



УКРАЇНА

(19) UA (11) 29685 (13) A

(51) 6 H02K15/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту(54) СПОСІБ КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТКИ РОТОРА З РІДИННИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ
МАШИНИ

(21) 96104107

(22) 29.10.1996

(24) 15.11.2000

(33) UA

(46) 15.11.2000, Бюл. № 6, 2000 р.

(72) Хаймович Лев Львович, Черемісов Іван Якович, Ліцов Володимир Іванович

(73) НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ, ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ І ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ ВАЖКОГО ЕЛЕКТРОМАШИНОБУДУВАННЯ

(57) 1. Способ контроля изоляции обмотки ротора с жидкостным охлаждением электрической машины, включающий в себя отсоединение обмотки от корпуса машины на время проведения измерения сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса и испытание ее на электрическую прочность подачей соответствующего напряжения между обмоткой и валом ротора, **отличающийся** тем, что отсоединение обмотки от корпуса осуществляется электрически путем повышения сопротивления изоляции втулок водоподвода, для чего ротор устанавливают под углом к горизонту, приподнимая тот его конец, со стороны которого расположены коллекторы подачи и слива воды, сливают воду и снижают уровень остатков воды во втулках водоподвода, сушат внутреннюю поверхность втулок на части той их длины, которая освободилась от воды после опускания водяного столба, причем угол подъема ротора выбирают в зависимости от оставшегося объема воды в обмотке в пределах "от больше нуля градусов до меньше или равно 90 градусов" таким, чтобы уровень воды во втулках опустился до положения, при котором в процессе измерения при заземлении вала ротора и подаче напряжения на обмотку будет достигнуто сопротивление изоляции обмотки ротора, соответствующее электрическому отключению обмотки от корпуса и составляющее его величину не ниже минимально допустимой по нормам на со-

противление изоляции, принятым для изоляции ротора с газовым охлаждением, после чего проводят испытание изоляции повышенным напряжением без циркуляции дистиллята в обмотке по методикам и нормам, принятым для обмотки с газовым охлаждением.

2. Способ контроля изоляции обмотки ротора с жидкостным охлаждением электрической машины по п. 1, **отличающийся** тем, что проводят чистку и контроль каждой втулки водоподвода, для чего на обмотку и вал ротора накладывают заземление, вводят внутрь втулок электрод с изолированным выводом, плотно прилегающий к их внутренней боковой поверхности, на глубину не превышающую половины длины освободившегося от воды участка втулки, образуя по обе стороны от электрода в направлении внешнего торца втулки и в направлении обмотки электрически равнопрочные промежутки, подают контрольное напряжение между электродом и заземленными обмоткой и валом ротора и проверяют получаемые при этом параметры диэлектрических промежутков, причем чистку и контроль проводят до тех пор, пока в каждом из них будут достигнуты наперед заданные параметры, соответствующие электрическому отключению обмотки от корпуса вдоль них с сопротивлением изоляции не ниже одной четвертой части величины минимально допустимого по нормам сопротивления изоляции собственно обмотки, умноженной на число втулок, и выдерживаемым напряжением не ниже половины ожидаемого испытательного напряжения изоляции обмотки, затем удаляют из втулок электроды, снимают заземление с обмотки, проводят измерение сопротивления изоляции ротора и при удовлетворительном его значении, соответствующем электрическому отключению обмотки от корпуса, проводят испытание изоляции повышенным напряжением без циркуляции дистиллята.

Изобретение относится к крупному электромашиностроению и может быть использовано при определении состояния изоляции обмотки ротора турбогенератора, охлаждаемой жидкостью.

Ротор с водяным охлаждением обмотки состоит из двух гидравлически и электрически свя-

занных конструктивных узлов - обмотки возбуждения и водоподвода.

При приложении к обмотке напряжения токи утечки в изоляции ротора с водяным охлаждением идут от обмотки по двум параллельным путям: по изоляции собственно обмотки на заземленный

(19) UA (11) 29685 (13) A

вал (корпус) ротора и по изоляции подающих и сливных втулок на заземленные подающий и сливной коллекторы водоподвода. Выделить непосредственным измерением каждый из этих токов утечки, т.е. ток через изоляцию собственно обмотки и ток через изоляцию втулок, не представляется возможным. В соответствии с этим сопротивление изоляции собственно обмотки и сопротивление изоляции водоподвода подключены относительно корпуса параллельно, и измерить непосредственно величину сопротивления каждой из этих ветвей тоже невозможно по условиям особенностей параллельной схемы их электрического соединения.

Водоподвод при этом играет роль своеобразной электрической перемычки, соединяющей обмотку с заземленным корпусом (валом) ротора. При относительно стабильном всегда высокоомном значении сопротивления изоляции собственно обмотки сопротивление этой перемычки непостоянно: оно зависит от состояния системы охлаждения (до заполнения дистиллятом, в заполненном виде и после слива дистиллята) и изменяется в диапазоне от сотен тысяч мегаом до десятков килоом, т.е. практически от бесконечности до нуля. Наличие такой перемычки между обмоткой и заземленным корпусом затрудняет или делает невозможным измерение сопротивления изоляции собственно обмотки ротора.

При контроле изоляции весьма важно точно определить отдельно состояние изоляции каждого из узлов ротора - собственно обмотки и водоподвода. В случае повреждения изоляции ротора необходимо четко выявить где оно расположено - в обмотке или в водоподводе, - так как от места нахождения повреждения зависит объем ремонтных работ по восстановлению изоляции. В первом случае необходима полная разборка турбогенератора с выводом ротора из статора и его частичной переметкой, во втором случае ремонт ограничивается лишь разгерметизацией коллектора и заменой поврежденной втулки без разборки генератора. Ошибка в выявлении места повреждения изоляции может привести к необоснованному длительному останову генератора и неоправданным материальным потерям. В связи с этим для повышения достоверности диагностики состояния изоляции ротора с водяным охлаждением преимущественное внимание уделяется прежде всего разработке способов контроля изоляции собственно обмотки.

Известен способ контроля изоляции обмотки ротора с жидкостным охлаждением электрической машины до заполнения системы охлаждения дистиллятом при сухих втулках водоподвода, когда обе составляющие сопротивления изоляции ротора - и обмотки и водоподвода, - а значит и результирующее полное сопротивление являются высокоомными, причем сопротивление изоляции водоподвода получается на 2...3 порядка выше сопротивления нормального состояния изоляции собственно обмотки. В этом случае измерение сопротивления изоляции и испытание ее на электрическую прочность относительно корпуса машины и между обмотками следует проводить поочередно для каждой цепи, имеющей отдельные выводы, при электрическом соединении всех прочих

цепей с корпусом машины; измерение сопротивления изоляции обмоток трехфазного тока, наглухо сопряженных в звезду или треугольник, производится для всей обмотки по отношению к корпусу, т.е. используется способ измерения сопротивления изоляции, применяемый для обмоток с газовым охлаждением (Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. ГОСТ 11828-86, п. 6.3, абзацы 1 и 2; п. 7.6, абзац 2). При этом диагностика состояния изоляции ротора с водяным охлаждением осуществляется по тем же критериям, которые приняты для роторов с газовым охлаждением: при нормальном состоянии сопротивление должно быть высокоомным, при поврежденном - низкоомным.

Испытание изоляции собственно обмотки на электрическую прочность при сухих втулках до первого заполнения системы охлаждения дистиллятом, когда и обмотка и водоподвод представляют собой единое высокоомное и высоковольтное целое, т.е. обмотка еще электрически не соединена с корпусом машины, осуществляется также, как и изоляции обмотки роторов с газовым охлаждением целиком или пофазно.

Недостаток такого способа контроля изоляции обмотки состоит в том, что его можно применить только до заполнения системы охлаждения дистиллятом, т.е. только в процессе изготовления турбогенератора.

В двух других состояниях системы охлаждения - после заполнения дистиллятом и после слива его - этот способ не эффективен, так как при наличии низкоомной перемычки, шунтирующей контролируемое сопротивление изоляции собственно обмотки, в этих случаях измеряется килоомное сопротивление шунта вместо мегаомного сопротивления изоляции обмотки, и получить достоверную информацию о ее действительном состоянии не представляется возможным. К тому же из-за опасности повреждения мокрых втулок водоподвода испытание изоляции обмотки ротора на электрическую прочность по этому способу без заполнения ее циркулирующей охлаждающей жидкостью не допускается.

Известен способ контроля изоляции обмотки ротора (Ас. СССР № 1167549 МКИ: С01Р31/12, з. 05.09.1980, опубл. 15.07.1985, БИ № 26. Способ выявления истинного состояния изоляции обмотки ротора с непосредственным жидкостным охлаждением / Л.Л. Хаймович и И.Я. Черемисов и Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. ГОСТ 11828-86, п. 7.4, абзац 4). В соответствии с этим способом при собранном роторе и герметизированной системе охлаждения, заполненной дистиллятом, на время проведения контроля сопротивление изоляции собственно обмотки рассматривается как неизменная "твердая" составляющая полного сопротивления, а сопротивление изоляции водоподвода - как его переменная "жидкая" составляющая, изменяемая направленно путем введения в водоподвод поочередно дистиллята с различным заданным удельным сопротивлением. Такое поочередное введение дистиллята с различным удельным сопротивлением позволяет по результатам двух заполнений и двух измерений соответственно различающихся двух полных сопротивлений изоляции ро-

тора получить исходные данные для составления системы алгебраических уравнений, связывающей между собой неизвестные искомое сопротивление изоляции собственно обмотки $R_{из}$ и сопротивления изоляции водоподвода $R_{в1}$ и $R_{в2}$ с различной жидкостью в нем, с одной стороны, и известные (предварительно измеренные) значения удельного сопротивления дистиллята ρ_{v1} и ρ_{v2} и соответствующие им полные сопротивления изоляции ротора R_{p1} и R_{p2} , с другой стороны. Решение таким образом составленной системы уравнений, не смотря на содержащиеся в ней низкоомные (килоомные) значения полного сопротивления изоляции ротора R_{p1} и R_{p2} дает как и в роторах с газовым охлаждением величину сопротивления в зависимости от действительного состояния изоляции собственно обмотки $R_{из}$ - мегаомную, если изоляция нормальная, или низкоомную, если изоляция поврежденная.

Анализ соотношения величин "твердой" и "жидкой" составляющих сопротивления изоляции ротора, результирующего полного сопротивления при их параллельном соединении, когда "жидкая" составляющая всегда низкоомна и заведомо мала, показывает, что точность способа зависит от фактической величины измеряемого сопротивления диагностируемой изоляции собственно обмотки ротора. Способ получается более точным при низкоомной "твердой" составляющей, чем при мегаомной ее величине. Поэтому способ является предпочтительным при оценке работоспособности изоляции собственно обмотки, находящейся в критическом состоянии, например, при резком падении ее сопротивления.

Испытание изоляции повышенным напряжением проводится при заполненной дистиллятом обмотке. Во избежание повреждения увлажненной внутренней поверхности втулок токами утечки или вскипания дистиллята во втулках последний должен циркулировать в них. При этом на время испытания изоляции необходимо поддерживать такой расход дистиллята, чтобы обеспечить динамическое тепловое равновесие внутренней поверхности втулки и дистиллята в ней с температурой, не превышающей температуру кипения последнего.

Недостатки рассмотренного способа заключаются в необходимости длительной и дорогостоящей водоподготовки больших объемов дистиллята с требуемыми удельными сопротивлениями, обеспечении циркуляции дистиллята с указанными сопротивлениями при измерениях сопротивления изоляции ротора, и кроме того, контроль этим способом ограничивается только одним случаем состояния системы охлаждения, когда обмотка заполнена дистиллятом.

За прототип принят способ контроля изоляции обмотки ротора, в соответствии с которым проводится измерение сопротивления изоляции и испытание ее, при этом изолированные обмотки и защитные конденсаторы, а также иные устройства, постоянно соединенные с корпусом машины, на время измерения сопротивления их изоляции должны быть отсоединены от корпуса машины (Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. ГОСТ 11828-86, п. 6.3, абзац 3; п. 7.4, абзац 4), что совпадает с признаком

изобретения. При таком отсоединении обмотки от корпуса машины предусматривается полное устранение металлической (гальванической) связи между ними механически, например, путем распыли или разбалчивания контактов и разведения разведенных концов до видимого разрыва с образованием между ними диэлектрического промежутка.

Вышеуказанному условию поддержания высокого электрического сопротивления между отсоединенной обмоткой и корпусом машины соответствует также случай отсоединения, когда в воздушном промежутке между разведенными контактами будет находиться твердый диэлектрик. Этот признак прототипа совпадает с признаком изобретения.

Обмотка ротора с водяным охлаждением в рабочем положении представляется как постоянно соединенная с заземленным корпусом (валом) машины через своеобразную, строго говоря, с ненулевым сопротивлением перемычку - изоляцию втулок водоподвода, поэтому после слива дистиллята и продувки обмотки, когда удастся несколько подсушить внутри мокрые втулки и достичь некоторого повышения сопротивления соединяющей перемычки, соответствующего так называемому неполному или частичному отключению обмотки от корпуса, возможно применение этого способа контроля изоляции обмотки для измерения сопротивления изоляции обмотки. Для повышения сопротивления изоляции водоподвода проводится ее подготовка, включающая в себя частичную его разборку и сушку ротора в печи (в заводских условиях) или нагревом при пропускании тока тока через обмотку (в условиях электростанции).

Как известно, измерение сопротивления изоляции проводится с использованием маломощных (слаботочных) источников напряжения - как правило, мегаомметров на 500...2500 В выпрямленного напряжения, - которые не способны вызвать повреждение изоляции контролируемого объекта при любом ее сопротивлении от нуля до бесконечности, поэтому оно относится к неразрушающим методам испытания. В связи с этим многократное приложение напряжения от мегаомметра при контроле изменения сопротивления изоляции ротора при слежении за процессом сушки до наступления момента частичного или полного отключения обмотки не вызывает повреждения как сухих, так и недостаточно высушенных втулок, и не является опасным. Поэтому необходимым и достаточным условием проведения безопасного и точного измерения сопротивления изоляции обмотки является доведение сопротивления изоляции водоподвода до мегаомного уровня, обеспечивающего по меньшей мере низковольтное электрическое отключение обмотки от корпуса.

Испытание изоляции обмоток на электрическую прочность проводится повышенным напряжением промышленной частоты от специального испытательного трансформатора высокого напряжения. Мощность его должна быть достаточной, чтобы при испытательном напряжении во время выдержки вызывать пробой ослабленной изоляции или перекрытие ее скользящими разрядами и тем самым выявить места, где уровень электриче-

ской прочности изоляции оказывается ниже заданного нормированного значения испытательного напряжения. Так как при пробое или перекрытии электрическим разрядом происходит, как правило, повреждение изоляции, то испытание на электрическую прочность относится к так называемым разрушающим методам испытания. Поэтому для проведения испытания изоляции обмотки ротора на электрическую прочность повышение сопротивления изоляции водоподвода до отключающего низковольтного состояния, как и при измерении сопротивления изоляции, является необходимым, но недостаточным условием, так как при подаче испытательного напряжения может произойти перекрытие от обмотки на заземленный коллектор вдоль внутренней поверхности тех втулок, которые при сушке высоковольтно не отключились и получили в результате перекрытия необратимое повреждение токами разряда.

Поэтому обязательным условием проведения испытания изоляции обмотки ротора повышенным напряжением без опасности повреждения изоляции водоподвода является уверенно выполненное высоковольтное отключение обмотки от корпуса по каждой из его втулок. В связи с этим после измерения сопротивления изоляции испытание ее повышенным напряжением после слива дистиллята не проводится, и для его выполнения обмотку опять герметизируют, заполняют дистиллятом и организуют циркуляцию его с требуемым расходом так же, как и в предыдущем аналоге.

К недостатку измерения сопротивления изоляции в прототипе относится то, что при обычном горизонтальном положении ротора достигаемое повышение сопротивления изоляции втулок в процессе сушки и по ее завершению носит неустойчивый характер и, как следствие, не позволяет осуществить надежное отключение обмотки от корпуса машины и уверенно провести измерение сопротивления изоляции обмотки ротора. Это связано с тем, что обмотка имеет сложную трехмерную разветвленную геометрическую конфигурацию сети спиральных аксиально-радиально расположенных параллельно соединенных каналов и такую большую их протяженность, по сравнению с размерами поперечного сечения, что растекание жидкости в них становится подобным поведению ее в капиллярных каналах, т.е. начинают сказываться силы поверхностного натяжения, ограничивающие текучесть жидкости и нарушающие свободное растекание ее обмотке по правилам сообщающихся сосудов под воздействием силы тяжести. Из-за названных особенностей сети охлаждения самопроизвольное полное истечение жидкости из ротора исключено, и полностью удалить воду из ротора не удастся даже при продувке, вакумировании и сушке обмотки ротора.

Остатки воды, будучи в состоянии неустойчивого равновесия, самопроизвольно растекаются в каналах, хаотично распределяясь по виткам обмотки и в том числе по втулкам водоподвода. Попадание даже ничтожного количества воды хотя бы в одну из высушенных втулок сводит на нет сушку и подготовку ротора к диагностике: смачивание втулки возвращает ее сопротивление от достигнутого сухого мегаомного к исходному мокрому килоомному значению и приводит к соедине-

нию отсоединенной при сушке обмотки с корпусом, теряя при этом достигнутую ранее возможность проведения точного измерения сопротивления изоляции собственно обмотки. Стабилизировать достигнутое при сушке высокомегаомное сопротивление изоляции водоподвода и отключить обмотку от корпуса машины таким образом не возможно. Отсюда и требование проводить испытания изоляции обмотки ротора при заполненной системе охлаждения, что значительно усложняет и делает более длительным процесс контроля изоляции обмотки.

В основу изобретения поставлена задача усовершенствования способа контроля изоляции обмотки ротора с жидкостным охлаждением путем создания в каждой параллельной гидравлической цепи охлаждения условий для надежного и стабильного электрического отключения обмотки от корпуса машины и образования высокомегаомного и высоковольтного электрически прочного диэлектрического промежутка в каждой изоляционной втулке водоподвода, что обеспечит повышение точности, сократит время и упростит проведение процесса диагностики состояния изоляции обмотки.

Решение поставленной задачи достигается тем, что в способе контроля изоляции обмотки ротора с жидкостным охлаждением электрической машины, включающем в себя отсоединение обмотки от корпуса машины на время проведения измерения сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса и испытание ее на электрическую прочность подачей соответствующего напряжения между обмоткой и валом ротора, согласно изобретению, отсоединение обмотки от корпуса осуществляют электрически путем повышения сопротивления изоляции втулок водоподвода, для чего ротор устанавливают под углом к горизонту, приподнимая тот его конец, со стороны которого расположены коллекторы подачи и слива воды, сливают воду и снижают уровень остатков воды во втулках водоподвода, сушат внутреннюю поверхность втулок на части той их длины, которая освободилась от воды после опускания водяного столба, причем угол подъема ротора выбирают в зависимости от оставшегося объема воды в обмотке в пределах "от больше нуля градусов до меньше или равно 90 градусов" таким, чтобы уровень воды во втулках опустился до положения, при котором в процессе измерения при заземлении вала ротора и подаче напряжения на обмотку будет достигнуто сопротивление изоляции обмотки ротора, соответствующее электрическому отключению обмотки от корпуса и составляющее его величину не ниже минимально допустимой по нормам на сопротивление изоляции, принятым для изоляции ротора с газовым охлаждением, после чего проводят испытание изоляции повышенным напряжением без циркуляции дистиллята в обмотке по методикам и нормам, принятым для обмотки с газовым охлаждением. При необходимости проводят чистку и контроль каждой втулки водоподвода, для чего на обмотку и вал ротора накладывают заземление, вводят внутрь втулок электрод с изолированным выводом, плотно прилегающий к их внутренней боковой поверхности, на глубину не превышающую половины длины освобожденного

от воды участка втулки, образуя по обе стороны от электрода в направлении внешнего торца втулки и в направлении обмотки электрически равнопрочные промежутки, подают контрольное напряжение между электродом и заземленными обмоткой и валом ротора и проверяют получаемые при этом параметры диэлектрических промежутков, причем чистку и контроль проводят до тех пор, пока в каждом из них будут достигнуты наперед заданные параметры, соответствующие электрическому отключению обмотки от корпуса вдоль них с сопротивлением изоляции не ниже одной четвертой части величины минимально допустимого по нормам сопротивления изоляции собственно обмотки, умноженной на число втулок, и выдерживаемым напряжением не ниже половины ожидаемого испытательного напряжения изоляции обмотки, затем удаляют из втулок электроды, снимают заземление с обмотки, проводят изменение сопротивления изоляции ротора и при удовлетворительном его значении, соответствующем электрическому отключению обмотки от корпуса, проводят испытание изоляции повышенным напряжением без циркуляции дистиллята.

Таким образом,

- установка ротора в наклонно положение дает наиболее простую по исполнению возможность уверенной естественной эвакуации дистиллята из изоляционных втулок водоподвода самотеком, предотвращает возможность самопроизвольного истекания остатков воды из обмотки во втулки водоподвода в процессе их чистки и тем самым позволяет обеспечить заведомо более высокие, чем при горизонтальном положении ротора уровень и стабильность параметров изоляции водоподвода - сопротивления и электрической прочности - по сравнению с параметрами параллельно соединенной с ней контролируемой изоляции собственно обмотки ротора;

- отсоединение обмотки от корпуса достигается электрически отключением обмотки от заземленных коллекторов без демонтажа и выемки втулок водоподвода с сохранением гидроплотности предварительно испытанных перед контролем изоляции обмотки гидравлических соединений втулок водоподвода с обмоткой и коллекторами, что позволяет сократить время на проведение диагностики и ускорить процессы изготовления, монтажа, ремонта и введение машины в эксплуатацию;

- введение контроля процесса очистки втулок водоподвода и доведения параметров их изоляции до заданного уровня с высокой степенью точности, соответствующего высоковольтному электрическому отключению обмотки от корпуса, позволяет уверенно определить истинное сопротивление изоляции собственно обмотки ротора с водяным охлаждением и безопасно провести испытание ее повышенным напряжением;

- исключение потребности в заполнении и циркуляции дистиллята в обмотке и проведение испытаний обычными широко известными способами, как и изоляции ротора с газовым охлаждением, предельно упрощает подготовку и выполнение испытания изоляции обмотки ротора с водяным охлаждением повышенным напряжением на электрическую прочность.

Возможность реализации предлагаемого изобретения поясняется примером и чертежами.

На фиг. 1 изображен ротор турбогенератора с водяным охлаждением обмотки в наклонном положении при проведении диагностики изоляции.

На фиг. 2 показана втулка водоподвода в наклонном положении с введенным в нее измерительным электродом.

На фиг. 3 представлена электрическая схема замещения изоляции отдельной втулки в рабочем состоянии.

На фиг. 4 изображена полная электрическая схема замещения изоляции ротора в рабочем состоянии.

На фиг. 5 показана электрическая схема замещения изоляции отдельной втулки при проведении диагностики.

На фиг. 6 представлена полная схема замещения изоляции ротора при проведении диагностики изоляций обмотки.

На фиг. 7 изображена электрическая схема измерения и испытания поверхностной изоляции втулки в наклонном положении при подготовке к диагностике.

Конструктивно изоляция ротора с водяным охлаждением (фиг. 1, для простоты показана одна параллельная ветвь охлаждения) выполняется у обмотки 1 в виде стеклослюдинитовых гильз 2, установленных в пазах ротора между стенками паза и катушками обмотки, а у водоподвода в виде изоляционных втулок 3 из стеклотекстолита или фторопласта, врезанных в каждую независимую ветвь охлаждения обмотки на входе и выходе охлаждающей воды и установленных параллельно продольной оси ротора в напорном 4 и сливном 5 коллекторах соответственно.

Втулки водоподвода 3 (фиг. 2) служат для гидравлического соединения и электрического разъединения находящейся под напряжением обмотки 1 ротора от расположенных на валу 6 заземленных коллекторов подачи 4 и слива 5 воды. Каждая изоляционная втулка имеет гидроплотные соединения с одной стороны с обмоткой и с другой - с коллектором подачи или слива воды. Уплотнение втулки с обмоткой осуществляется с помощью самоуплотняющихся резиновых колец 7, установленных в кольцевых канавках внутри втулки, в которые плотно входит неизолированный конец штуцера 8 гидравлической ветви обмотки. Канавки отстоят от торца втулки на расстоянии, обеспечивающем требуемый по сопротивлению и электрической прочности сухой диэлектрический промежуток 9 вдоль внутренней поверхности хвостовика втулки 3 между неизолированным концом штуцера 8 и телом заземленного вала 6 ротора. Снаружи в каждой втулке также в кольцевых проточках расположены резиновые самоуплотняющиеся кольца 10, с помощью которых она уплотняется при установке в задней стенке коллектора. От осевых перемещений каждая втулка удерживается гидроплотной заглушкой 11 с резиновыми самоуплотняющимися кольцами 12 в канавках, установленной в передней стенке коллектора в упор с торцом втулки. В изоляционных втулках циркулирует охлаждающая обмотку химически очищенная дистиллированная вода - дистиллят 13.

Таким образом, каждая изоляционная втулка в рабочем положении расположена в электропроводящей среде - снаружи окружена заземленными металлическими телами ротора и коллекторов, - внутри заполнена дистиллятом с большей или меньшей электропроводностью, электрически соединена с одной стороны с обмоткой, находящейся под напряжением, а с другой - с заземленным коллектором. При таком положении втулка должна выполнять изоляционные функции по трем путям: в осевом направлении внутри втулки на электрической длине от торца штуцера обмотки 8 в сторону коллекторов 4 и 5 по двум параллельным цепочкам - по столбу заполняющего втулку дистиллята 13 и по внутренней поверхности втулки 14 - и в противоположную сторону от торца изоляции штуцера 8 обмотки к валу ротора 6 - вдоль сухой внутренней поверхности хвостовика втулки 9, - а также в радиальном направлении между боковой цилиндрической поверхностью столба жидкости 13 и валом ротора 6 - по толщине изоляции 15 втулки.

Изоляция втулки в электрической схеме замещения (фиг. 3) в соответствии с этими направлениями характеризуется четырьмя составляющими ее сопротивления: одной "жидкой" тангенциальной составляющей - сопротивлением столба жидкости во втулке $g_{ж}$ и тремя "твердыми" составляющими: двумя тангенциальными составляющими - сопротивлением внутренней поверхности втулки g_r , контактирующей с жидкостью, и сопротивлением внутренней поверхности хвостовика втулки за пределами водяного столба $g_{хв}$ со стороны обмотки, а также одной радиальной составляющей - сопротивлением втулки по толщине стенки ее g_t . Так как сопротивление изоляции собственно обмотки и сопротивление изоляции втулок водоподвода при писанном выше конструктивном исполнении ротора соединены относительно корпуса параллельно, то напряжение, приложенное к изоляции обмотки - рабочее, контрольное, испытательное, - полностью прикладывается также и к изоляции водоподвода. В связи с этим каждая составляющая изоляции втулки характеризуется, кроме величины сопротивления, еще и способностью выдерживать любое из выше названных напряжений, приложенных к изоляции обмотки ротора. Напряжение возбуждения обмотки ротора турбогенераторов составляет обычно 300...500 В; испытательное напряжение изоляции готового ротора находится в интервале от 5000 В после изготовления турбогенератора до 1000 В при вводе и в процессе эксплуатации. При подаче рабочего и особенно испытательного напряжения на обмотку во избежание повреждения внутренней поверхности втулки токами утечки при ее увлажненном состоянии или вскипания дистиллята, находящегося во втулках, последний, как сказано выше, должен циркулировать с определенным расходом.

В электрической схеме замещения изоляции отдельной втулки в рабочем положении ротора (фиг. 3) все составляющие ее сопротивления между обмоткой и заземленными валом и коллекторами соединены параллельно. В полной электрической схеме замещения изоляции ротора с водяным охлаждением (фиг. 4) все составляющие со-

противления изоляции всех N втулок водоподвода, т.е. сопротивление изоляции водоподвода ротора 16, и сопротивление изоляции токоведущей части обмотки с сопротивлением изоляции внутренней поверхности хвостовиков всех N втулок, т.е. сопротивление изоляции собственно обмотки 17, также соединены параллельно. При собранном роторе в такой замкнутой системе сопротивлений ни одну из составляющих сопротивления изоляции водоподвода, и сопротивление изоляции собственно обмотки ротора измерить отдельно не представляется возможным. В этом случае можно измерить только полное сопротивление изоляции ротора, т.е. сопротивление всех параллельно соединенных элементов изоляции водоподвода и обмотки, и его измеренная величина, как отмечалось выше, будет меньше наименьшего значения сопротивления из всех составляющих, входящих в состав измеряемой цепи.

Величина сопротивления изоляции собственно обмотки и значения шунтирующих его сопротивлений изоляции многочисленных втулок водоподвода сильно зависят от целого ряда конструктивных и эксплуатационных факторов, влияние которых проявляется прежде всего на величинах составляющих сопротивлений и их изменении.

Сопротивление изоляции собственно обмотки $R_{из}$ является многофакторным параметром; оно зависит от площади изолированной поверхности обмотки, толщины изоляции, температуры, степени увлажнения и загрязнения и т.п. и по опыту роторов с газовым охлаждением находится в интервале 50...1000 МОм. Основная забота эксплуатационного персонала электростанции поддерживать его на этом считающемся стабильным высоким уровне.

Сопротивление изоляции водоподвода $R_{вп}$ определяется состоянием изоляционных втулок его. У втулки водоподвода наиболее стабильной и наиболее высокоомной - мегаомной - является радиальная составляющая изоляции g . Ее величина определяется только материалом (стеклотекстолит или фторопласт) и толщиной стенки втулки, практически не зависит от эксплуатационных факторов, обычно превышает 1000 МОм и может быть снижена только при механическом повреждении стенки и проникновении в трещину, прокол и т.п. дистиллята, что мало вероятно, так как при этом теряется герметичность втулки.

Из трех тангенциальных составляющих сопротивления изоляции втулки повышенными величинами и стабильностью отличается сопротивление вдоль хвостовика $g_{хв}$ втулки. Оно зависит от длины пути утечки по внутренней поверхности втулки - от места уплотнения штуцера до края хвостовика, т.е. до тела вала ротора, а также от состояния ее поверхности - сухая или увлажненная, чистая или загрязненная и т.п. При сухой и чистой поверхности $g_{хв}$ является мегаомной величиной, превышающей 1000 МОм, при увлажнении и загрязнении она может быть снижена до нескольких килоом. Конструктивно хвостовик втулки не контактирует с охлаждающей водой, и снижение сопротивления его из-за увлажнения может произойти только при утечке дистиллята в случае нарушения гидроплотности соединения "штуцер - втулка". К хвостовой части втулки, как и к основной изоляции

собственно обмотки, для чистки и сушки отдельно добраться невозможно. Эта часть втулок по существу входит в совокупность поверхностной изоляции собственно обмотки, поэтому оценка ее состояния проводится совместно с проверкой изоляции собственно обмотки 17 с использованием методов контроля и критериев последней.

Вторая тангенциальная составляющая r_t характеризует сопротивление втулки вдоль внутренней поверхности, которая после заполнения системы охлаждения непрерывно находится в контакте с водой, будучи смоченной или омываемой ею при циркуляции. Сопротивление r_t зависит от длины пути утечки и от состояния поверхности втулки. Для стабилизации сопротивления в процессе контактирования с водой для втулок применяются материалы с малой гигроскопичностью – стеклотекстолит или фторопласт, - и, кроме того, втулкам изнутри при изготовлении придается глянцевая гидрофобная поверхность. Это исключает глубинное увлажнение втулки по толщине стенки и позволяет после удаления воды и сушки получить сопротивление r_t на уровне исходного значения. У новой втулки в сухом и чистом виде до заполнения водой величина r_t является высокоомной и превышает 1000 МОм, при увлажнении и заполнении дистиллятом она становится низкоомной и снижается до сотен килоом. В процессе эксплуатации внутренняя поверхность втулки может загрязняться и сопротивление снижаться, однако после сушки и чистки ее сопротивление повышается, доходя до сотен-тысяч мегаом. Такая подмеченная особенность восстановления сопротивления изоляции втулок водоподвода легла в основу осуществления предлагаемого способа контроля изоляции обмотки ротора с жидкостным охлаждением.

И, наконец, третья тангенциальная составляющая - сопротивление водяного столба втулки $r_{ж}$ - зависит от длины водяного промежутка l , его поперечного сечения s и удельного объемного сопротивления дистиллята ρ_v и определяется, как для любого проводника, известным соотношением

$$r_{ж} = \rho_v \frac{l}{s},$$

где

$r_{ж}$ - сопротивление водяного столба втулки;

ρ_v - удельное объемное сопротивление дистиллята;

l - длина водяного промежутка;

s - площадь поперечного сечения водяного столба.

Следует отметить, что из трех тангенциальных составляющих сопротивления $r_{хв}$, r_t и $r_{ж}$ меньше всего зависящей от случайных факторов является "жидкая" составляющая. Она определяется неизменяющимися во времени геометрическими размерами втулки и довольно стабильно поддерживаемой в эксплуатации величиной удельного сопротивления дистиллята. Действительно, при обычном колебании удельного сопротивления дистиллята в пределах 100...1000 кОм.см сопротивление водяного промежутка изменяется не более, чем на порядок, в то время как у "твердых" составляющих $r_{хв}$ и r_t , как следует из вышеизложенного, сопротивление изменяется гораздо шире

- в пределах 4...5 порядков. При этом, из-за того, что удельное объемное сопротивление дистиллята $\rho_v=10$ Ом.см значительно ниже удельных объемного и поверхностного сопротивлений твердого диэлектрика - стеклотекстолита и фторопласта, - равных соответственно $\rho_v=10^{11}$ Ом.см и $\rho_s=10^{12}$ Ом, при нормальном состоянии втулки абсолютная величина сопротивления "жидкой" составляющей получается на 5...6 порядков ниже, чем у "твердых" составляющих.

Сравнительный анализ составляющих полного сопротивления изоляции втулки показал, что в исходном состоянии, когда поверхность изоляции втулки еще не загрязнена и отсутствуют течи дистиллята, наименьшее значение сопротивления будет у водяного столба. Однако в дальнейшем в процессе эксплуатации, по мере загрязнения омываемых или смачиваемых дистиллятом поверхностей втулок, их сопротивления уменьшаются и могут оказаться даже ниже остающегося практически неизменным сопротивления водяного промежутка.

Таким образом, при любых изменениях "твердых" тангенциальных составляющих $R_{хв}$ и R_t полного сопротивления изоляции ротора R_p его "жидкая" составляющая $R_{ж}$ остается практически постоянной. Поэтому при такой ее относительной стабильности она вынуждено может быть принята в качестве критерия эксплуатационной нормы полного сопротивления изоляции ротора. От того, какую минимальную абсолютную величину его принять в качестве допустимой, зависит прежде всего электрическая длина втулки l . При выборе размеров втулки и определении эксплуатационной нормы на величину сопротивления изоляции ротора будем исходить из условия нормального состояния втулки, заполненной дистиллятом, т.е. когда "твердые" составляющие ее сопротивления существенно выше "жидкой" и полное сопротивление втулки $r_{вт}$ можно рассматривать равным наименьшей из них - сопротивлению водяного столба $r_{вт}=r_{ж}$. При этом сопротивление водоподвода ротора $R_{вп}$, содержащего в общем случае N втулок, также будет определяться сопротивлением такого же числа параллельно соединенных водяных струй, и его сопротивление будет в N раз меньше сопротивления водяного столба отдельной втулки, т.е.

$$R = \frac{r_{вт}}{N} = \frac{r_{ж}}{N},$$

где

$R_{вп}$ - сопротивление изоляции водоподвода;

$r_{вт}$ - полное сопротивление втулки;

$r_{ж}$ - сопротивление водяного столба втулки;

N - число втулок водоподвода.

В турбогенераторах мощностью 500 МВт с высоконапорной системой водяного охлаждения водоподвод обмотки ротора содержит 20 втулок при двухполюсном и 50 при четырехполюсном исполнении.

Так как в этой системе охлаждения изоляционные втулки водоподвода должны работать при высоком давлении охлаждающей воды (до 25 МПа) в условиях повышенных центробежных нагрузок и вибраций, конструктивно их трудно разместить и закрепить в стесненном пространстве торцевой зоны вращающегося ротора, то габариты втулок вынужденно выбираются минимальны-

ми и обуславливаются не столько электрическими условиями, сколько механической прочностью самих втулок и элементов их крепления. С учетом выполнения гидравлических уплотнений и заделок при соединении с обмоткой и установки в коллекторах конструктивная длина втулок в указанных роторах не превышает 250 мм. При ограниченном выборе современных материалов, приемлемых по диэлектрическим и механическим характеристикам для втулок - стеклотекстолит и фторопласт, - и известных конструктивно-технологических решениях как при изготовлении втулок, так и их установке в роторе, электрическая длина втулок l при удовлетворении условиям механической прочности составляет 50...100 мм. При определении габаритов втулок приоритетными оказались требования по обеспечению механической прочности ротора, поэтому их электрическая длина получилась в 25... 50 раз меньше, чем необходимо для получения требуемой величины сопротивления изоляции водоподвода ($R_{вп} \geq R_{из}$) по условиям координации изоляции для точной электрической диагностики изоляции обмотки.

Поэтому вынужденно, в угоду сохранения механической целостности втулок, полное сопротивление изоляции ротора оказалось у последней черты - на уровне 5...30 кОм, - и контроль изоляции в процессе эксплуатации приходится проводить в соответствии с известным способом (Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. ГОСТ 11828-86, п. 6.3, абзац 1 и 2), ориентируясь на предельное состояние, принятое, например, для настройки уставок релейной защиты в машинах с газовым охлаждением ротора. В этом случае в многоступенчатой системе непрерывного слежения за изменением сопротивления изоляции с переходом на водяное охлаждение осталась еще единственная и последняя возможность соблюсти условия критериальной достаточности - это наименьшая норма, используемая при контроле на предаварийном этапе, осуществляемом средствами релейной защиты.

При слежении за изменением сопротивления изоляции и при настройке релейной защиты в качестве критерия изменяющегося состояния изоляции используется величина диапазона между минимально допустимой эксплуатационной нормой и уставкой. Эффективность защиты повышается с увеличением этого диапазона. При этом уровень сопротивления при любом темпе его снижения должен быть таким, чтобы за время наблюдения за снижением сопротивления в указанном диапазоне, например, от 1 часа до 7 суток как принято в эксплуатации, можно было бы успеть своевременно принять решение об останове генератора, исключив возможность ложного отключения, а настроенная на отключение защита должна сработать задолго до начала развития процесса разрушения. В соответствии с этим защита от замыканий обмотки ротора на "землю" работает в два этапа: вначале ее настраивают на минимальный допустимый эксплуатационный уровень сопротивления изоляции, по достижению которого она выдает сигнал "Земля в роторе", а впоследствии при дальнейшем снижении сопротивления до предельной величины - уставки - ей выдается коман-

да на аварийное отключение и быстрое развозбуждение генератора.

Из изложенного следует, что роторы с газовым охлаждением имеют более широкий диапазон сопротивлений между уставкой и нормальным значением, чем роторы с водяным охлаждением. Поэтому при скоротечности процесса эксплуатационный персонал располагает в первом случае большим промежутком времени на анализ ситуации, а значит и на более надежное принятие решения, чем во втором. При одинаковой уставке релейной защиты на отключение, принимаемой обычно равной 1...2 кОм, минимальные допустимые значения сопротивлений уставки на сигнал "Земля в роторе" в этих случаях резко различаются и составляют в роторах с газовым охлаждением 200 кОм, а в роторах с водяным охлаждением - всего лишь 5...10 кОм, т.е. разница между уставками на сигнал и на отключение в роторах с газовым охлаждением находится в пределах двух порядков и получается более различимой, чем в роторах с водяным охлаждением, где она находится в пределах одного и того же порядка, не превышая нескольких абсолютных единиц сопротивления, и получается практически неразличимой. Сопоставление условий настройки и работы релейной защиты показало, что для роторов с водяным охлаждением турбогенераторов предельных мощностей в качестве нормы на сопротивление изоляции принята величина, воспринимаемая в роторах турбогенераторов малой и средней мощности с газовым охлаждением как предаварийная и требующая, как правило, немедленного останова. В такой ситуации - низкий уровень абсолютного значения нормы, слишком малое различие между нормой и минимально допустимым предельным значением сопротивления изоляции и получаемое при этом весьма ограниченное время на принятие решения - ротор с водяным охлаждением заранее объективно обречен на пониженную эксплуатационную надежность по сравнению с ротором с газовым охлаждением.

Низкий уровень сопротивления и неуверенность в оценке состояния изоляции держит непрерывно в напряженном состоянии эксплуатационный персонал станции: с момента ввода ротора с водяным охлаждением в работу после монтажа или после ремонта и на протяжении всей последующей работы эксплуатация ротора происходит фактически на грани риска.

Таким образом, вынужденное соподчинение размеров изоляционной втулки водоподвода требованиям обеспечения ее механической прочности практически свело на нет возможность удовлетворить электрические требования к изоляции водоподвода и обеспечить уверенное определение сопротивления изоляции собственно обмотки ротора с водяным охлаждением. Выявилось, что диагностика состояния изоляции ротора с водяным охлаждением в конечном счете определяется низким порогом чувствительности релейной защиты (2,5...5 кОм) от замыкания обмотки на "землю", и при минимально допустимом значении сопротивления изоляции - уставке на отключение 2 кОм - эксплуатационная норма оказалась в пределах всего лишь 5...10 кОм.

Отметим, что проведенный анализ возможного изменения сопротивления изоляции водоподвода выполнен в предположении, что изоляционные втулки находятся в нормальном состоянии и "твердые" составляющие сопротивления изоляции водоподвода сохраняют свои исходные высокомегаомные значения. В случае снижения их уровня в процессе эксплуатации из-за возможного загрязнения поверхности изоляции или течей уплотнений у хвостовиков втулок, а также уменьшения удельного сопротивления дистиллята при длительном нахождении в системе охлаждения без циркуляции вследствие окисления стенок каналов трудности в оценке состояния изоляции обмотки ротора усугубляются.

Из описания конструкции водоподвода и его соединения с обмоткой, электрической схемы замещения изоляции водоподвода и обмотки, анализа изменения составляющих сопротивления изоляции ротора следует, что при контроле изоляции обмотки при измерении полного сопротивления изоляции ротора участвуют пять параллельно соединенных сопротивлений: сопротивление собственно обмотки и четыре шунтирующие его составляющие сопротивления изоляции каждой из N втулок водоподвода. При этом многообразии сопротивлений (например, 201 параллельно соединенное сопротивление в четырехполюсном роторе с 50 втулками) с непредсказуемым раскладом их величин, каким бы ни было действительное сопротивление изоляции собственно обмотки ротора, величина измеренного полного сопротивления изоляции ротора также является случайной величиной и находится в пределах от нулевого до бесконечно большого значения. Эта неопределенность в диагностике состояния изоляции в равной мере относится к роторам, находящимся как в статоре в рабочем режиме с дистиллятом в обмотке или без него, при вращении или в статике при профилактике, так и вне статора при монтаже, ремонте, хранении и т.п.

В таких особых практически экстремальных условиях эксплуатации турбогенераторов с водяным охлаждением обмотки ротора, когда под нагрузкой точный контроль изоляции собственно обмотки не возможен, первостепенное значение приобретает диагностика состояния изоляции на останавленном роторе, проводимая при периодических ремонтах, когда после испытаний обмотки на гидроплотность проводится испытание изоляции в полном объеме с точным измерением мегаомного сопротивления изоляции собственно обмотки и последующего испытания ее на электрическую прочность. Получаемая при этом информация о действительном состоянии изоляции должна быть настолько достоверной, чтобы при удовлетворительном ее состоянии при принятых сроках периодичности проведения ремонтов можно было уверенно гарантировать ее надежную эксплуатацию на протяжении всего очередного межремонтного цикла, как это имеет место в практике роторов с газовым охлаждением.

В процессе контроля изоляции ротора необходимо выявить сопротивление и электрическую прочность каждой из его многочисленных составляющих, сопоставить их с допустимыми значениями, соответствующими электрическому отклю-

чению обмоток от корпуса, и в случае их отклонения довести до нормы или заменить. Так как при заполненных дистиллятом втулках обмотки электрически соединены с корпусом машины и эти операции выполнить невозможно, то перед проведением измерения сопротивления и испытания электрической прочности изоляции собственно обмотки ее необходимо электрически отключить от корпуса, для чего из изоляционных втулок следует удалить дистиллят и затем водоподводу следует придать сопротивление и электрическую прочность хотя бы не ниже, чем у изоляции собственно обмотки, соответствующие ее нормальному состоянию.

Для этого ротор устанавливают на разновысокие стойки 18 и 19 с упором опущенного конца вала для предотвращения от осевого перемещения ротора в упорную стойку 20, рассчитанную на недопустимость сдвига ее под действием осевой составляющей силы тяжести ротора при принятом угле наклона к горизонту. При снятых заглушках 11 коллекторов 4 и 5 через открывшиеся отверстия 21 сливают воду из обмотки и втулок каждой параллельной ветви. Воду удаляют до тех пор, пока во втулках уровень оставшейся воды опустится до положения, при котором длина участка втулки, освободившегося от воды, т.е. расстояние от поверхности зеркала воды до торца втулки со стороны коллекторов, станет не меньше длины требуемого сухоразрядного промежутка $l_{\text{сух}}$ 24, способного выдерживать ожидаемое испытательное напряжение изоляции обмотки ротора. Визуальное наблюдение за положением уровня воды во втулках, сушку и очистку внутренней поверхности их осуществляют через отверстие 21.

При наклоне ротора по мере удаления воды из втулок столб жидкости уменьшается, а длина освободившейся от воды внутренней части втулки увеличивается. В это время в частично освобожденной от воды втулке сопротивление сокращающегося столба жидкости $r'_{\text{ж}}$ и контактирующей с ним поверхности втулки r'_t уменьшаются, а сопротивление открывшейся от воды внутренней осушенной поверхности втулки $r'_{\text{сух}}$ возрастает, частично или полностью электрически отключая обмотку от корпуса машины, т.е. $r'_{\text{сух}} = r_{\text{отк}}$.

В схеме замещения сопротивления изоляции полностью заполненной водой втулки взаимосвязанные полное сопротивление столба жидкости $r_{\text{ж}}$ и сопротивление внутренней поверхности втулки r_t между медью обмотки и заземленными коллекторами, как указано выше, соединены параллельно и электрически соединяют обмотку с корпусом машины (фиг. 4). При частично заполненной втулке параллельно соединенные частичные сопротивления этих составляющих $r'_{\text{ж}}$ и r'_t связываются последовательно с сопротивлением частично открывшейся внутренней осушенной поверхности втулки $r'_{\text{сух}} = r_{\text{отк}}$ (фиг. 5). В схеме замещения изоляции ротора при наклонном положении, подготовленного для диагностики (фиг. 6), образованного промежутка между коллектором и опустившимся столбом жидкости проявляется как появление со стороны коллекторов высокомегаомной пе-

ремычки $R_{тсж}=R_{отк}$, последовательно связанной с параллельно соединенными взаимосвязанными низкоомными частичными сопротивлениями – оставшегося во втулках столба жидкости $R_{ж}$ и контактирующей с ней боковой поверхности втулок $R'_т$ со стороны обмотки. По мере увеличения $R_{тсж}$ шунтирующее действие сопротивлений $R'_{ж}$ и $R'_т$ по отношению к сопротивлению изоляции обмотки $R_{из}$ ослабевает, и при достижении $R_{тсж}=R_{отк}$ и вовсе исчезает, т.е. параллельно соединенные низкоомные сопротивления $R'_{ж}$ и $R'_т$, последовательно связанные с высокомегаомным сопротивлением $R_{тсж}=R_{отк}$ получают электрически отключенными от коллектора. У подготовленного к тестированию изоляции ротора с водяным охлаждением обмотки во всех втулках водоподвода образуются со стороны коллекторов высокомегаомные мостики, электрически отключающие обмотку от корпуса машины, а схема измерений и испытаний изоляции обмотки становится высокомегаомной.

В процессе подготовки втулок проводят контроль параметров их поверхностной изоляции – сопротивления и величины сухоразрядного напряжения. Для этого через отверстия 21 внутрь втулок вводят с соблюдением требований электробезопасности измерительный электрод 22 с изолированным выводом 23. Электрод устанавливают посередине длины образованного сухоразрядного промежутка 24 с плотным прилеганием его боковой поверхности к внутренней поверхности 14 втулки. Перед проведением измерений и испытаний втулок вал и обмотку ротора заземляют.

При измерении сопротивления и испытании повышенным напряжением изоляции втулок мегаомметр и испытательный высоковольтный трансформатор присоединяют к валу ротора и выводу электрода (фиг. 7). Втулку считают пригодной, когда ее внутренняя поверхность по сухоразрядному промежутку в результате подготовки будет иметь сопротивление не менее одной четвертой части сопротивления изоляции собственно обмотки, оговоренной стандартом на машину при нормальных значениях климатических факторов внешней среды, умноженной на число втулок водоподвода N , а выдерживаемое испытательное напряжение промежутка будет не менее половины ожидаемого испытательного напряжения т.е. по этой втулке произошло высокомегаомное и высоковольтное полное электрическое отключение обмотки от корпуса машины.

Так, например, у четырехполюсного ротора с водяным охлаждением турбогенератора мощностью 500 МВт после изготовления в соответствии с требованиями стандарта допустимое сопротивление изоляции собственно обмотки ротора, задаваемое обычно при расчетной рабочей температуре 115°C, при пересчете к нормальному значению температуры окружающего воздуха 20°C, при которой проводится доводка втулок, не должно быть менее $0,5 \cdot 2^5 = 16$ МОм, а испытательное напряжение изоляции обмотки должно составлять 3500 В. При указанных величинах сопротивления изоляции и выдерживаемого напряжения длина сухоразрядного промежутка во втулках, открывающегося при опускании воды в наклонном положе-

нии ротора, по опыту машин с непосредственным газовым охлаждением, должна быть не менее 10 мм. При числе втулок водоподвода $N=50$ шт. измеренное сопротивление изоляции по вышеуказанной схеме (фиг. 7) при доведенной до нормального состояния втулке должна быть не менее

$$R_{изм} \geq R_{из} \frac{N}{4} = \frac{16 \cdot 50}{4} = 200 \text{ МОм.}$$

По достижению этой величины сопротивления втулку испытывают половинным испытательным напряжением изоляции ротора, равным $3500/2 = 1750$ В. В случае перекрытия по одному из промежутков - от электрода на заземленный коллектор или от электрода на остатки воды во втулке заземленной обмотки - мощность разряда при приложении напряжения к одиночной втулке по принятой схеме испытания получается ничтожно малой и поверхность втулки практически не повреждается. Благодаря этому, по мере доводки втулки испытание указанным напряжением можно проводить безбоязненно многократно, пока окончательной доводкой промежутки по обе стороны от электрода приобретут способность выдерживать его. Таким способом проверяют и доводят до нормального состояния поочередно каждую втулку водоподвода, чем достигается полное электрическое отключение обмотки ротора от корпуса машины.

После завершения подготовки втулок и придания им заданных параметров из них выводят электроды. Высушенные изоляционные втулки водоподвода после перевода их из низкоомного в высокомегаомное состояние становятся такими же периферийными узлами обмотки с высокомегаомной изоляцией, как стержни и винты токоподвода, контактные кольца и др., и не создают помех при контроле изоляции собственно обмотки. Таким путем ротор с водяным охлаждением после электрического отключения обмотки от корпуса по способу проведения контроля и испытания изоляции приобретает все характерные признаки ротора с газовым охлаждением. В схеме замещения сопротивления изоляции втулки водоподвода жидкая составляющая $\gamma'_{ж}$ в наклонном роторе, будучи с одной стороны электрически соединенной с обмоткой, а с другой стороны электрически отключенной от коллекторов, отключает обмотку от корпуса, так как сопротивление втулки из килоомного превращается в мегаомное. В этом случае диагностику состояния изоляции собственно обмотки, уже электрически отключенную от корпуса и освобожденную от вредного шунтирующего действия изоляции водоподвода, проводят известными способами и методами, принятыми для обмоток с газовым охлаждением. Для этого с обмотки снимают ранее наложенное заземление, потом к ней и заземленному валу вначале присоединяют мегаомметр и измеряют полное сопротивление изоляции ротора, а затем при удовлетворительном его значении отключают мегаомметр и присоединяют высоковольтный трансформатор и испытывают изоляцию заданным повышенным напряжением. Изоляцию обмотки, выдержавшую это испытание, считают нормальной, и ротор после испытания передают на сборку водоподвода, за-

полнение дистиллятом системы охлаждения, гидроиспытание обмотки и т.д.

Если сопротивление изоляции обмотки получается ниже нормированного значения или не выдерживает испытание повышенным напряжением, то повреждение изоляции ротора будет находиться вне водоподвода, и поиск ослабленного места изоляции следует вести в пределах собственно обмотки с использованием известных способов и методов, наработанных и хорошо зарекомендовавших себя в машинах с газовым охлаждением. Следует отметить, что при выявлении места повреждения к изоляции собственно обмотки относится также и поверхностная изоляция хвостовика втулки со стороны обмотки.

В выше приведенном примере полное сопротивление изоляции ротора должно быть не менее половины сопротивления изоляции собственно обмотки, т.е. $16/2=8$ МОм, и обмотка при этом должна выдержать испытательное напряжение 3500 В. В этом случае высокомегаомные результаты измерений сопротивления изоляции не вызывают никаких сомнений в достоверности контроля, а ненадобность в циркуляции дистиллята по обмотке с появлением гарантированно высокой электрической прочности сухоразрядных промежутков во втулках существенно упростила и ускорила проведение испытания изоляции повышенным напряжением, не подвергая при этом втулки опасности повреждения.

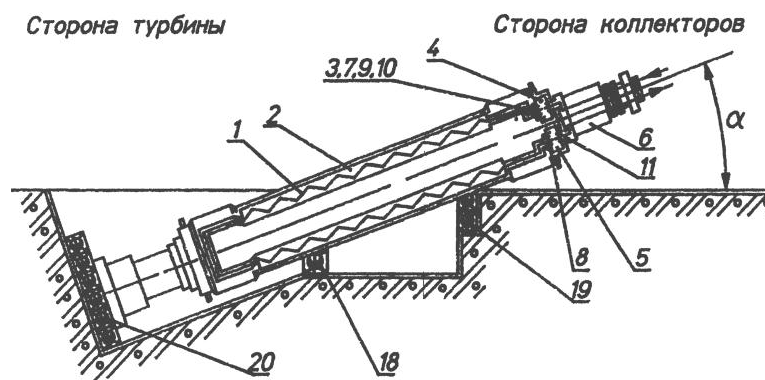
Таким образом, ротор с водяным охлаждением обмотки, подготовленный к диагностике состояния изоляции, по способу проведения измерений и испытаний изоляции полностью соответствует ротору с газовым охлаждением. При наклонном положении ротора и частичном освобождении втулок от дистиллята каждая втулка водоподвода с одной стороны электрически связана через оставшуюся в ней часть воды с обмоткой, а с другой стороны на время проведения диагностики электрически изолирует обмотку от заземленных коллекторов через высокомегаомный и высоковольтный диэлектрический мостик по внутренней поверхности освобожденного от воды участка втулки. Достигнутые параметры высокомегаомных и высоковольтных частичных диэлектрических промежутков во втулках, свободных от воды со стороны коллекторов, электрически отключают обмотку от корпуса и позволяют с высокой степенью

точности проводить измерение сопротивления изоляции собственно обмотки, а также упростить проведение испытания ее повышенным напряжением, отказавшись от циркуляции дистиллята и не опасаясь при этом повредить токами утечки внутреннюю поверхность втулок.

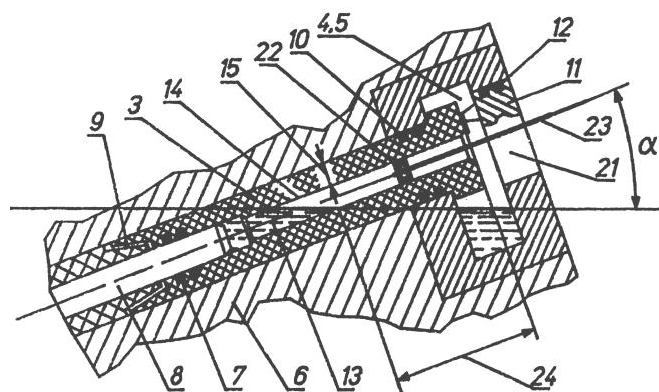
Предложенный способ контроля изоляции обмотки ротора с водяным охлаждением предусматривает простое и высокоэффективное решение по повышению сопротивления изоляции водоподвода и обеспечению тем самым безопасных для его втулок условий проведения испытаний изоляции повышенным напряжением без циркуляции дистиллята по обмотке. Достижимое при этом повышение сопротивления изоляции каждой втулки, водоподвода и ротора в целом и их измеренные истинные высокомегаомные значения позволили повысить достоверность диагностики изоляции. При диагностике состояния изоляции обмоток роторов с водяным охлаждением, благодаря переводу изоляции водоподвода из низкоомного в высокомегаомное состояние, появилась возможность непосредственным измерением определить действительно высокомегаомные сопротивления изоляции собственно обмоток вместо опосредствованной весьма сомнительной оценки их значений по измерению килоомного полного сопротивления изоляции ротора, т.е. водяных столбов во втулках водоподвода, а также стало возможным сопоставлять реальные высокомегаомные сопротивления изоляции этих обмоток с сопротивлением изоляции обмоток роторов с газовым охлаждением, т.е. принять их нормы и объемы испытаний и использовать ставшие безопасными для втулок их способы контроля и испытания.

Применение предложенного способа контроля изоляции ротора с водяным охлаждением при наклонном положении его позволяет упростить проведение диагностики, повысить ее достоверность и на этой основе повысить эксплуатационную надежность турбогенераторов.

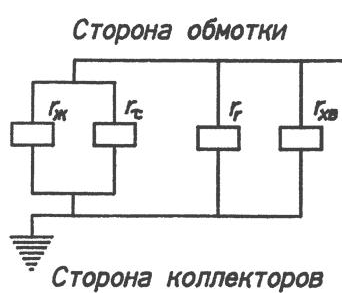
Способ приемлем для роторов с любой системой непосредственного водяного охлаждения обмотки ротора - принудительной высокого давления и самонапорной низкого давления - и предполагает его использование при изготовлении, монтаже, ремонте и эксплуатации турбогенераторов предельных мощностей 1500...1500 МВт.



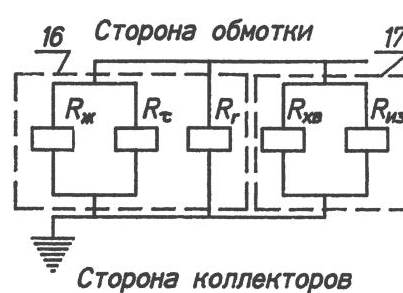
Фиг. 1



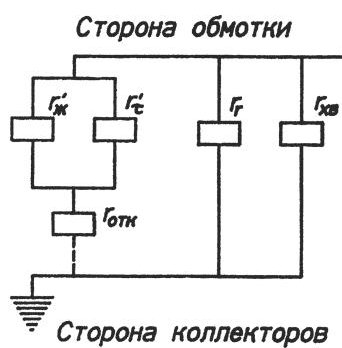
Фиг. 2



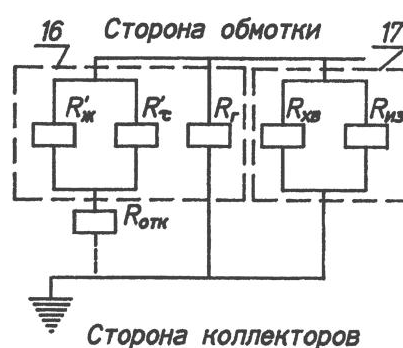
Фиг. 3



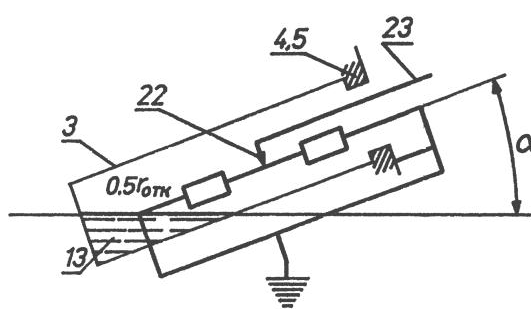
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

ДП "Український інститут промислової власності" (Укрпатент)
Україна, 01133, Київ-133, бульв. Лесі Українки, 26
(044) 295-81-42, 295-61-97

Підписано до друку _____ 2002 р. Формат 60х84 1/8.
Обсяг _____ обл.-вид. арк. Тираж 35 прим. Зам. _____

УкрІНТЕІ, 03680, Київ-39 МСП, вул. Горького, 180.
(044) 268-25-22
