полупроводящими слоями, можно обеспечить снижение тепловых и электрических нагрузок. Изолирующая часть и, по меньшей мере, один соседний полупроводящий слой должны иметь по существу один и тот же коэффициент теплового расширения. В этом случае при наличии температурных градиентов не будут создаваться дефекты, обусловленные различным температурным расширением изоляции и окружающих слоев. Электрическая нагрузка на материал уменьшается, так как проводящие слои вокруг изоляции образуют эквипотенциальные поверхности, и электрическое поле в изолирующей части будет распределено относительно равномерно по толщине изоляции. На внешний полупроводящий слой может быть подан заданный потенциал, например потенциал земли. Это означает, что для такого кабеля внешняя оболочка по всей длине будет находиться под нулевым потенциалом. Кроме того, внешний слой может иметь разрезы в подходящих местах вдоль проводника и на каждый отрезок может быть непосредственно подан заданный потенциал. Вокруг внешнего полупроводящего слоя могут иметься другие слои, кожа и т.п., например металлический экран и защитная оболочка.

Дополнительная информация, связанная с настоящим изобретением, заключается в том, что увеличение токовой нагрузки ведет к проблемам, связанным с концентрацией электрического поля в углах поперечного сечения катушки, и это приводит в этих местах к большим ме-

стным нагрузкам на изоляцию. Аналогично магнитное поле в зубах статора концентрируется на углах. Это означает, что возникает местное магнитное насыщение, магнитный сердечник используется не полностью и форма генерируемого синусоидального напряжения/тока искажается. Кроме того, потери на индуцированные вихревые токи в проводниках, которые возникают из-за геометрии проводников по отношению к магнитному полю, приводят к дополнительным недостаткам, увеличивая плотность тока. Дальнейшее усовершенствование изобретения достигнуто за счет того, что катушки и пазы, в которые эти катушки помещаются, выполнены по существу круглыми, а не прямоугольными. Когда поперечное сечение катушек круглое, они окружены постоянным магнитным полем и нет областей, где может быть достигнуто магнитное насыщение. Кроме того, электрическое поле в катушке будет распределено равномерно по поперечному сечению, и локальные нагрузки на изоляцию значительно уменьшатся. Кроме того, круглые катушки легче разместить в пазах так, чтобы число боковых частей катушки на группу катушек возросло, а увеличение напряжения имело бы место без необходимости увеличения тока в проводниках. Причина этого заключается в том, что охлаждение проводников облегчается, с одной стороны, из-за меньшей плотности тока и, следовательно, уменьшения градиентов температуры поперек изоляции, и, с другой стороны, из-за круглой формы пазов, которая обеспечивает более равномерное распределение температуры по поперечному сечению. Дополнительных преимуществ можно достичь при составлении проводника из меньших частей, так называемых жил. Жилы могут быть изолированы друг от друга, и лишь небольшое их число может быть оставлено неизолированными и в контакте с внутренним проводящим слоем, чтобы обеспечить нахождение его под тем же потенциалом, что и проводник.

Преимуществом использования вращающейся электрической машины, выполненной согласно изобретению, является то, что машина может работать без повреждения при перегрузке в течение значительно более длительного времени, чем обычно. Это является следствием конструкции машины и ограниченной тепловой нагрузки на изоляцию. Например, оказывается возможным осуществить 100% перегрузку в течение времени от 15 мин и до двух часов.

В одном варианте выполнения изобретения магнитная цепь вращающейся электрической машины содержит обмотку из проложенного в ней кабеля, включающего один или более проводников с твердой изоляцией, нанесенной путем экструзии, причем как на проводнике, так и на оболочке имеется проводящий слой. На внешний проводящий слой может быть подан потенциал земли. Для того чтобы решить про-

блемы, возникающие при непосредственном соединении вращающихся электрических машин со всеми типами высоковольтных силовых электросетей, машина, выполненная согласно изобретению, имеет ряд признаков, которые отличают ее от известных машин.

Как описано выше, обмотка вращающейся электрической машины может быть изготовлена из кабеля с одним или более проводников и нанесенной путем экструзии твердой изоляцией, имеющего проводящий слой как на проводнике, так и на оболочке.

Типичными примерами изолирующих материалов являются термопластики, например полиэтилен низкой плотности, полиэтилен высокой плотности, полипропилен, полибутилен, полиметилпентен, или материалы с поперечными связями, такие как полиэтилен с межмолекулярными связями, или каучуковая изоляция, например этиленпропиленовый или силиконовый каучук.

Возможно дальнейшее совершенствование проводника, составленного из жил, путем изоляции жил друг от друга для уменьшения вихревых потерь в проводнике. Одна или несколько жил могут быть оставлены неизолированными, чтобы проводящий слой, который окружает проводник, находился под тем же потенциалом, что и сам проводник.

Известно, что высоковольтный кабель для передачи электрической энергии состоит из проводников с твердой изоляцией, нанесенной путем экструзии, с внутренней и внешней проводящими частями. В процессе передачи электрической энергии требуется, чтобы изоляция не имела дефектов. При использовании высоковольтных кабелей для передачи электрической энергии целью не является максимизация тока через кабель, поскольку для передающего кабеля отсутствуют пространственные ограничения.

Изоляция проводника для вращающейся электрической машины может быть нанесена каким-либо другим способом, нежели экструзией, например распылением и т.п. Однако важно, чтобы изоляция не имела никаких дефектов в поперечном сечении и обладала тепловыми свойствами, аналогичными свойствам проводника. Проводящие слои могут быть снабжены изоляцией, связанной с изоляцией, нанесенной на проводники.

Предпочтительно использовать кабели круглого поперечного сечения. Для достижения лучшей плотности упаковки, помимо прочего, можно использовать кабели с различным поперечным сечением. Для создания напряжения во вращающейся электрической машине кабель выполнен в виде нескольких последовательных витков в пазах в магнитном сердечнике. Для уменьшения числа пересечений торцевых концов обмотки она может быть выполнена в виде многослойной концентрической кабельной обмотки. Для лучшего использования магнитного

сердечника кабель может быть выполнен с сужающейся изоляцией, при этом форма пазов может быть приспособлена для сужающейся изоляции обмотки.

Существенным преимуществом вращающейся электрической машины, выполненной согласно изобретению, является то, что в области торцевых концов обмотки снаружи внешнего проводника электрическое поле близко к нулю и если внешняя оболочка находится под потенциалом земли, то электрическое поле не нужно контролировать. Это означает, что не возникнет концентрации поля ни в пределах листов, ни в области торцевых концов, ни в переходных областях между ними.

Кроме того, настоящее изобретение относится к способу изготовления магнитной цепи и, в частности, обмотки. Способ изготовления включает размещение обмотки в пазах путем продевания кабеля в отверстия в пазах магнитного сердечника. Поскольку кабель является гибким, это можно сделать, разместив отрезок кабеля в нескольких витках катушки. В результате торцевые концы обмотки будут состоять из изогнутых зон кабеля. Кроме того, кабель может быть подсоединен так, что его свойства остаются постоянными по всей длине. Этот способ позволяет сделать значительные упрощения по сравнению с известными. Так называемые стержни Ребея не являются гибкими, им нужно заранее придать требуемую форму. Сегодня пропитка катушек также является чрезвычайно сложной и дорогой процедурой при производстве известных вращающихся электрических машин.

Это достигается с помощью изолированного проводника для высоковольтных обмоток во вращающихся электрических машинах, выполненном согласно п.1 формулы изобретения, а также с помощью вращающихся электрических машин, использующих изолированный проводник, описанный выше и выполненный согласно п.7 формулы изобретения. Высоковольтный кабель, выполненный согласно настоящему изобретению, содержит одну или более жил, окруженных первым проводящим слоем. Этот первый проводящий слой, в свою очередь, окружен первым изолирующим слоем, который окружен вторым проводящим слоем. Этот второй проводящий слой заземлен, по меньшей мере, в двух различных точках вдоль высоковольтного кабеля, т.е. на входе и выходе статора. Вторым проводящим слоем имеет такое удельное сопротивление, которое, с одной стороны, уменьшает электрические потери в нем, и, с другой стороны, вносит вклад в напряжение, индуцируемое во втором проводящем слое, уменьшая опасность возникновения тлеющих разрядов.

Согласно изобретению создан вышеописанный высоковольтный кабель, в котором можно избежать электрических потерь, обусловленных индуцированными напряжениями

во внешнем проводящем слое. Также создан высоковольтный кабель, в котором уменьшена опасность возникновения электрических разрядов. Кроме того, этот кабель прост в изготовлении.

Изобретение будет объяснено более подробно в последующем описании предпочтительных вариантов его выполнения с сопровождающими чертежами.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 показано поперечное сечение высоковольтного кабеля, выполненного согласно настоящему изобретению;

на фиг. 2 - основная диаграмма, поясняющая факторы, которые влияют на напряжение между проводящей поверхностью и землей; и

на фиг. 3 - график, иллюстрирующий зависимость потенциала на проводящей поверхности от расстояния между точками заземления.

Подробное описание предпочтительных вариантов выполнения изобретения

На фиг. 1 показано поперечное сечение высоковольтного кабеля 10, выполненного согласно настоящему изобретению. Высоковольтный кабель 10 содержит проводник электрического тока, который может состоять из одной или более жил 12 из меди, имеющих, например, круглое поперечное сечение. Эти жилы 12 размещены в середине высоковольтного кабеля 10. Вокруг жил 12 имеется первый проводящий слой 14, а вокруг первого проводящего слоя 14 имеется первый изолирующий слой 16, например, из полиэтилена с межмолекулярными связями. Вокруг первого изолирующего слоя 16 имеется второй проводящий слой 18.

На фиг. 2 показана основная диаграмма, поясняющая факторы, которые влияют на напряжение между проводящей поверхностью и землей. Результирующее напряжение U_S между поверхностью второго проводящего слоя 18 и землей может быть выражено следующим образом:

$$U_S = \sqrt{U_{\max}^2 + U_{\text{ind}}^2} \quad (1),$$

где $U_{\max}$ обусловлено емкостным током на поверхности, а U_{ind} - напряжение, индуцированное магнитным потоком. Для того чтобы не было поверхностных разрядов, U_S должно быть меньше 250 В, а предпочтительно $U_S < 130-150$ В.

В принципе, U_{ind} не создает никаких проблем, если оба конца статора заземлены. Таким образом, $U_S \approx U_{\max}$, где величина максимального напряжения $U_{\max}$ в середине проводника дается выражением:

$$U_{\max} \approx (2 \pi f C_1 U_f)^2 \frac{\rho_s l^2}{A_s},$$

где f - частота, C_1 - поперечная емкость на единицу длины, U_f - напряжение между фазой и землей, ρ_s - удельное сопротивление проводящего слоя 18, A_s - относительная площадь поперечного сечения проводящего слоя 18 и l - длина статора.

Один из путей предотвращения потерь, обусловленных индуцированным напряжением во втором проводящем слое 18, состоит в том, чтобы увеличить его сопротивление. Так как по техническим причинам, связанным с изготовлением кабеля и статора, толщина слоя не может быть уменьшена, сопротивление может быть увеличено путем выбора покрытия или состава, имеющих более высокое удельное сопротивление.

Если удельное сопротивление слишком возрастет, напряжение на втором проводящем слое 18 посередине между заземленными точками (т.е. внутри статора) будет настолько высоко, что появится опасность тлеющего разряда и, следовательно, разрушения проводников и изоляции.

Поэтому удельное сопротивление ρ_s второго проводящего слоя 18 должно лежать в пределах интервала:

$$\rho_{\min} < \rho_s < \rho_{\max} \quad (2),$$

где $\rho_{\min}$ определяется допустимыми потерями мощности, обусловленными потерями за счет токов Фуко и резистивными потерями, обусловленными U_{ind} . $\rho_{\max}$ определяется из условия отсутствия тлеющего разряда.

Эксперименты показали, что удельное сопротивление ρ_s второго проводящего слоя 18 должно быть между 10 и 500 Ом-см. Для получения хороших результатов для машин всех размеров ρ_s должно быть между 50 и 100 Ом-см.

На фиг. 3 показан график, иллюстрирующий зависимость потенциала на проводящей поверхности от расстояния между точками заземления.

Примером подходящего проводящего слоя 18 является слой из каучука на основе сополимера этилена, пропилена и диенового мономера, смешанного с углеродной сажей. Удельное сопротивление можно задать, изменяя тип основного полимера и/или изменяя тип углеродной сажи и/или долю содержания углеродной сажи.

Ниже приведено несколько примеров различных величин удельного сопротивления, полученных при использовании различных смесей основного полимера и углеродной сажи.

Основной полимер	Тип углеродной сажи	Доля углеродной сажи, %	Удельное сопротивление, Ом-см
Сополимер этилен винил-ацетата/нитрильный каучук	углеродная сажа ЕС	прибл. 15	350-400

"-	углеродная сажа Р	прибл. 37	70-10
"-	экстрапроводящая углеродная сажа, тип I	прибл. 35	40-50
"-	экстрапроводящая углеродная сажа, тип II	прибл. 33	30-60
Полиэтилен, привитой бутилкаучуком	"-	прибл. 25	7-10
Сополимер этиленбутил-акрилата	ацетиленовая углеродная сажа	прибл. 35	40-50
"-	углеродная сажа Р	прибл. 38	5-10
Этиленпропиленовый каучук	экстрапроводящая углеродная сажа	прибл. 35	200-400

Изобретение не ограничено описанными вариантами его выполнения. Возможны различные изменения в рамках формулы изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Изолированный проводник (10) для высоковольтных обмоток в электрических машинах, который содержит одну или более жил (12), внутренний первый проводящий слой (14), окружающий жилы (12), первый изолирующий слой (16), окружающий первый внутренний проводящий слой (14), и внешний второй проводящий слой (18), окружающий первый изолирующий слой (16), а удельное сопротивление второго проводящего слоя (18) лежит между 10 и 500 Ом·см.

2. Изолированный проводник (10) по п.1, отличающийся тем, что проводящий слой (18) заземлен, по меньшей мере, в двух различных точках вдоль изолированного проводника (10).

3. Изолированный проводник (10) по п.2, отличающийся тем, что удельное сопротивление второго проводящего слоя (18) меньше, чем удельное сопротивление указанного изолирующего слоя (16), но выше, чем удельное сопротивление материала, из которого изготовлены жилы (12).

4. Изолированный проводник (10) по п.3, отличающийся тем, что удельное сопротивление второго проводящего слоя (18) лежит между 50 и 100 Ом·см.

5. Изолированный проводник (10) по п.1, отличающийся тем, что сопротивление на единицу длины второго проводящего слоя (18) лежит между 5 и 50000 Ом/м.

6. Изолированный проводник (10) по п.1, отличающийся тем, что сопротивление на единицу длины второго проводящего слоя (18) лежит между 500 и 25000 Ом/м.

7. Изолированный проводник (10) по п.1, отличающийся тем, что сопротивление на единицу длины второго проводящего слоя (18) лежит между 2500 и 5000 Ом/м.

8. Изолированный проводник (10) по одному из пп.1-7, отличающийся тем, что удельное сопротивление второго проводящего слоя (18) задано изменением типа основного полиме-

ра и изменением типа и доли содержания углеродной сажи.

9. Изолированный проводник (10) по п.7, отличающийся тем, что основной полимер выбран из сополимеров этиленбутилакрилата этиленпропиленового каучука.

10. Изолированный проводник (10) по п.7 или 8, отличающийся тем, что материал второго проводящего слоя (18) поперечно связан перексидом.

11. Изолированный проводник (10) по одному из пп.1-10, отличающийся тем, что адгезия между изолирующим слоем (16) и вторым проводящим слоем (18) имеет величину того же порядка, что и внутренняя прочность изолирующего материала.

12. Изолированный проводник (10) по одному из пп.1-11, отличающийся тем, что первый проводящий слой (14), изолирующий слой (16) и второй проводящий слой (18) нанесены на проводящие жилы (12) путем экструзии.

13. Изолированный проводник (10) по п.11, отличающийся тем, что все слои нанесены путем экструзии через многослойную головку.

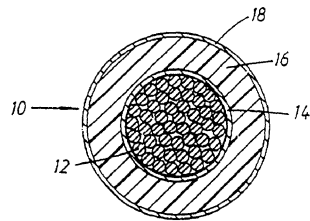
14. Изолированный проводник (10) по одному из пп.1-13, отличающийся тем, что изолирующий слой (16) выполнен из полиэтилена с межмолекулярными связями.

15. Изолированный проводник (10) по одному из пп.1-14, отличающийся тем, что изолирующий слой (16) выполнен из этиленпропиленового каучука или силиконового каучука.

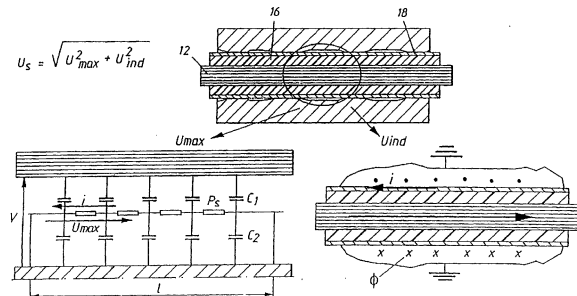
16. Изолированный проводник (10) по одному из пп.1-15, отличающийся тем, что изолирующий слой (16) выполнен из термопластического материала, например полиэтилена низкой плотности, полиэтилена высокой плотности, полипропилена, полибутилена и полиметилпентена.

17. Электрическая машина, содержащая изолированный проводник, выполненный по одному из пп.1-16.

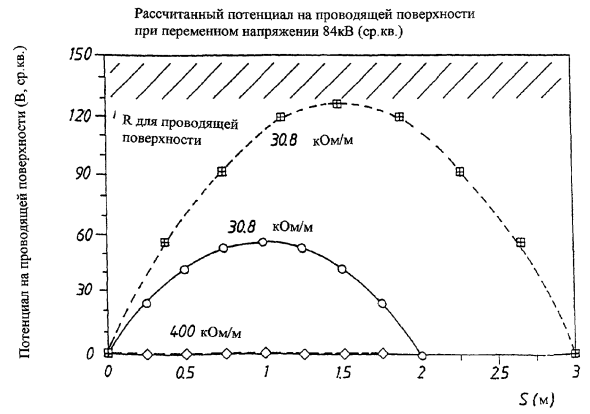
18. Вращающаяся электрическая машина, содержащая изолированный проводник, выполненный по одному из пп.1-16.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

